

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DESARROLLO DE ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FIRMAS DE CONSUMO DE
POTENCIA ELÉCTRICA PARA SISTEMA DE MONITOREO DE CARGA NO
INTRUSIVO BASADO EN WAVELETS(ONDOLETAS).

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

JESÚS NAIM LEÓN ORTEGA

DIRECTOR DE TESIS: JOSÉ ANTONIO HOYO MONTAÑO

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2017



Índice

Capitulo 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Justificación del tema de tesis	6
1.3 Planteamiento del problema a solucionar	7
1.4 Hipótesis	8
1.5 Objetivo general	8
1.6 Objetivos	8
1.7 Metas y alcances	8
1.8 Descripción de la estructura de la tesis	9
Capitulo 2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	10
2.1 Introducción	10
2.2 Estado del arte	11
2.2.1 Transformada de Fourier de tiempo corto	11
2.2.2 SCADA	16
2.2.3 Potencia real y reactiva	18
2.2.4 Armónicos	20
2.2.5 Transformada de ondoleta	22
2.2.6 Alternativas de solución reportadas en la literatura	26
2.3 Propuesta de Solución	27
2.4 Resumen	29
Capitulo 3. ANÁLISIS Y DESARROLLO DE PROTOTIPO	30
3.1 Introducción	30
3.2 Diseño del prototipo	30
Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4.1 Introducción	56
4.2 Protocolo de experimentación y análisis de resultados	56
4.3 Resultados experimentales	60
Primera prueba	60
Segunda prueba	63
Tercera prueba	74
Cuarta prueba	76
Quinta prueba	79
Sexta prueba	80
Séptima prueba	80
Octava prueba	81
Novena prueba	81
Décima prueba	82
Décima primera prueba	82
Décima segunda prueba	85
Décima tercera prueba	86
Capítulo 5. CONCLUSIONES	88
5.1 Conclusiones	88
5.2 Trabajos futuros	89
Referencias bibliográficas	90

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de sistema de monitoreo de carga no invasivo	7
Figura 2. Diagrama de señal del sistema	10
Figura 3. Diagrama a bloques del sistema	11
Figura 4. Potencia compleja representada en el triangulo de potencia	20
Figura 5. Suma de fundamental con 3er armónica	21
Figura 6. Suma con 3er armónica poco mayor	21
Figura 7. Suma con 3er armónica desfasada	22
Figura 8. Análisis de ondoleta	22
Figura 9. Resultado de la transformada de ondoleta	23
Figura 10. Efectos de escalado	24
Figura 11. Grafica de transformada de ondoleta	25
Figura 12. Escalas de ondoletas	25
Figura 13. Implementación del algoritmo de Mallat en 3 niveles	26
Figura 14. Diagrama especifico a bloques del sistema	28
Figura 15. Muestreo y transformación a 2.5kM/s	31
Figura 16. Muestreo y transformación a 250kM/s	31
Figura 17. Transformada del muestreo a 25 kM/s corregido	32
Figura 18. Transformada del muestreo #15 de la base de datos	33
Figura 19. Transformada del muestreo #40 de la base de datos	33
Figura 20. Transformada del muestreo #1 de la base de datos	34
Figura 21. Transformada del muestreo #43 de la base de datos	34
Figura 22. Transformada del muestreo #6 de la base de datos	35
Figura 23. Transformada del muestreo #69 de la base de datos	35
Figura 24. Transformada del muestreo #15 de la base de datos con 20000 puntos	36
Figura 25. Transformada del muestreo #40 de la base de datos con 20000 puntos	36
Figura 26. Transformada del muestreo #6 de la base de datos con 20000 puntos	37
Figura 27. Transformada del muestreo #69 de la base de datos con 20000 puntos	37
Figura 28. Transformada de la corriente del muestreo #15	38
Figura 29. Transformada de la corriente del muestreo #40	38
Figura 30. Transformada de la corriente del muestreo #6	39
Figura 31. Transformada de la corriente del muestreo #62	39
Figura 32. Botón de caja de herramientas de Scilab	40
Figura 33. Utilidad de caja de herramientas	41
Figura 34. Caja de herramientas de ondoleta	41
Figura 35. Caja de herramientas instalada	42
Figura 36. Scilab después de instalar la caja de herramientas	43
Figura 37. Ejemplo de convolución	44
Figura 38. Diagrama de flujo de la transformada discreta de ondoleta	48
Figura 39. Ejemplo de árbol de decisión de la tabla 9	54

Figura 40. Diagrama de flujo del proceso completo	54
Figura 41. Diagrama a bloques del sistema	54
Figura 42. Diagrama eléctrico actualizado	55
Figura 43. Muestreo y transformación a 2.5kM/s	60
Figura 44. Muestreo y transformación a 250kM/s	61
Figura 45. Potencia con operación en MATLAB	61
Figura 46. Potencia con operación en osciloscopio	62
Figura 47. Transformada del muestreo a 25 kM/s corregido	62
Figura 48. Transformada del muestreo #15 de la base de datos	63
Figura 49. Transformada del muestreo #40 de la base de datos	63
Figura 50. Transformada del muestreo #52 de la base de datos	64
Figura 51. Transformada del muestreo #54 de la base de datos	64
Figura 52. Transformada del muestreo #135 de la base de datos	65
Figura 53. Transformada del muestreo #137 de la base de datos	65
Figura 54. Transformada del muestreo #1 de la base de datos	66
Figura 55. Transformada del muestreo #43 de la base de datos	66
Figura 56. Transformada del muestreo #64 de la base de datos	67
Figura 57. Transformada del muestreo #103 de la base de datos	67
Figura 58. Transformada del muestreo #57 de la base de datos	68
Figura 59. Transformada del muestreo #122 de la base de datos	68
Figura 60. Transformada del muestreo #28 de la base de datos	69
Figura 61. Transformada del muestreo #76 de la base de datos	70
Figura 62. Transformada del muestreo #80 de la base de datos	70
Figura 63. Transformada del muestreo #186 de la base de datos	71
Figura 64. Transformada del muestreo #10 de la base de datos	71
Figura 65. Transformada del muestreo #37 de la base de datos	72
Figura 66. Transformada del muestreo #6 de la base de datos	72
Figura 67. Transformada del muestreo #69 de la base de datos	73
Figura 68. Transformada del muestreo #7 de la base de datos	73
Figura 69. Transformada del muestreo #73 de la base de datos	74
Figura 70. Transformada del muestreo #15 de la base de datos con 20000 puntos	74
Figura 71. Transformada del muestreo #40 de la base de datos con 20000 puntos	75
Figura 72. Transformada del muestreo #6 de la base de datos con 20000 puntos	75
Figura 73. Transformada del muestreo #69 de la base de datos con 20000 puntos	76
Figura 74. Transformada de la corriente del muestreo #15	76
Figura 75. Transformada de la corriente del muestreo #40	77
Figura 76. Transformada de la corriente del muestreo #6	77
Figura 77. Transformada de la corriente del muestreo #62	78
Figura 78. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de AC para medio segundo	82
Figura 79. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de aspiradoras para medio segundo	82
Figura 80. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de CFL para medio segundo	83
Figura 81. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de AC para un segundo	83
Figura 82. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de aspiradora para un segundo	83
Figura 83. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de CFL para un segundo	83
Figura 84. Niveles de energía totales en equipos de AC	84

Figura 85. Niveles de energía totales en equipos de aspiradoras	84
Figura 86. Niveles de energía totales en equipos de CFL	84
Figura 87. Niveles de energía totales de D7	85
Figura 88. Árbol de decisión final	87
Figura A.1 Árbol de decisión final	100

Índice de tablas

Tabla 1. Antecedentes de alternativas	27
Tabla 2. Comparación de algoritmos de MATLAB y propuesto	45
Tabla 3. Ejemplo convolución	47
Tabla 4. Resultados de porcentajes de coeficientes de energía para AC	49
Tabla 5. Resultados de porcentajes de coeficientes de energía para lámparas fluorescentes compactas	50
Tabla 6. Resultados de AC para vectores de potencia sobre los porcentajes de coeficientes de energía	50
Tabla 7. Pruebas de energía total	51
Tabla 8. Resultados de valores de energía con recorte de vectores estandarizados a medio segundo	51
Tabla 9. Ejemplo de proceso para determinar el mejor punto de inicio de un árbol de decisión para 2 clases	53
Tabla 10. Comparación de algoritmos de MATLAB y propuesto	79
Tabla 11. Algunos resultados de porcentajes de coeficientes de energía para AC	80
Tabla 12. Mitad de los resultados de porcentajes de coeficientes de energía para lámparas fluorescentes compactas	80
Tabla 13. Mitad de los resultados de AC para vectores de potencia sobre los porcentajes de coeficientes de energía	81
Tabla 14. Pruebas de energía total	81
Tabla 15. Mitad de resultados de valores de energía con recorte de vectores estandarizados a medio segundo	82
Tabla 16. Fragmento de cálculo de índices de Gini ponderados	86
Tabla 17. Resultados de árbol de decisión	87
Tabla A.1 Equipos para construcción de árbol	93
Tabla A.2 Ordenamiento de equipos por magnitud de energía de A8	95
Tabla A.3 Calculo de impurezas de los nodos	96

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el caso de México, la Ley para el aprovechamiento sustentable de energía, tiene como objetivo el que se haga optimo uso de la energía, tanto en su explotación como consumo[1].

Para EUA, los estándares de conservación de energía para nuevos edificios comerciales federales y edificios residenciales elevados multifamiliares y nuevos edificios residenciales federales de baja altura requieren que las mediciones sean eficientes, factibles y justificables económicamente [2].

En el caso del Reino Unido, los requerimientos de eficiencia energética para nuevas viviendas expresan sus intenciones de reducir en gran manera el uso de energía en los edificios como un importante elemento en el cambio climático [3].

En el consumo de energía de los edificios y sus regulaciones en China, se hace notar la importancia del rol de los edificios en el sector energético, ya que consumen más de un cuarto de la energía total de China. Además, la velocidad de crecimiento de China es muy alta y se prevé que aumente en el futuro [4].

En la directiva 2010/31/UE del parlamento europeo y del consejo del 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, se hace hincapié en que el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea lo ocupan los edificios, además, este sector se encuentra en crecimiento lo que aumentará el consumo de energía[5].

Entre las propuestas realizadas para implementar el sistema se encuentran:

Reconocer las variaciones de potencia real y reactiva, pero dos cargas diferentes pueden generar las mismas potencias real y reactiva; la medición de corrientes armónicas, pero tales son muy pequeñas; uso de límites y pendientes, pero solo aplicaba para picos significativos en la obtención de potencia; uso del concepto de "sobre espectral" el cual es un vector de los primeros coeficientes de la transformada de Fourier de tiempo corto de la señal de corriente transitoria, pero tal requiere de mucho entrenamiento para poder ser aplicado; el monitoreo del ruido eléctrico causado al cambiar de cargas. Tal depende de la carga y de la línea de transmisión y por eso es que al adherir otro conector, la detección puede fallar; el uso de curvas I-V para la detección de cargas, pero tal algoritmo no ha sido aplicado exitosamente a un sistema (NILM); empleo de un algoritmo de energía transitoria de encendido para la identificación de cargas, pero tal requiere un gran tasa de muestreo; entre otras[6].

1.2 Justificación del tema de tesis

Aun con la disminución de los costos de la tecnología de medición y el inminente cambio climático, los dueños de los edificios residenciales siguen con el pensamiento de que la medición de la energía es muy costosa y demanda mucho tiempo para ser justificada[7].

Ya quedó establecido que la identificación de cargas es importante, ya que sirve para llevar un control de la energía, horarios, usuarios etc. Aun mejor,

la identificación de cargas no invasivo hace del monitoreo una tarea menos costosa y más eficiente[7][8][9].Y en este rubro, el uso de transformadas ondoleta es la mejor opción actualmente.

1.3 Planteamiento del problema a solucionar

La generación de energía está produciendo el calentamiento global y el cambio climático, es por eso que es crucial aplicar nuevas y mejores formas de ahorro de energía. Para poder saber cuánta energía es desperdiciada en un sistema, esta necesita ser medida. Reportes sobre el tema indican que, el llevar un control de la energía, genera un ahorro del 4 al 12%, y siendo que en Estados Unidos los edificios consumen el 70% de la energía generada, el control de la energía debe de ser una parte vital de la instalación eléctrica de éstos[9].

En el caso de usuarios residenciales, en Estados Unidos se consume hasta el 37% de la energía eléctrica, y en la mayoría de los casos solo se cuenta con el recibo de electricidad para verificar el consumo. Con un medidor inteligente, como NILM, se mejoraría mucho la medición de electricidad[7].



Figura 1. Ejemplo de sistema de monitoreo de carga no invasivo

Al querer hacer más eficiente el uso de la energía en las redes eléctricas, se han implementado varios sistemas de monitoreo de cargas, como el sistema SCADA, el NILM (en sus variaciones), los cuales pueden mejorarse aún más[6].

Los sistemas de monitoreo de cargas tradicionales (SCADA) utilizan medidores en cada carga por que tiende a ser comprensivo, sistemático y conveniente. Aunque este tipo de sistemas pueden significar un tiempo y costo de instalación y mantenimiento altos[8].

En esto sistemas cuando los sensores detectan la condición de cambio, interruptores actuaran y mandaran un mensaje al grabador de cargas a través de un cable, entonces el mensaje se manda de vuelta al centro de recolección de datos. Y al final, los datos son analizados para conocer el intervalo de operación de cada carga[10].

1.4 Hipótesis

La detección de cargas específicas, conectadas a una red eléctrica, puede realizarse por medio de un monitoreo de cargas no invasivo usando transformadas de ondoleta.

1.5 Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo de cargas no invasivos usando transformadas de ondoleta, capaz de identificar la operación de cargas específicas para que el usuario tenga un control en tiempo real del consumo de energía eléctrica.

1.6 Objetivos

- Desarrollar una plataforma de hardware para adquisición de datos para la medición de voltaje y corriente.

- Desarrollar una plataforma de hardware para el procesamiento de señales.
- Desarrollar un algoritmo y programa para la detección de cargas específicas basado en transformada de ondoleta.

1.7 Metas y alcances

- Identificar dos tipos de cargas en una instalación por métodos no invasivos.
- Desarrollar un algoritmo de detección de cargas por medio de transformada de ondoleta adecuada para su implementación en una plataforma tipo Raspberry Pi u Odroid.
- Implementar un sistema de adquisición de datos para la medición de voltaje y corriente de las cargas de tipo monofásico.
- Limitar el máximo de potencia a medir a 2.5kW
- Terminar el sistemas de monitoreo de cargas no invasivos usando transformadas de ondoleta para las cargas deseadas.

1.8 Descripción de la estructura de la tesis

En el capítulo 2 se muestra una revisión al estado del arte, la cual dio pie a realizar la propuesta de solución para este problema. En el capítulo 3 se desarrollaran el diseño y construcción del prototipo de la propuesta de solución. En el capítulo 4 se presentaran las pruebas a realizar, con sus respectivos análisis y resultados. Para el capítulo 5 se presentaran las conclusiones de las pruebas e hipótesis y se indicaran las oportunidades de crecimiento.

Capítulo 2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

2.1 Introducción

En la figura 2, se muestran los pasos necesarios para el proceso del sistema de detección de cargas no intrusivo. Este sistema se maneja en su mayoría digitalmente(excepto en el área de acondicionamiento, en el cual las entradas y salidas son analógicas), debido a la facilidad de procesamiento de datos en este tipo de sistemas.



Figura 2. Diagrama de señal del sistema

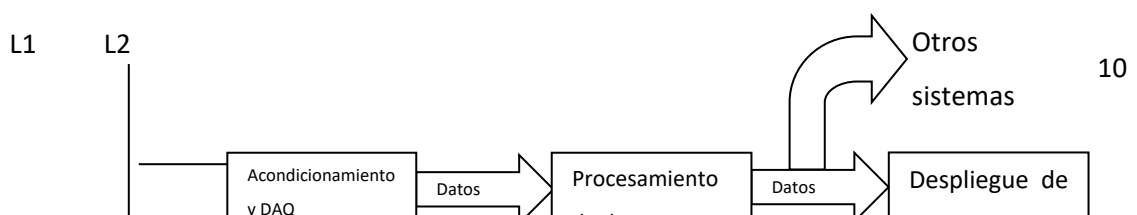
En primer lugar, el acondicionamiento de señal se encargará de reducir la magnitud de la señal de entrada de cientos de voltios a voltios y en el caso de la corriente, no será necesaria tal reducción.

En segundo lugar, el sistema de adquisición de datos se encargará de convertir la señal analógica a digital para poder ser procesada.

En tercer lugar, en el procesamiento de datos, se tomará la señal digitalizada y será procesada por para identificar la carga o cargas que se desean.

En cuarto lugar, después del procesamiento de señal, el sistema identificará la o las cargas deseadas o ninguna en el caso.

En quinto lugar, el sistema desplegará la información en alguna pantalla y/o algún bus de datos para ser utilizado por algún otro sistema.



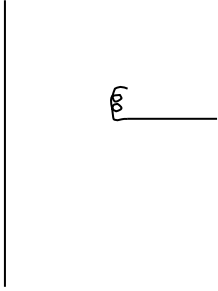


Figura 3. Diagrama a bloques del sistema

2.2 Estado del Arte

2.2.1 Transformada de Fourier de tiempo corto.

Series de Fourier

Una señal se dice que es periódica si para algún valor de T diferente de cero [11]:

$$x(t) = x(t + T) \quad -\infty < t < \infty \quad (1)$$

Al primer valor de T después de cero se le denomina periodo fundamental o T_0 . Por lo que la ecuación (1) se puede escribir como [11]:

$$x(t) = x(t \pm mT_0) \quad -\infty < t < \infty \quad (2)$$

donde m es entero. Esta ecuación da a entender que moviendo un número de entero de periodos en el tiempo sobre la señal se obtendrá el mismo valor de amplitud. Con lo cual se define la totalidad de la señal con la ecuación (2). Una señal que no cumpla con la ecuación anterior se denomina no periódica o aperiódica [11].

El valor de frecuencia correspondiente a ese periodo es:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (3)$$

conocida como frecuencia angular fundamental expresada en rad/s [11].

Para una señal $x(t)$ con periodo $T_0=2\pi/\omega=1/f_0$. Su expresión en serie de Fourier exponencial es [11]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk2\pi f_0 t} \quad (4)$$

y su expresión en serie de Fourier trigonométrica es:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t) \quad (5)$$

para la cual[11]:

$$a_0 = c_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (8)$$

Para la obtener los coeficientes (complejos de la serie de Fourier) C_k se tiene la ecuación de análisis[11]:

$$C_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) e^{-jk2\pi f_0 t} dt \quad (9)$$

Transformada de Fourier

En el caso de las señales no periódicas su representación en el dominio de la frecuencia será un espectro continuo por medio de la transformada de Fourier. La cual es una derivación de la serie de Fourier en la cual el periodo se torna muy largo (infinito)[11].

La transformada o integral de Fourier se define como:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

por otra parte, la transformada de Fourier inversa o ecuación de síntesis se define como[11]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (11)$$

Las definiciones anteriores eran para tiempos continuos de tiempo. El tiempo discreto (que es como se leen las variables en un sistema computacional), se analizará en la siguiente sección[11].

Señales periódicas discretas

Una señal de tiempo discreto o secuencia $x[n]$ se considera periódica si existe N entero positivo para el cual:

$$x[n+N]=x[n]=x[n+mN] \quad (12)$$

para toda n y cualquier entero m . Al primer periodo después de cero se le denomina periodo fundamental N_0 . Una señal que no cumple la ecuación anterior se denomina una secuencia aperiódica o no periódica[11].

Serie de Fourier discreta

La ecuación de síntesis de la serie de Fourier discreta se define como[11]:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} a_k e^{j2\pi nk/N_0} \quad (13)$$

La ecuación de análisis de la serie de Fourier discreta se define como[11]:

$$a_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x[n] e^{-jk2\pi n/N_0} \quad (14)$$

Transformada de Fourier Discreta

Se denomina transformada de Fourier de tiempo discreto de $X[n]$ a[11]:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (15)$$

Por su parte se denomina transformada de Fourier inversa de tiempo discreto a[11]:

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} X(\Omega) e^{j\Omega n} d\Omega \quad (16)$$

Una derivación del par de transformadas anteriores es la transformada de Fourier discreta(FDT), la cual al ser sobre un numero finito de muestras en el tiempo, hace posible su cálculo por sistemas computacionales[11].

Sea $x[n]$ una secuencia finita de longitud N , la transformada de Fourier discreta($X[k]$) se define por:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (17)$$

y la transformada de Fourier discreta inversa está dada por[11]:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)(-kn)} \quad (18)$$

Transformada rápida de Fourier

A un particularmente eficiente conjunto de algoritmos para el computo digital de la transformada de Fourier discreta se les llama algoritmos de transformada rápida de Fourier, los cuales aprovechando los repetitivos cálculos de la transformada de Fourier discreta, hacen el computo más eficiente[12].

Transformada de Fourier de tiempo corto

Para el análisis de muchas señales, el análisis de de Fourier es muy útil, pero tiene una gran desventaja: al transformar la información al dominio de la frecuencia, se pierde la información de cuando ocurrió cada frecuencia[13].

En un intento de corregir lo anterior, Dennis Gabor, modificó la transformada de Fourier para analizar solo una pequeña sección de la señal a la vez, proceso llamado enventanado[13]. A esta adaptación se le llamó transformada de Fourier de corto tiempo (STFT por sus siglas en inglés), la cual mapea la señal en frecuencia y tiempo[13].

Sin embargo, la precisión de la información obtenida es limitada y depende del tamaño de la ventana [13]. Por ejemplo, usar muchos intervalos de tiempo daría buena resolución en el tiempo pero no proporcionaría buena resolución en frecuencia, en especial para señales de baja frecuencia [14].

En el caso contrario, intervalos largos de tiempo darían mejor resolución en frecuencia, y menor resolución en el tiempo; además los intervalos largos de tiempo no son necesarios en señales de alta frecuencia [14].

Y con este proceso, al definir el tamaño de la ventana, este permanece para todas las frecuencias y muchas señales requieren más flexibilidad en ese aspecto [13][14].

Siendo $g(t)$ la ventana simétrica, la transformada de Fourier de corto tiempo se define como:

$$Sf(u, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - u)e^{-i\xi t} dt \quad (19)$$

Donde $\xi = \omega$ [15].

2.2.2 SCADA

Se le llama SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos) a todo software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita el control del mismo [16].

No es un sistema de control, sino software de monitoreo o supervisión, que sirve de interfaz entre los niveles de control y los de gestión [16].

Para un máximo aprovechamiento de la instalación el proceso debe tener:

- Completo manejo y visualización en cualquier tipo de sistema operativo.
- Arquitectura abierta.
- Sencillez de instalación.
- Permitir la integración de herramientas ofimáticas y de producción.
- Fácilmente configurable y escalable.
- Ser independiente del sector y la tecnología.
- Funciones de mando y supervisión.
- Comunicaciones flexibles.

La distribución física de un sistema SCADA varía dependiendo de las características de cada aplicación [16].

Los sistemas SCADA son una herramienta de supervisión y mando mayormente. Algunos de sus objetivos son:

- Economía. Es más fácil ver remotamente un proceso que pagar por revisarlo constantemente.
- Accesibilidad. En procesos de gran tamaño, es mejor tener todas las variables en un punto (oficina).
- Mantenimiento. Es posible agregar a la programación las fechas de mantenimiento de los diferentes equipos.

- Ergonomía. Las gráficas de las computadoras modernas sustituyendo los grandes paneles físicos.
- Gestión. Los datos recopilados pueden ser utilizados de muchas maneras.
- Flexibilidad. Cualquier modificación visual no representa una modificación física.
- Conectividad. Permite la conexión entre sistemas de diferentes proveedores[16].

El nombre más habitual para definir la relación de estos sistemas es:

MMI: Man Machine Interface, Interfaz Hombre-Máquina[16].

Las ventajas más evidentes de este tipo de sistemas son:

- Permite la creación de aplicaciones sin ser experto en programación.
- El sistema puede ser modificado para necesidades posteriores.
- Se pueden integrar cualquier tipo de sensores y actuadores.
- Localización más rápida de errores.
- Un sistema de control remoto puede funcionar de manera automática.
- Se puede realizar modificaciones de software de las estaciones remotas desde el centro de control.
- Se pueden mostrar la información del centro de control para su interpretación por técnicos de mantenimiento[16].

2.2.3 Potencia real y reactiva

Potencia aparente y factor de potencia

Los usuarios de energía eléctrica que usan cargas con pobre eficiencia de transmisión deben pagar un gran precio por cada kilowatt hora[17].

Para ver de dónde viene lo anterior, se definirá la potencia aparente y el factor de potencia. Suponiendo que el voltaje

$$v = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (20)$$

se aplica a una red y si corriente es [17]

$$i = I_m \cos(\omega t + \phi) \quad (21)$$

El ángulo de fase por el cual el voltaje se adelanta de la corriente es $(\theta - \phi)$. La potencia promedio entregada a la red en términos de sus valores máximos es:

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \phi) \quad (22)$$

O en términos de valores efectivos (RMS):

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(\theta - \phi) \quad (23)$$

Si los valores de corriente y voltaje fueran en cd, la potencia promedio hubiera sido el producto del voltaje por la corriente. Aplicando esta técnica a problemas sinusoidales, se obtendría un valor "aparente" dado por el producto $V_{eff} * I_{eff}$. Sin embargo, el resultado del producto de estos valores efectivos, no es la potencia promedio; se define como potencia aparente. Como $\cos(\theta - \phi)$ no tiene dimensión, la potencia aparente debe medirse en las mismas unidades que potencia real; pero para evitar confusiones se usa el término Volt-Amperes o VA [17].

La proporción de la potencia real a la potencia aparente es llamada factor de potencia (FP)[17].

$$FP = \frac{\text{potencia real}}{\text{potencia aparente}} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (24)$$

En los casos sinusoidales, el factor de potencia es $\cos(\theta - \phi)$. Esta relación es por lo que a $(\theta - \phi)$ se le llama ángulo de FP [17].

Para cargas puramente resistivas, la potencia aparente y real son la misma [17].

Una carga puramente reactiva (sin resistencias), provocará un ángulo de fase de más o menos 90 grados, por lo que el FP es cero [17].

Un ángulo de fase positivo, indica una carga inductiva y para un ángulo negativo, la carga es capacitiva [17].

Una carga inductiva tendrá un FP atrasado, mientras que una carga capacitiva tendrá un FP adelantado [17].

Potencia compleja

La magnitud de la potencia compleja es la potencia aparente, la parte real es la potencia promedio, y la parte imaginaria es la potencia reactiva [17].

La potencia compleja absorbida por una red es:

$$S = P + jQ \quad (25)$$

donde P es la potencia promedio, la parte imaginaria Q , es la potencia reactiva, la cual tiene la unidad de volt-ampere-reactivo(VAR)[17].

$$Q = V_{eff}I_{eff}sen(\theta - \phi) \quad (26)$$

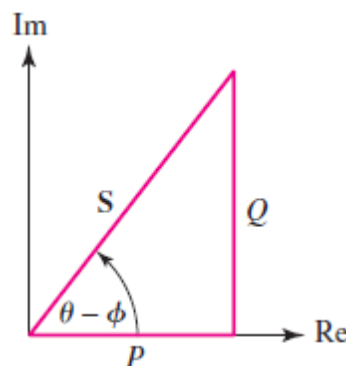


Figura 4. Potencia compleja representada en el triángulo de potencia

2.2.4 Armónicos

Con la intención de representar una función periódica general como una suma infinita de senos y cosenos, se puede considerar lo siguiente. Asumiendo una función coseno con frecuencia radial ω ,

$$v_1(t) = 2 \cos \omega_0 t \quad (27)$$

donde

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (28)$$

y el periodo T es[17]

$$T = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (29)$$

Aunque T no tenga subfijo cero, es el periodo de la frecuencia fundamental. Las frecuencias de las armónicas de este senoide son $n\omega$, siendo ω la frecuencia fundamental y $n=1,2,3,\dots$. La frecuencia del primer armónico es la frecuencia fundamental[17].

Ahora, seleccionando el tercer armónico

$$v_{3a}(t) = \cos 3\omega_0 t \quad (30)$$

La función fundamental $v_1(t)$, la tercer armónica $v_{3a}(t)$, y la suma de ambas ondas, se muestran en la figura 5[17].

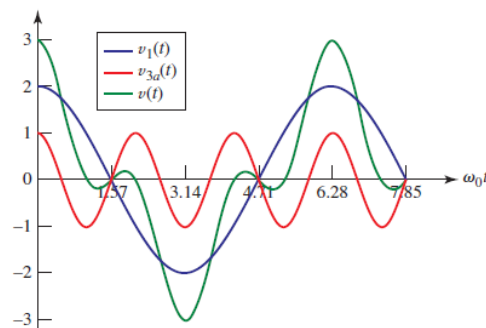


Figura 5. Suma de fundamental con 3er armónica

La forma de la función resultante cambia cuando la fase y amplitud de la tercer armónica cambia. La figura 6 muestra el efecto de combinar $v_1(t)$ y una tercer armónica, de amplitud un poco mayor,

$$v_{3b}(t) = 1.5\cos 3\omega_0 t \quad (31)$$

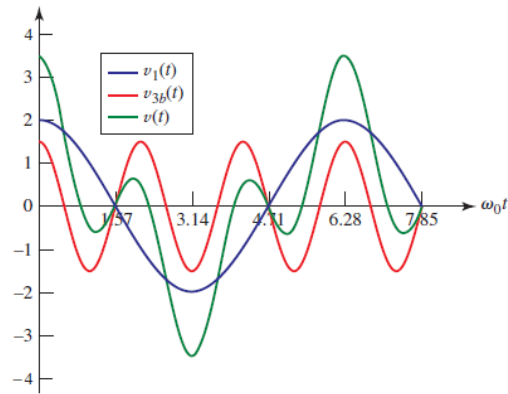


Figura 6. Suma con 3er armónica poco mayor

Cambiando la fase de la tercer armónica 90 grados

$$v_{3c}(t) = \text{sen}3\omega_0 t \quad (32)$$

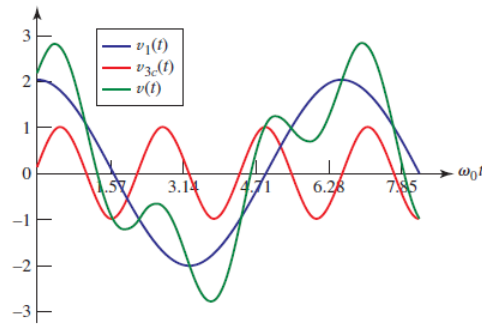


Figura 7. Suma con 3er armónica desfasada

En todos los casos el periodo de la onda resultante es igual al periodo de la función fundamental. La naturaleza de onda depende de la amplitud y fase de cada componente armónica[17].

2.2.5 Transformada de ondoleta

El análisis de ondoleta representa el siguiente paso lógico de transformada de Fourier de Tiempo Corto: una técnica de ventanas con tamaño variable. Este análisis permite usar intervalos largos de tiempo donde se requiere más información de frecuencias bajas, e intervalos cortos donde se requiere información de altas frecuencias[13].

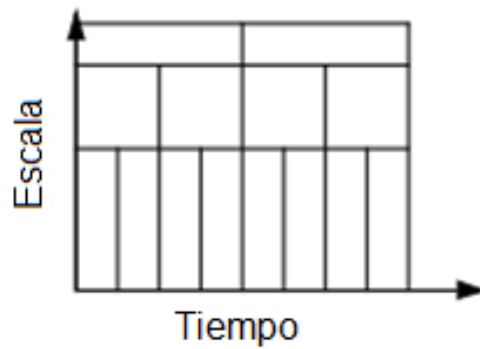


Figura 8. Análisis de ondoleta

El análisis de ondoleta nos puede ayudar a identificar pequeñas discontinuidades, tendencias y puntos de desajuste[13].

Una ondoleta es una onda de duración limitada con un valor promedio de cero; mientras que las ondas sinusoidales son suaves y predecibles, las ondoletas tienden a irregulares y asimétricas[13].

El análisis de ondoletas consiste en descomponer una señal en escaladas y desplazadas versiones de la ondoleta original(madre)[13].

Transformada continua de ondoleta

Similar a la transformada de Fourier continua, la transformada continua de ondoleta, se define como la suma de todos los tiempos de la señal multiplicada por versiones escaladas y desplazadas de la función ondoleta ψ [13]:

$$C(escala, posicion) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(escala, posicion, t)dt \quad (33)$$

Los resultados de esta transformada son muchos coeficientes de ondoleta C, que son funciones de la escala y posición[13].

Multiplicando cada coeficiente por la ondoleta propiamente desplazada y escalada, se obtienen las ondas que forman la señal original[13].

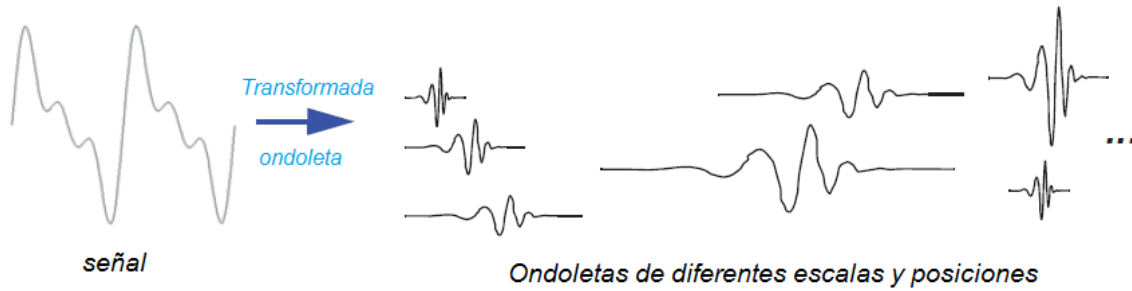


Figura 9. Resultado de la transformada de ondoleta

Escalado

Escalar una señal significa simplemente estirla o encogerla. Para explicar el factor de escala "a", se muestran los siguientes ejemplos en sinusoides, los cuales funcionan igual en las ondoletas[13]:

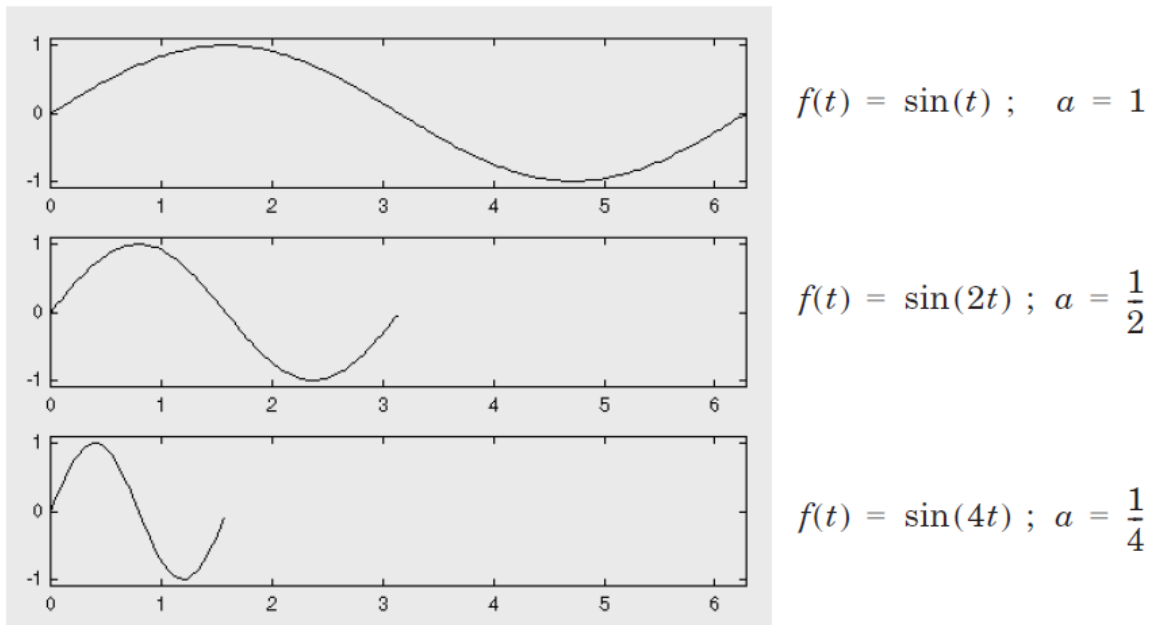


Figura 10. Efectos de escalado

Los pasos básicos para crear una transformada de ondoleta continua son:

1. Tomar una ondoleta y compararla a la sección al principio de la señal original.
2. Calcular el número C, que representa la correlación entre la ondoleta y la sección analizada(a mayor C, mayor similitud).

3. Desplazar la ondoleta a la derecha y repetir los pasos 1 y 2 hasta abarcar toda la señal.
4. Escalar(encoger) la ondoleta y repetir los pasos del 1 al 3.
5. Repetir los pasos 1 al 4 para todas las escalas[13].

El grafico de los coeficientes es parecido a una superficie con baches vista desde arriba. si pudiéramos ver la misma superficie de lado, se vería algo así[13]:

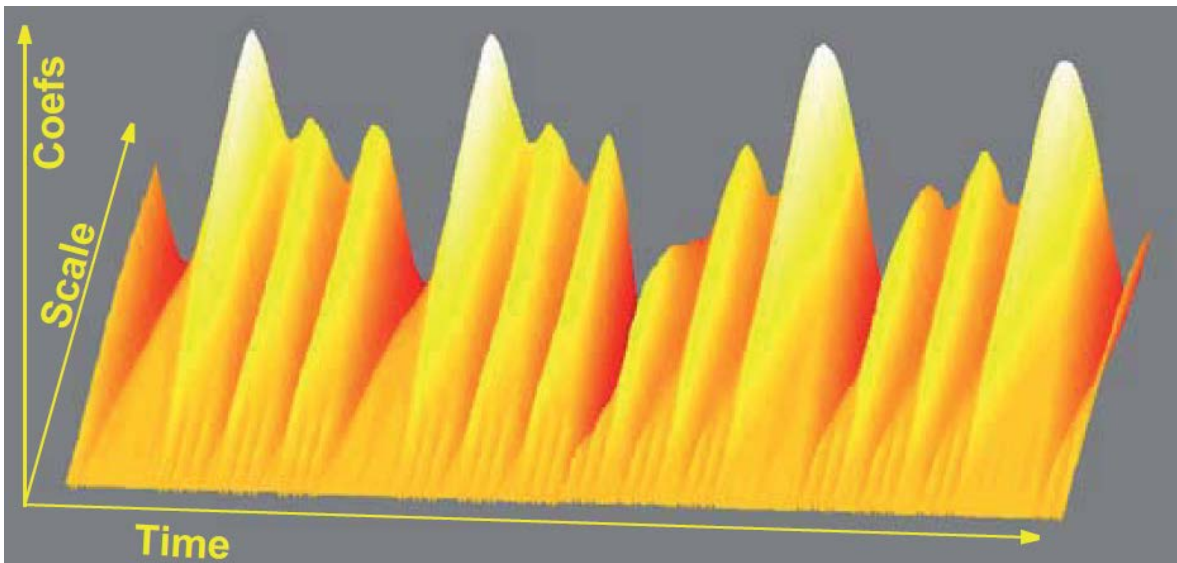


Figura 11. Grafica de transformada de ondoleta

Escala y frecuencia

Existe una correspondencia entre la escala de las ondoletas y la frecuencia[13].

A baja escala, la ondoleta se encuentra comprimida, lo cual sirve para los cambios rápidos, o sea de alta frecuencia y viceversa[13].



Figura 12. Escalas de ondoletas

La diferencia entre la transformada continua de ondoleta y la transformada discreta de ondoleta es la transformada continua puede operar a todas las escalas, por eso se ponen límites de escalas dependiendo de los detalles requeridos y el poder de computo[13].

Transformada discreta de ondoleta.

El cálculo de la transformada de ondoleta a cada escala es una cantidad de trabajo poco práctica[13].

Para hacer esta tarea más eficiente e igual de precisa se toman escalas en potencias de dos[13].

Una forma eficiente de implementar este esquema con uso de filtros es el algoritmo de Mallat, el cual provee de la transformada rápida de ondoleta[13].

En la figura 13 se aprecia la implementación del algoritmo de Mallat para 3 niveles, donde, $x[n]$ es la señal de entrada, $h[n]$ es un filtro para altas, $g[n]$ es un filtro pasa bajas, y los círculos en amarillo representan un submuestreo.

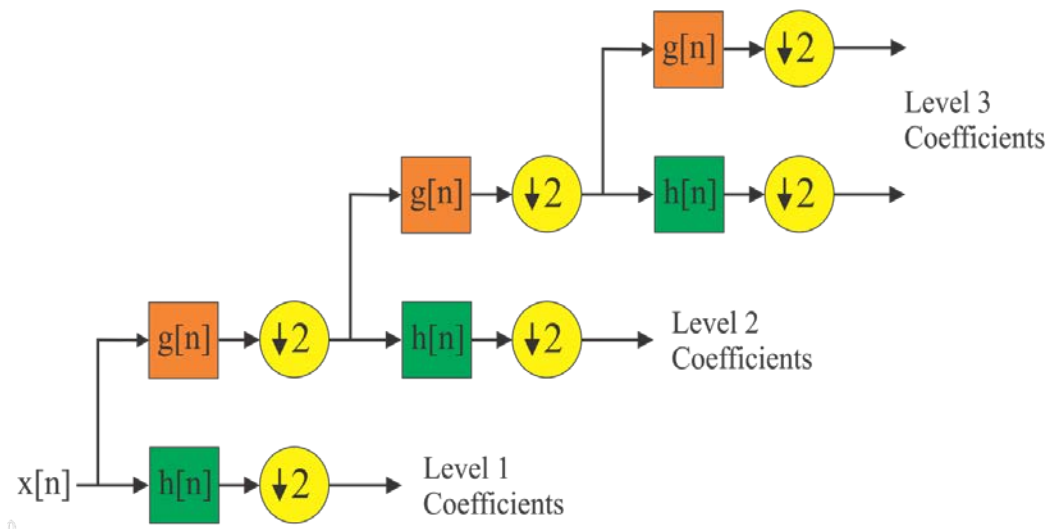


Figura 13. Implementación del algoritmo de Mallat en 3 niveles

En [8] y [6] se utilizó la transformada madre discreta de Daubechies para el reconocimiento de señales transitorias. En [18] se propone crear la ondoleta dependiendo de las necesidades.

2.2.6 Alternativas de solución reportadas en la literatura

Transformada de Fourier de tiempo corto.

Para la medición de cargas, en [6], se utilizó el concepto de sobre espectral, el cual consistía en un vector de los primeros coeficientes de la transformada de Fourier de tiempo corto de la señal de corriente de transición.

Aunque el método podía detectar los cambios de cargas, requiere de un gran entrenamiento para cada aplicación, antes de poder ser aplicado[6].

SCADA

Este sistema, el cual consiste en sensores en cada terminal de las cargas, además de tener alta precisión, requiere de mucho *hardware* (por la cantidad de sensores y su correspondiente cableado), y tiene un alto costo de mantenimiento por esto mismo, aunque eso hace que requiera menor algoritmo y por tanto, menos procesamiento[6][19][8][10].

Potencia real y reactiva

Este método requiere un algoritmo que identifique las cargas por sus potencias real y reactiva en estado estable. Aunque este método requiere mucho tiempo para recolectar las potencias real y reactiva previamente. Además no puede diferenciar entre dos cargas con mismas potencias real y reactiva[6][8][10].

Corrientes armónicas

En [6], se propuso usar, como firma de consumo, las corrientes armónicas generadas; pero los contenidos armónicos son muy bajos, lo cual dificultaría aplicar este método a cargas constante lineales o cuasi-lineales(edificios comerciales o residenciales).Además, los componentes armónicos son generalmente usados complementariamente al análisis de la potencia real y reactiva[20].

Tabla 1. Antecedentes de alternativas

Técnica de detección	Transformada rápida de Fourier[19]	SCADA[6]	potencia real y reactiva[6]	Corrientes armónicas[6]	Transformada de ondoleta
Ventajas	-Bajo costo -No invasivo	-Exactitud en reconocimiento de cargas -Menor procesamiento	-Facilidad de implementación.	- para cargas simples y múltiples.	- Análisis en tiempo y frecuencia - no invasivo
Limitaciones	-Análisis solo en frecuencia -Susceptible al ruido	-Muy invasivo -Altos costos	-2 cargas diferentes pueden tener las mismas potencias	-Corrientes muy pequeñas	-Limitado a cargas específicas.

2.3 Propuesta de Solución

El sistema propuesto para la detección de cargas se basa en el esquema de la figura 3, el cual fue modificado para representar más claramente las interfaces entre cada uno de los componentes como sigue:

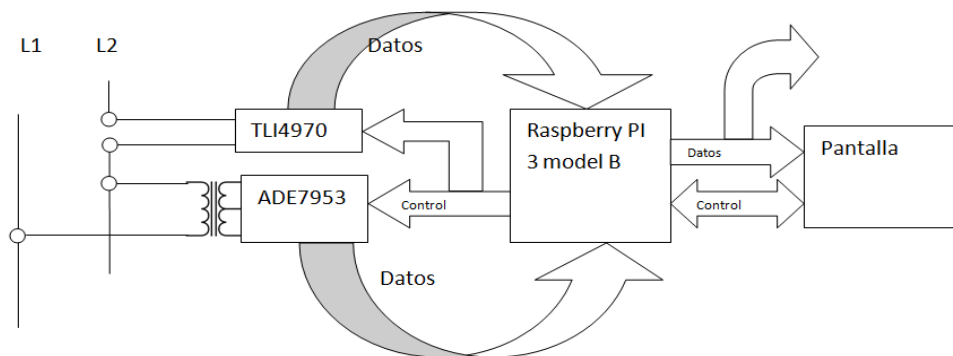


Figura 14. Diagrama específico a bloques del sistema

La propuesta consiste en que en la parte de acondicionamiento y DAQ se implementen los siguientes componentes:

- Para la medición de voltaje, un transformador con voltaje pico en el secundario de .5 V para su adecuación al medidor y por su aislamiento magnético.
- El medidor de voltaje será el ADE7953 de Analogdevices, con ancho de banda de 1.23 Khz, medición de forma de onda, comunicación I²C, SPI o UART, solo 3% de error de ganancia.
- Para la medición de corriente se utilizará el TLI4970 de Infineon, el cual cuenta con: medición de hasta ± 25 A, comunicación SPI y aislamiento magnético.

Para la parte de procesamiento de datos se implementará con un sistema tipo SBC (siglas en inglés de Single Board Computer) tipo Raspberry PI 3 modelo B, debido a que cuenta con interfaz SPI y la opción de implementar algoritmos en Scilab (con utilidades similares a MATLAB) para el procesamiento de datos en él, y al ser el de última generación su velocidad de procesamiento es mayor.

Y el despliegue de información puede ser en cualquier pantalla con interfaz HDMI o la pantalla Raspberry PI touch.

2.4 Resumen

En este capítulo se presento la primer propuesta de solución, la cual seguirá siendo refinada más adelante; además se presento el estado del arte de las alternativas de solución presentadas anteriormente en la literatura como: Transformada rápida de Fourier, SCADA, potencia real y reactiva, corrientes armónicas y transformada de ondoleta. Y para terminar se especifica un poco más la propuesta de solución.

Capítulo 3. ANÁLISIS Y DESARROLLO DE PROTOTIPO

3.1 Introducción

En este capítulo se muestran las diferentes técnicas utilizadas para implementar la transformada de ondoleta en un sistema SBC tipo Raspberry PI 3, y los parámetros adicionales utilizados para la identificación de firmas de consumo.

Además, se muestra una implementación diferente a la propuesta en el capítulo anterior, especialmente en la parte de los sensores, los cuales fueron sustituidos y se agregó un ADC con interfaz SPI.

3.2 Diseño del prototipo.

Para llegar a un prototipo final, se han realizado varias pruebas generales con el fin de identificar patrones para la detección de cargas. La primera prueba fue sobre un frigorífico, el cual se encuentra físicamente en el laboratorio de electrónica industrial del edificio de posgrado; al cual le fueron muestreados el voltaje y corriente con un osciloscopio Tektronix MDO3024. Tales muestras fueron tomadas a 2.5, 5, 10, 25, 50, 100 y 250 km/s por 40 segundos, y posteriormente multiplicadas punto por punto para generar un vector de potencia; a tales se les aplicó la transformada de ondoleta discreta con Daubechies 3 por medio del toolbox de ondoletas de MATLAB(Scilab en el prototipo), a continuación se muestran algunos resultados en las figuras 15 y 16:

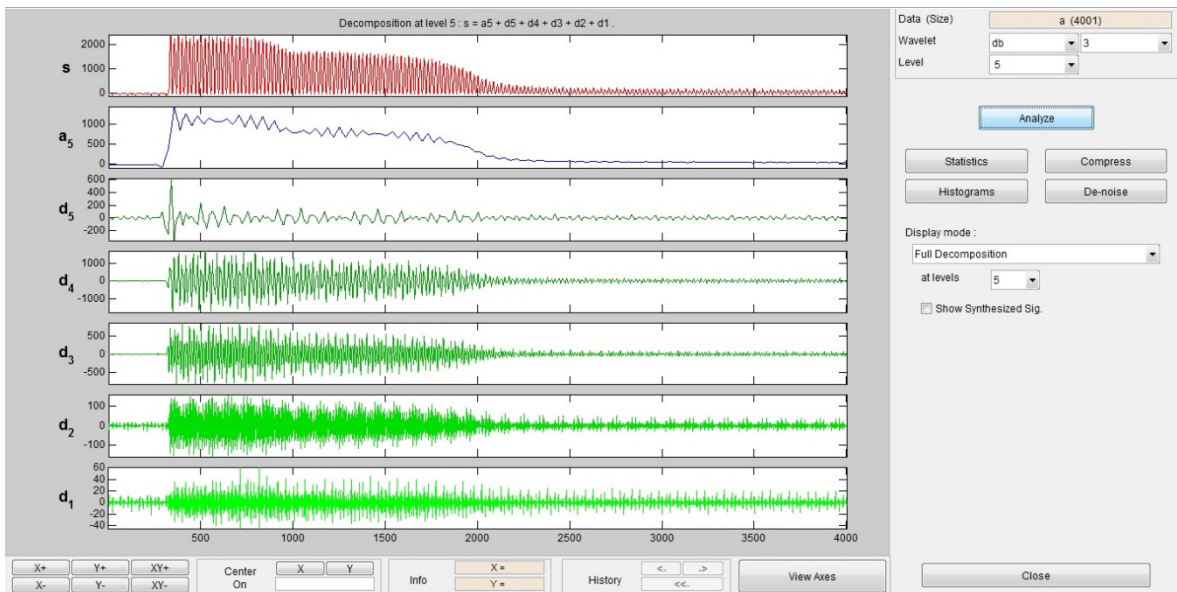


Figura 15. Muestreo y transformación a 2.5kM/s

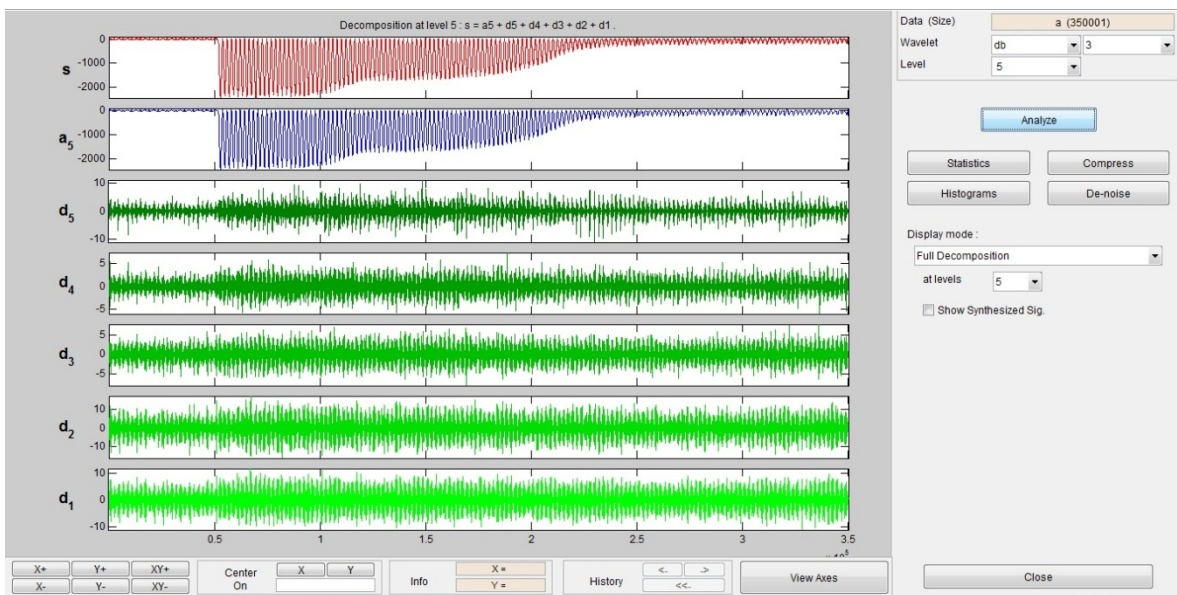


Figura 16. Muestreo y transformación a 250kM/s

Después se realizó una pequeña modificación del muestreo a 25 kM/s, realizando el producto de las variables (voltaje y corriente) directamente en el osciloscopio, debido a un comportamiento como corriente (en ambos lados del eje horizontal), con el siguiente resultado:

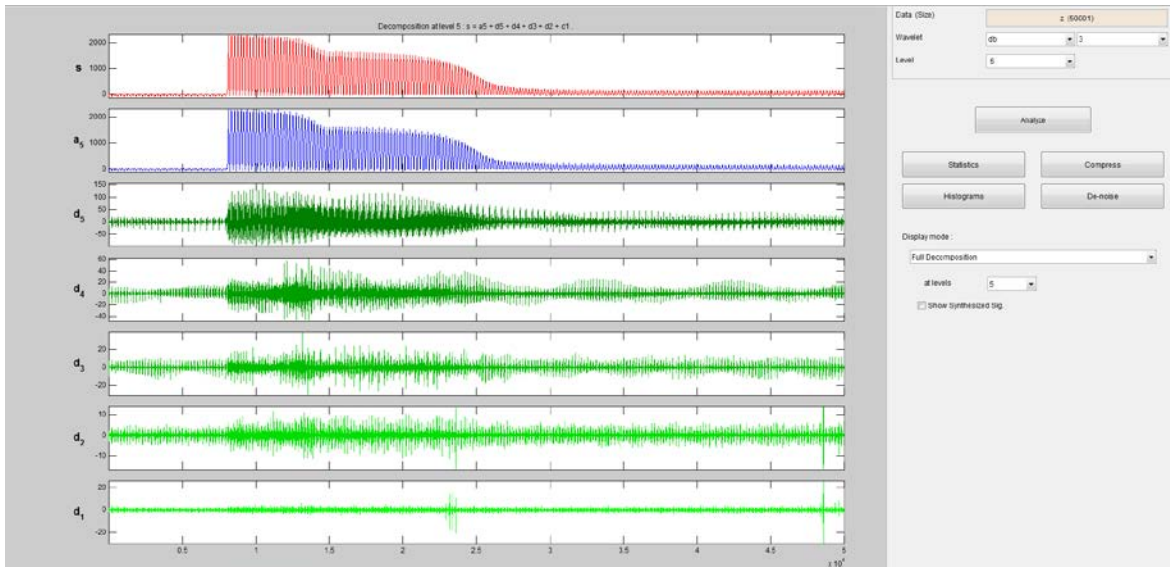


Figura 17. Transformada del muestreo a 25 kM/s corregido

Después se descubrió una base de datos en la dirección: <http://plaidplug.com/>, con más de 1000 muestreos de corriente y voltaje a 30 kM/s de 11 tipos de equipos, como: calentador eléctrico, lavadora, abanico, foco, aspiradora, laptop, microondas, secadora de cabello, lámpara fluorescente, aire acondicionados y refrigerador. Con la cual se realizó la siguiente prueba, con 15 equipos de cada tipo, generando también un vector de potencia a partir de los de voltaje y corriente, y graficándolo en búsqueda de patrones. En las figuras 18, 19, 20, 21, 22 y 23 se muestran algunos resultados:

Aire acondicionado:

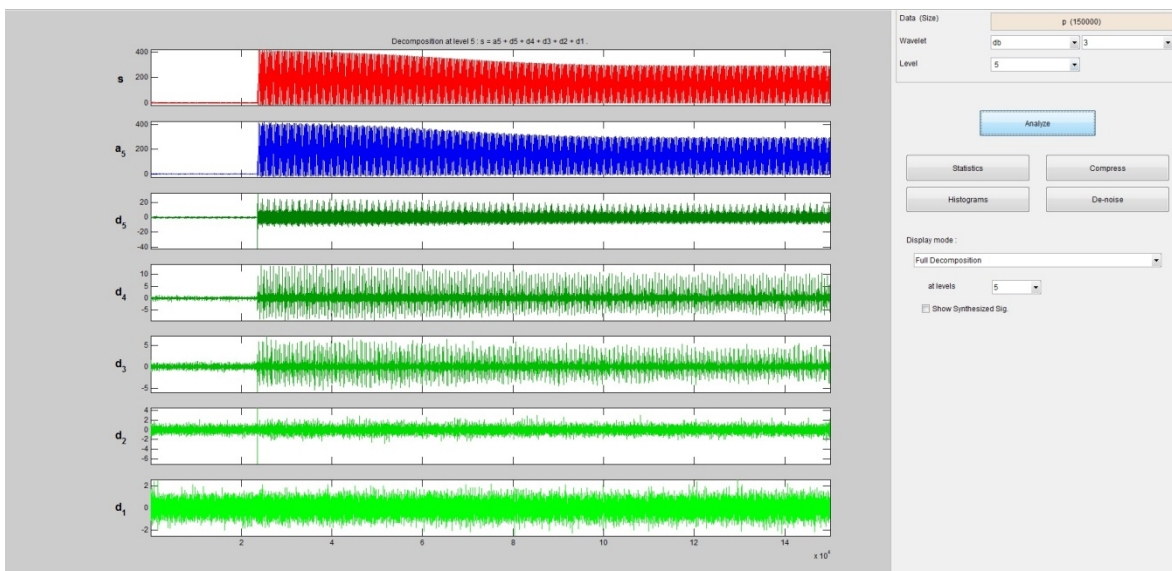


Figura 18. Transformada del muestreo #15 de la base de datos

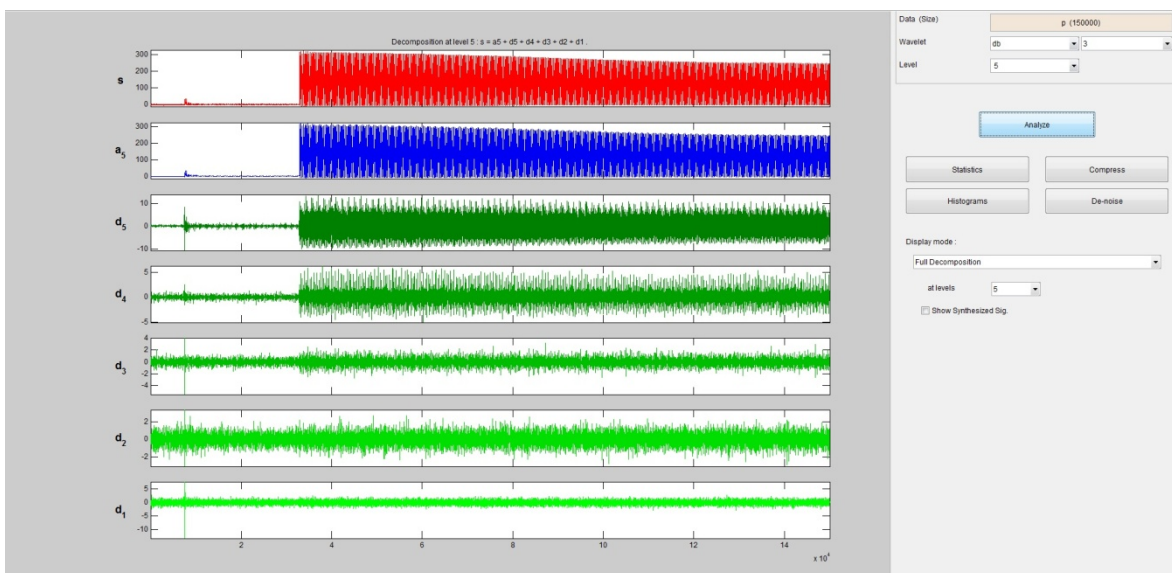


Figura 19. Transformada del muestreo #40 de la base de datos

Lámpara Fluorescente:

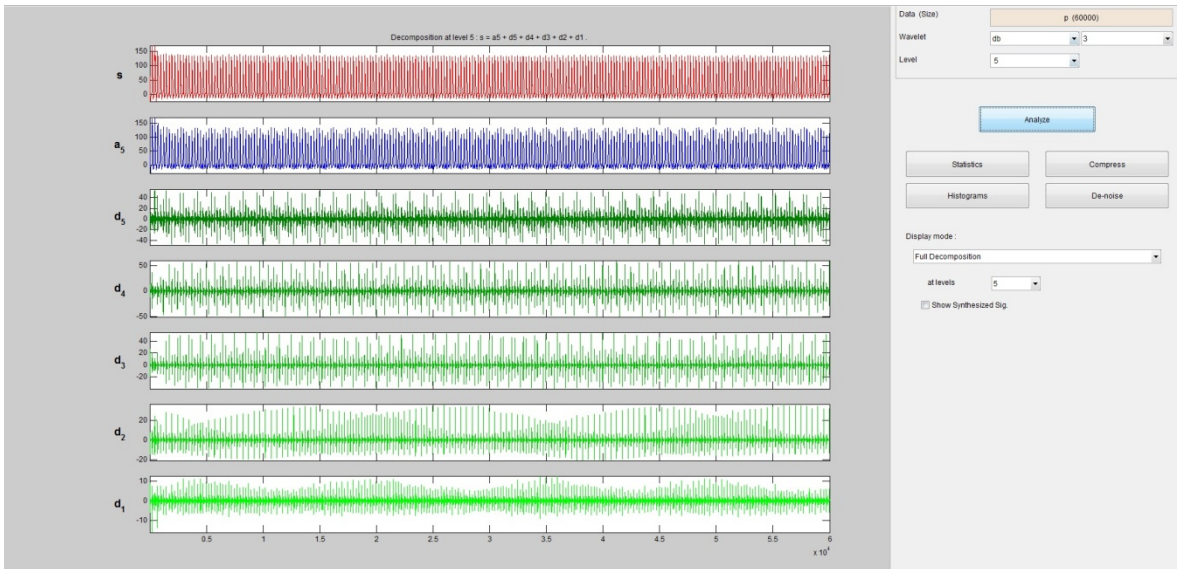


Figura 20. Transformada del muestreo #1 de la base de datos

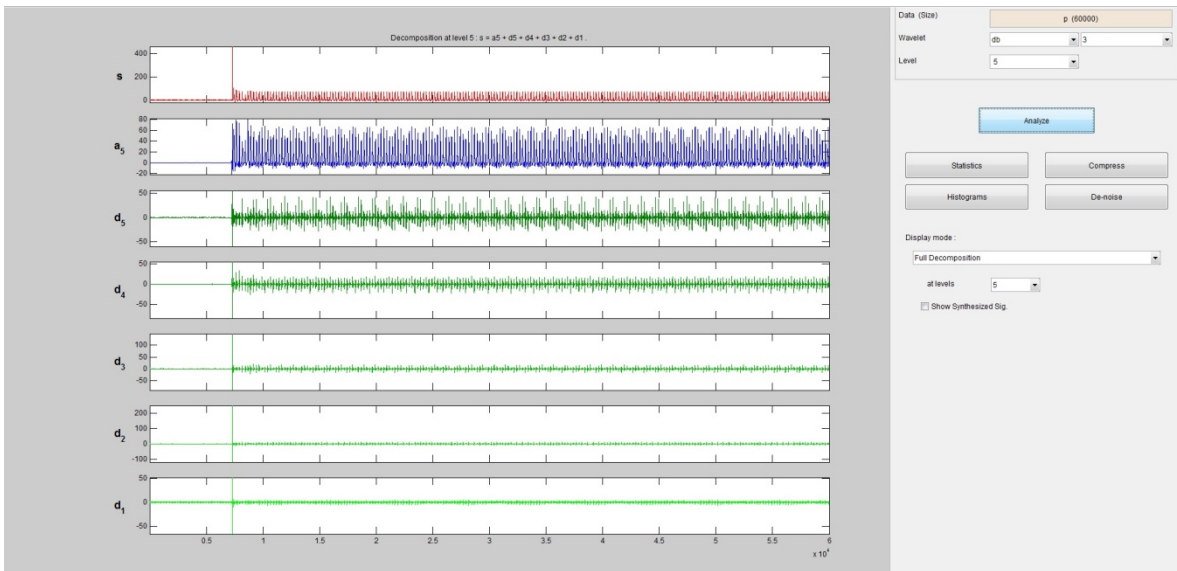


Figura 21. Transformada del muestreo #43 de la base de datos

Refrigerador:

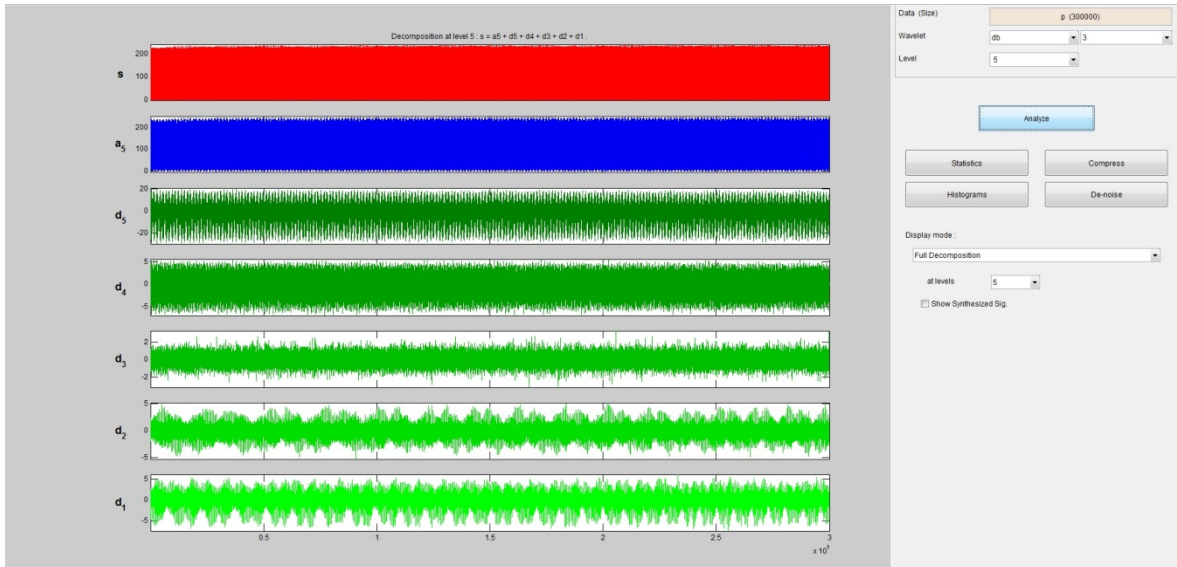


Figura 22. Transformada del muestreo #6 de la base de datos

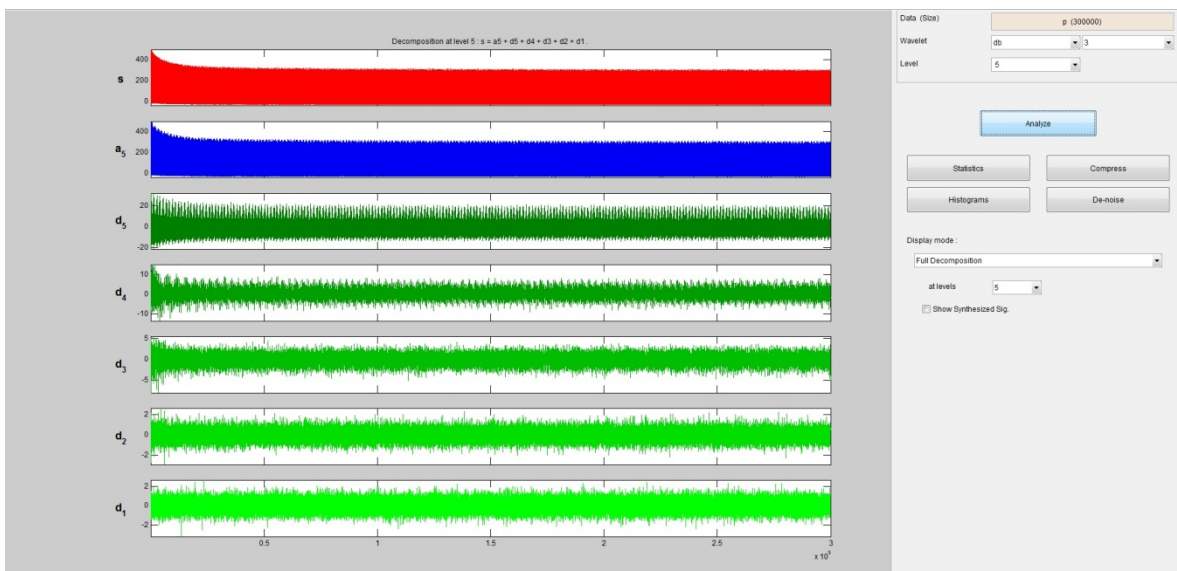


Figura 23. Transformada del muestreo #69 de la base de datos

La siguiente prueba se realizó solo con las cargas de aires acondicionados y refrigeradores, pero con los vectores recortados a 20,000 muestras para una mejor apreciación. Algunos resultados se muestran en las siguientes figuras:

Aire acondicionado:

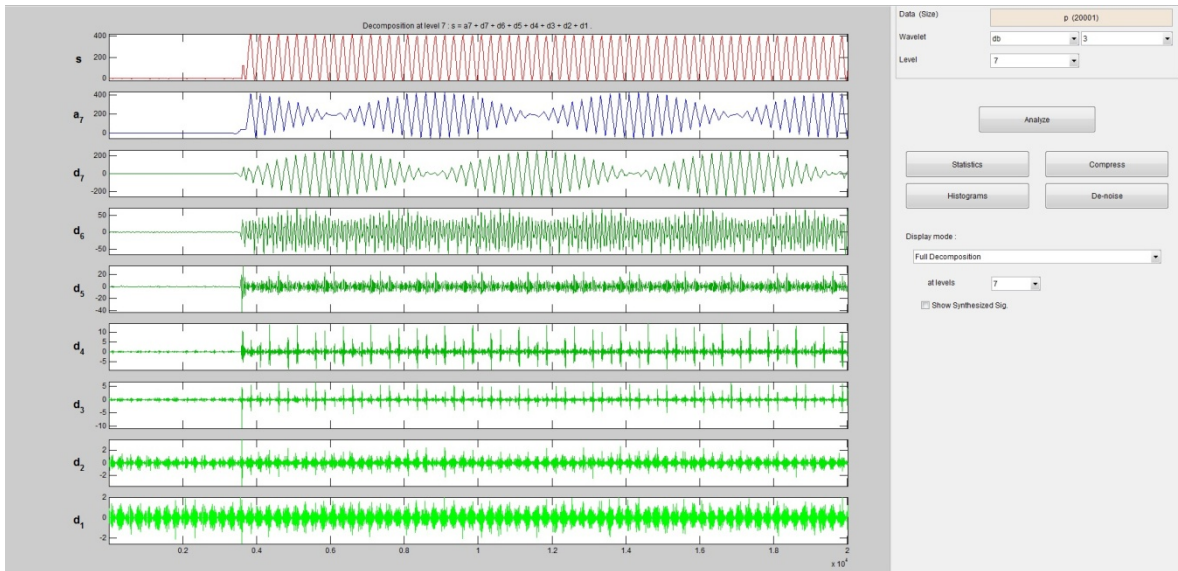


Figura 24. Transformada del muestreo #15 de la base de datos con 20000 puntos

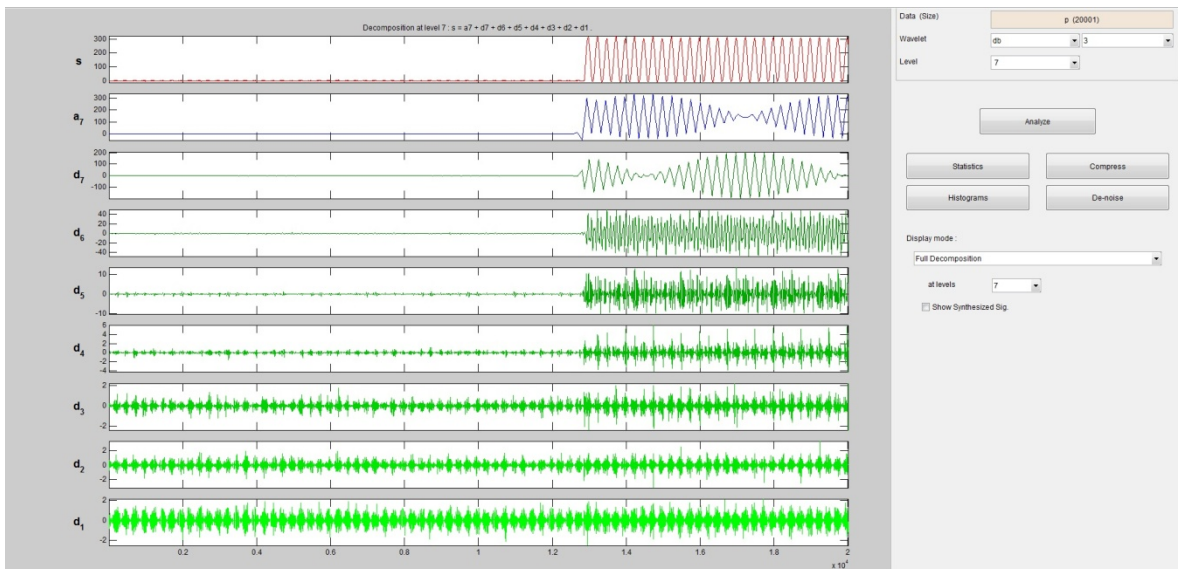


Figura 25. Transformada del muestreo #40 de la base de datos con 20000 puntos

Refrigerador:

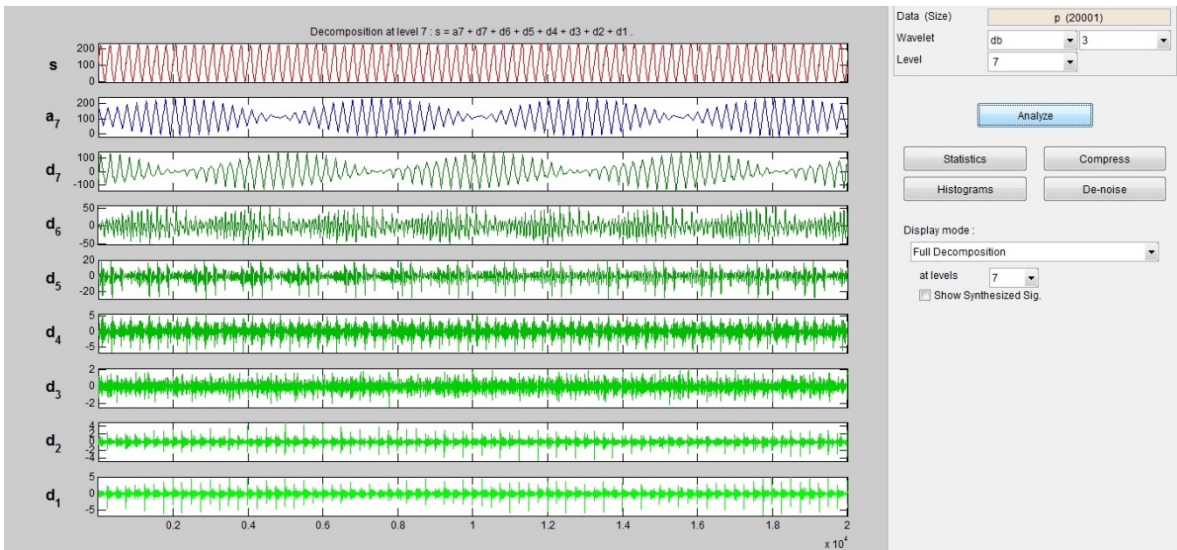


Figura 26. Transformada del muestreo #6 de la base de datos con 20000 puntos

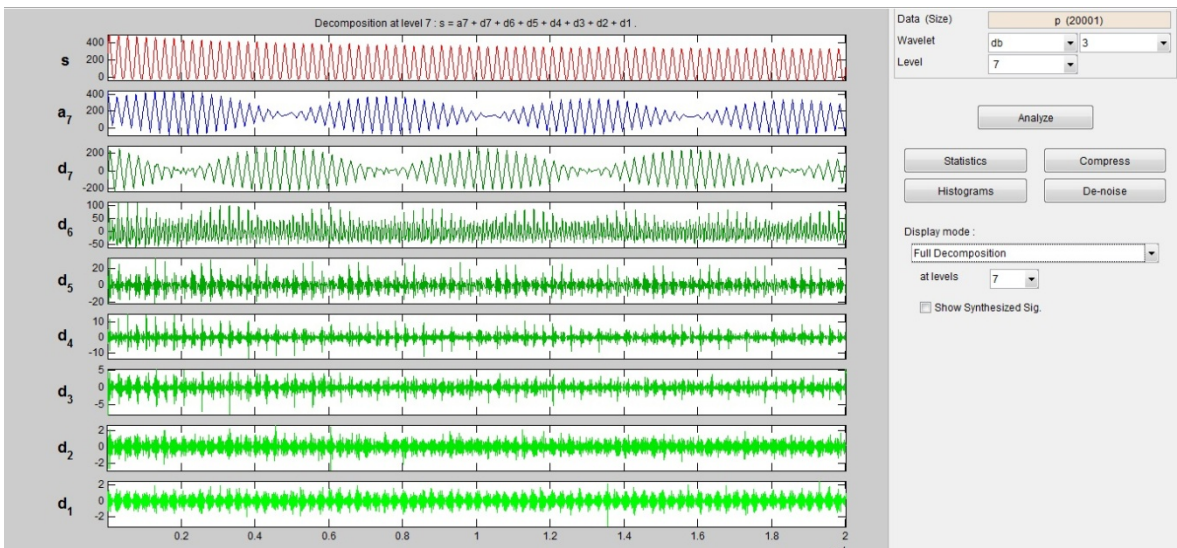


Figura 27. Transformada del muestreo #69 de la base de datos con 20000 puntos

Para la cuarta prueba se volvieron a usar los vectores completos de los muestreos, pero solo tomando el vector de corriente; debido a que, tal vez por magnitud, sea más identificable los cambios en las transformaciones. A continuación, algunos de los resultados:

Aire acondicionado:

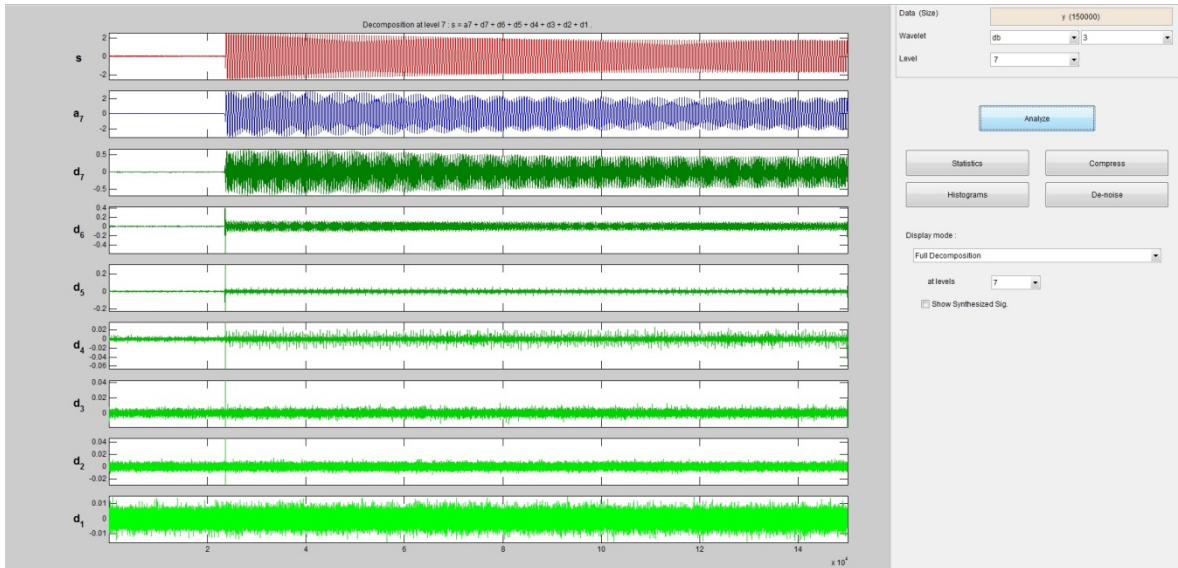


Figura 28. Transformada de la corriente del muestreo #15

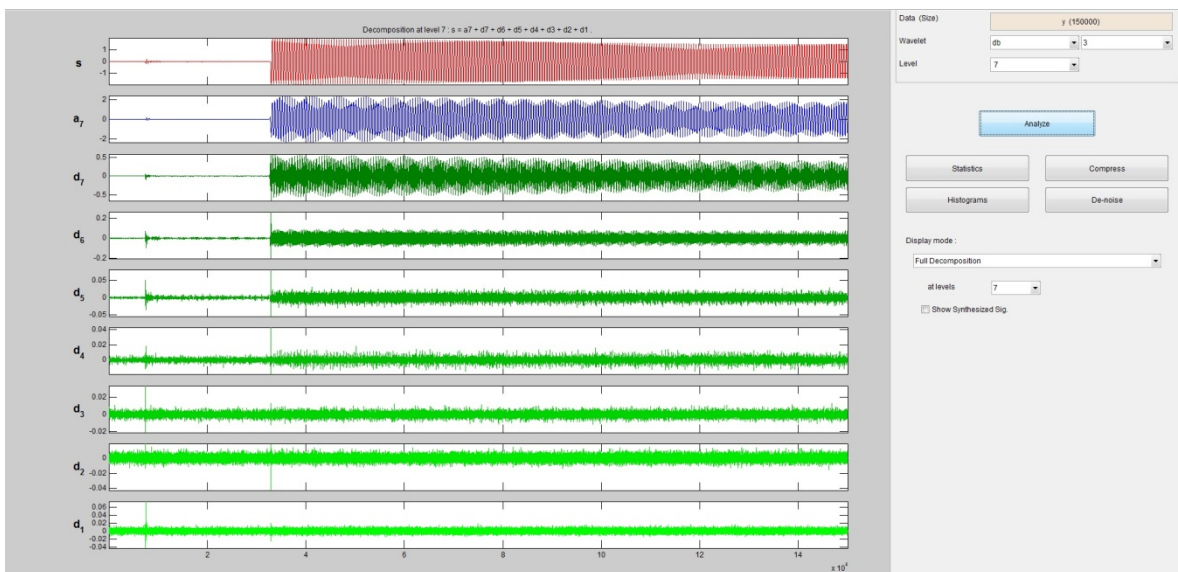


Figura 29. Transformada de la corriente del muestreo #40

Refrigerador:

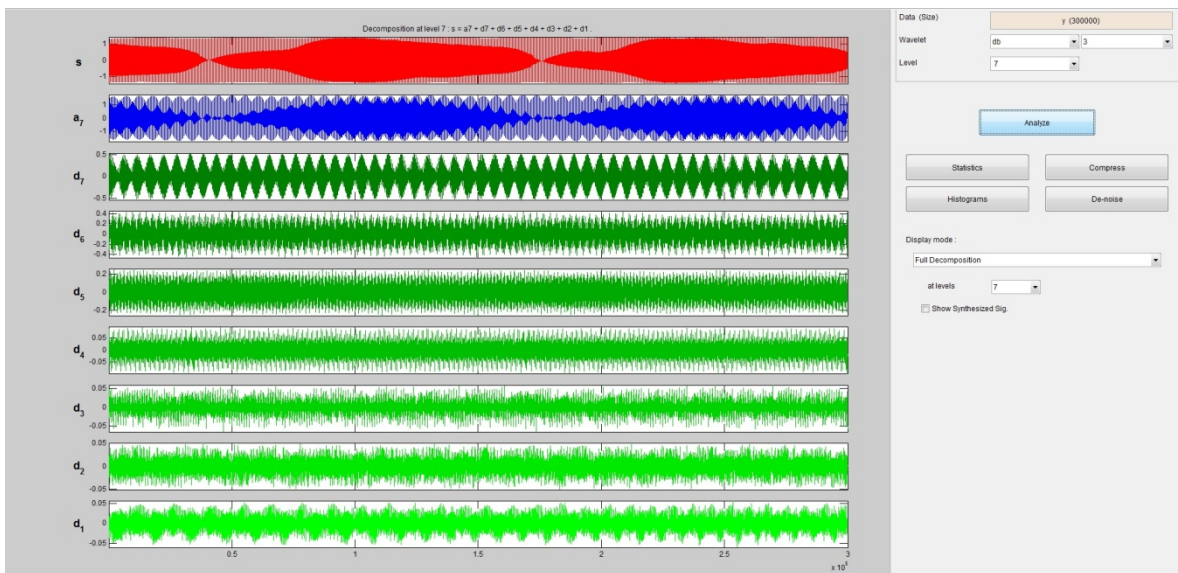


Figura 30. Transformada de la corriente del muestreo #6

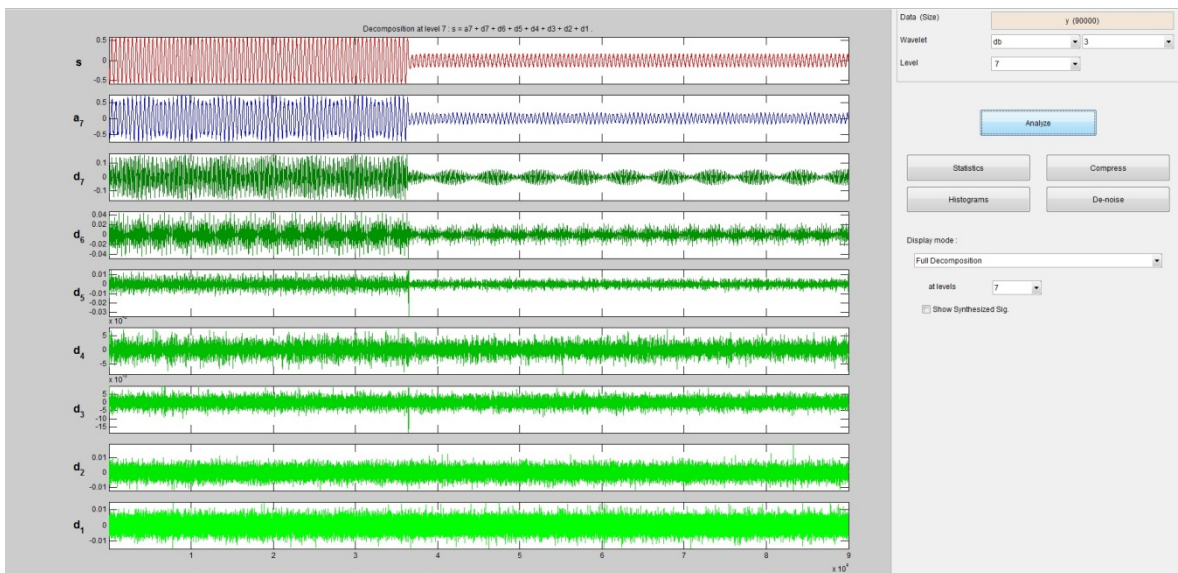


Figura 31. Transformada de la corriente del muestreo #62

Aunque en la propuesta de solución se indicaba el uso de Scilab como plataforma de software para la implementación de la transformada de ondoleta, en la práctica, se presentaron algunos problemas en la aplicación de sus cajas de herramientas (*toolboxes*), las cuales serían las utilizadas para el cálculo de la transformada de ondoleta. A continuación se detalla tal proceso.

Al iniciar el software de Scilab aparece lo mostrado en la figura 32, donde además se indica el botón para ejecutar la utilidad de caja de herramientas.

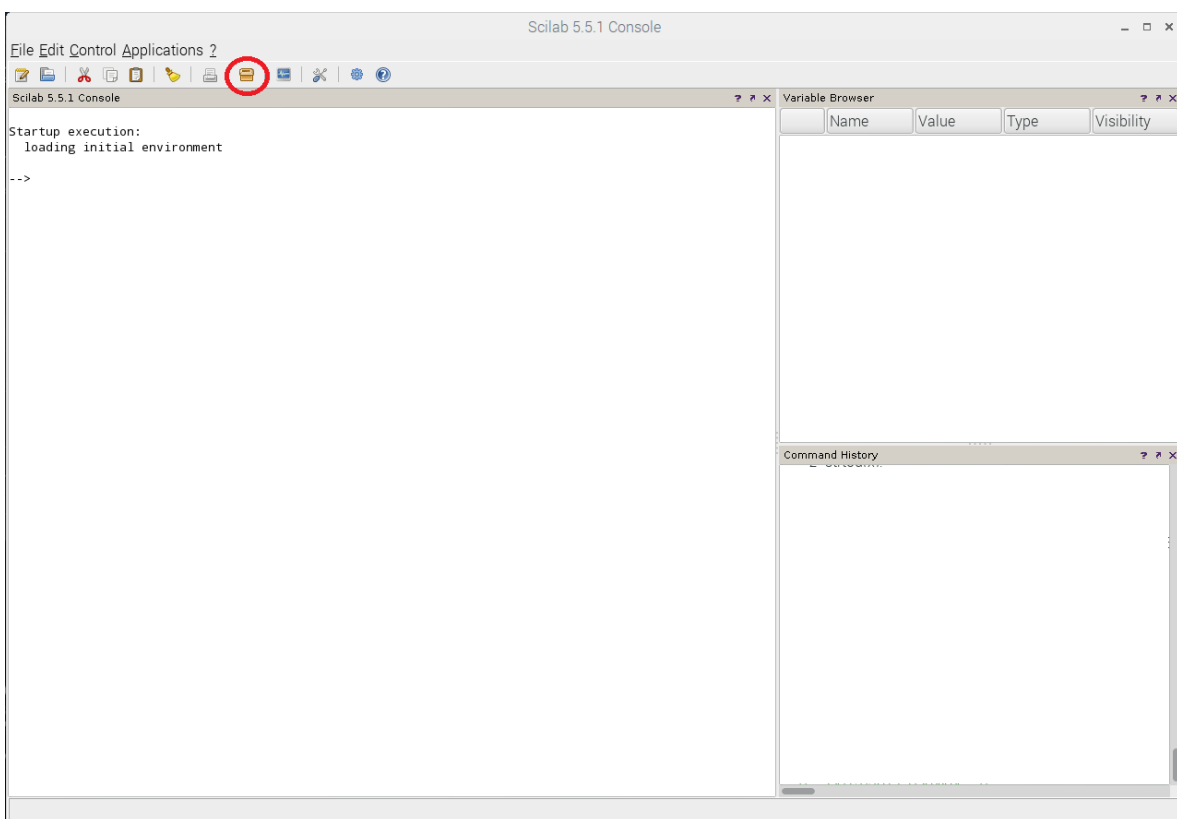


Figura 32. Botón de caja de herramientas de Scilab

Al presionar el botón mencionado se abre la utilidad de caja de herramientas siguiente:

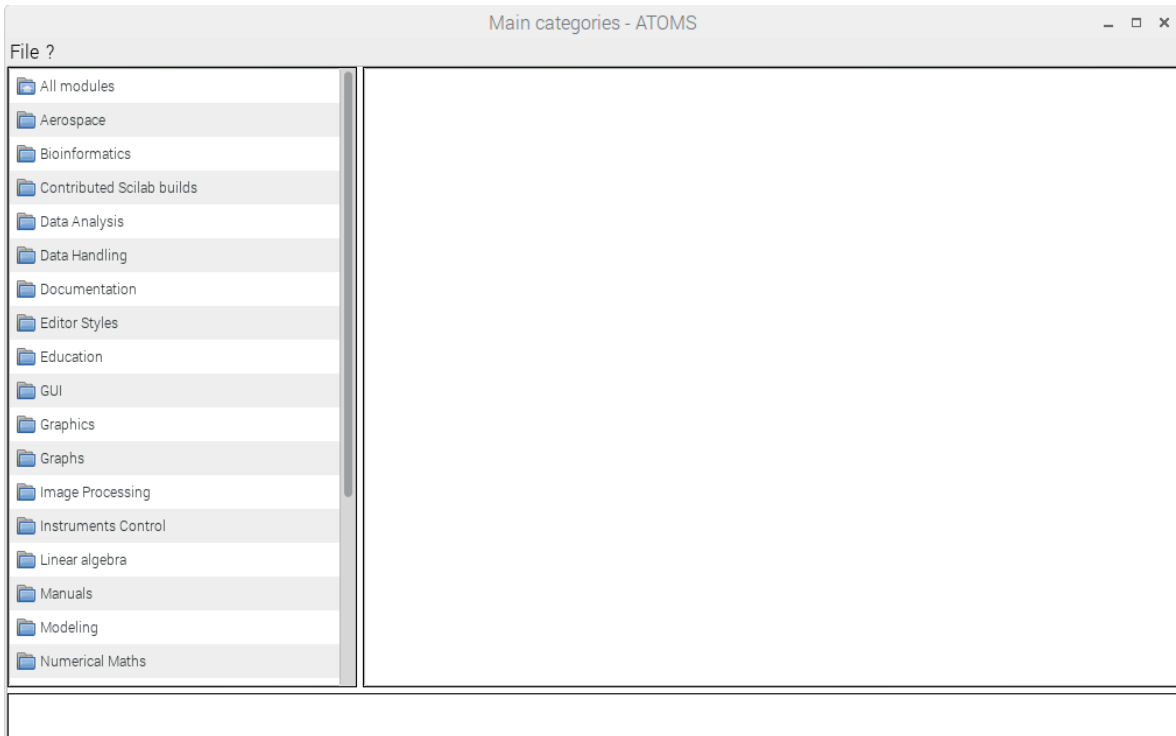


Figura 33. Utilidad de caja de herramientas

En donde, navegando por el menú de la izquierda, se llega a la siguiente herramienta:

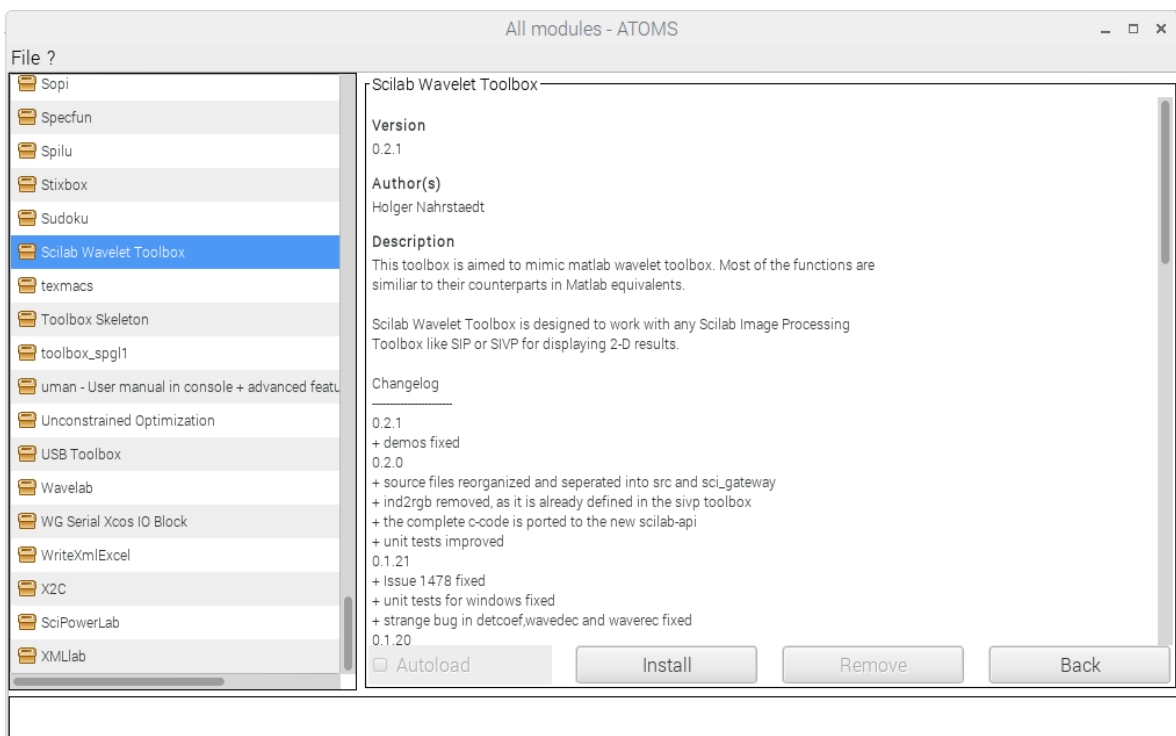


Figura 34. Caja de herramientas de ondoleta

En tal ventana, se presiona el botón de "Install" en la parte inferior media, procediendo a instalar tal caja y mostrar lo siguiente:

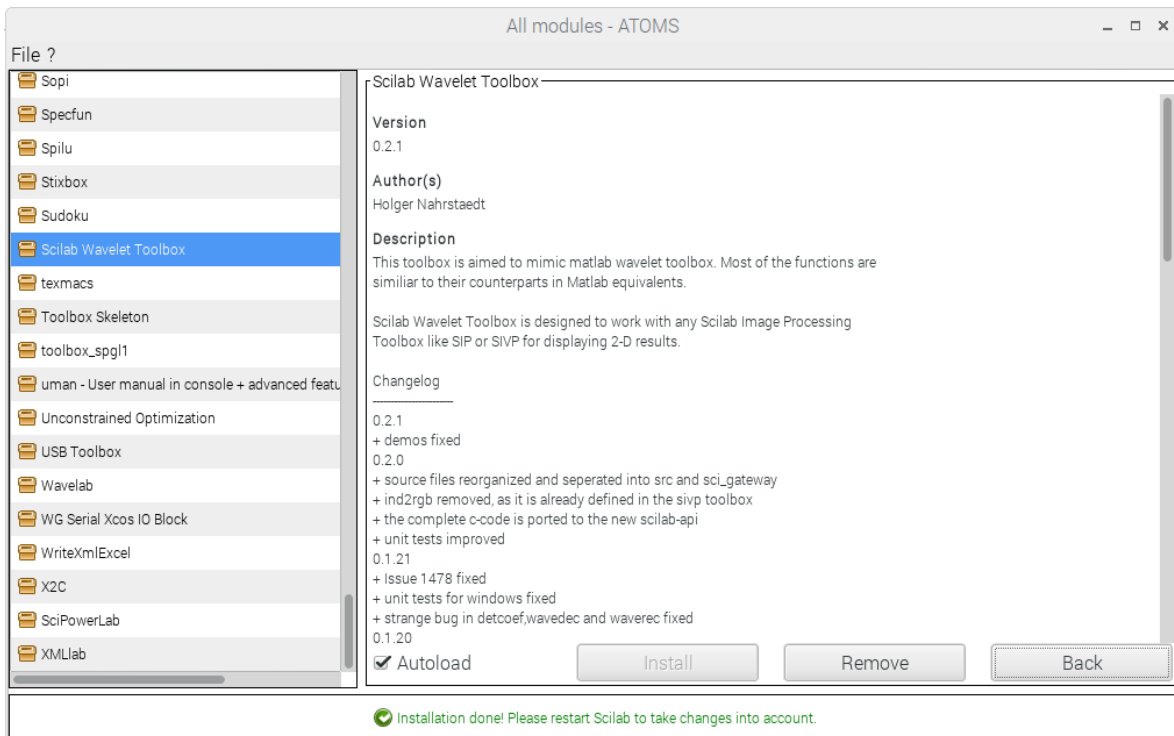


Figura 35. Caja de herramientas instalada

En donde se muestra en la parte inferior la instalación exitosa e instrucciones para reiniciar el software de Scilab para aplicar los cambios producidos. Al realizar el reinicio mencionado la pantalla de inicio muestra lo siguiente:

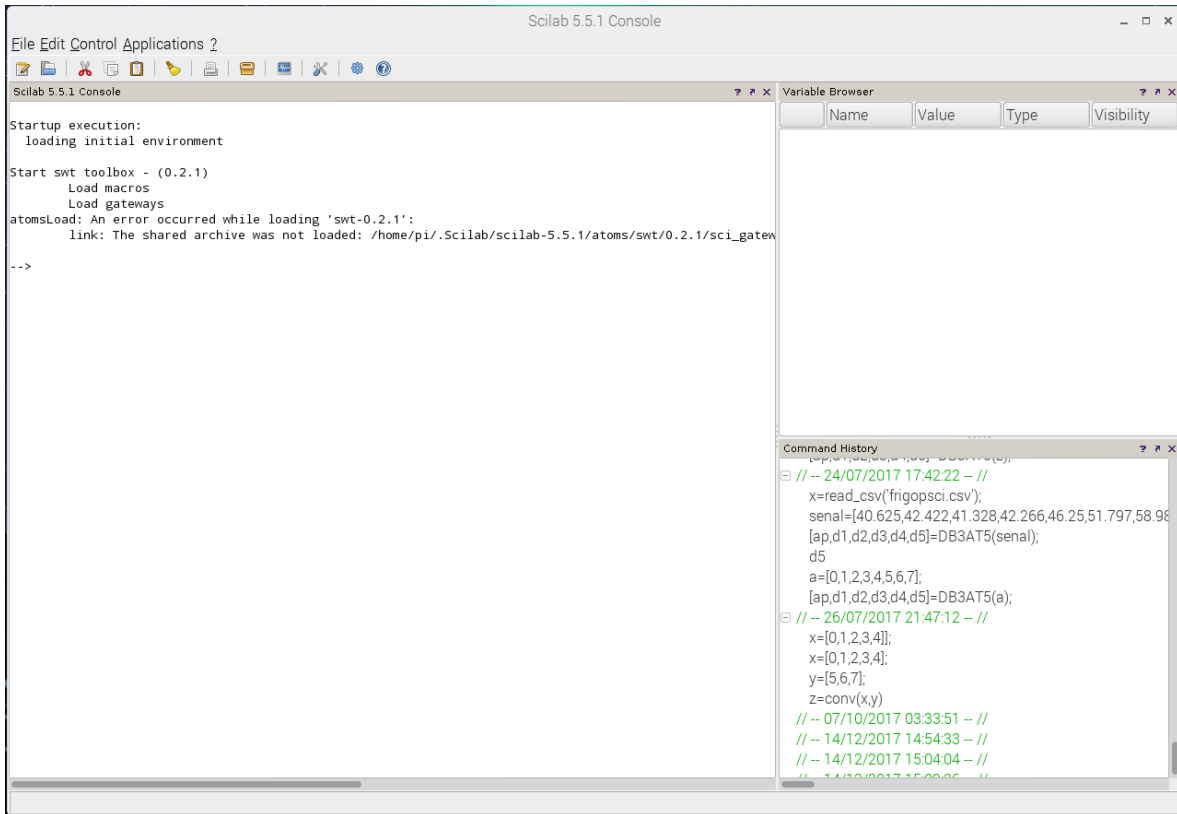


Figura 36. Scilab después de instalar la caja de herramientas

En la imagen se puede apreciar un error al momento de la carga de la caja de herramientas, el cual impide utilizar las utilidades de la caja en sí.

Por lo anterior, se optó por investigar el algoritmo de la transformada discreta de ondoleta, lo cual condujo a páginas web del INAOE [21], [22], con información referente a implementación por medio de aplicación de convolución discreta de los vectores de salida de los filtros pasa-altas y pasa-bajas, empleados para la síntesis de la transformada de ondoleta, junto con el vector de la señal de entrada, agregando el submuestreo ya conocido.

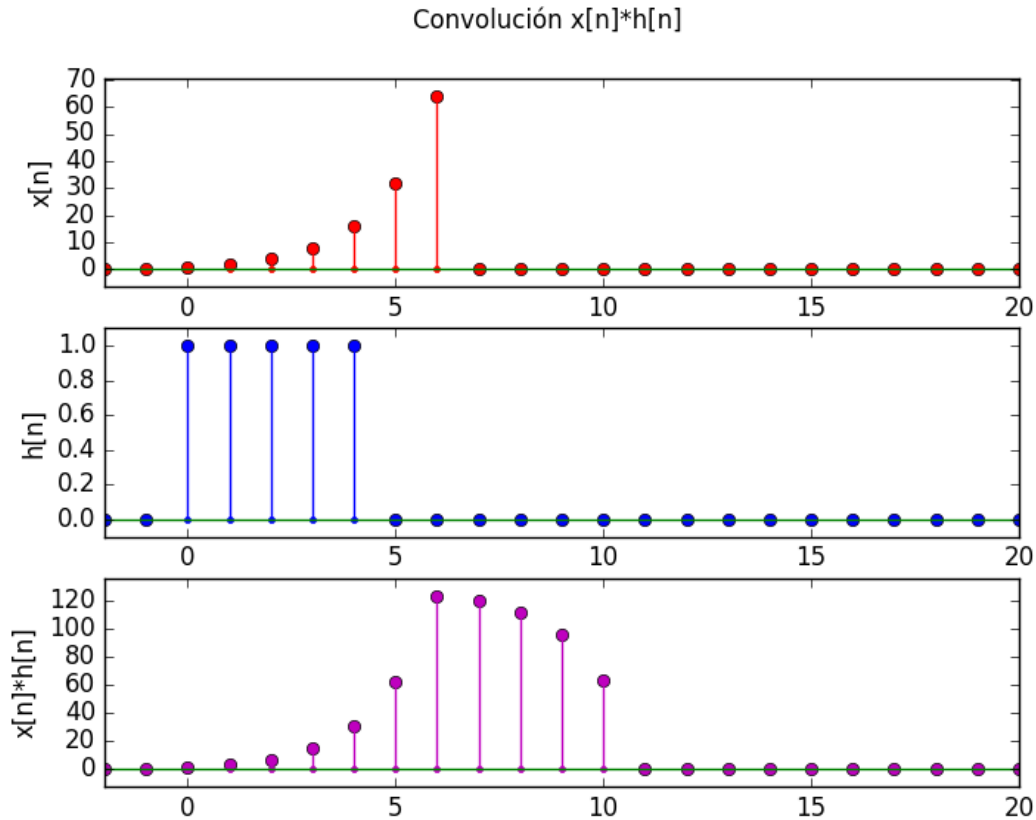


Figura 37. Ejemplo de convolución

Con esa información, y con el comando `wfilters` de MATLAB (el cual provee los filtros de cada ondoleta), fue muy sencillo realizar la transformación en la plataforma de scilab, debido a que cuenta con la operación de convolución integrada.

Para el caso de Daubechies 3, se realizó una prueba para verificar la similitud del método de MATLAB para la obtención de la transformada de ondoleta, con el propuesto para implementar en Python y ejecutarse en Raspberry Pi 3, con resultados prácticamente iguales, solo diferenciándose en los primeros 4 y los últimos 5 elementos del resultado, los cuales, al manejarse miles de datos, pueden despreciarse. Algunos de los resultados del equipo con índice 15 de la base de datos mencionada se muestran en la tabla 2 punto por punto:

Tabla 2. Comparación de algoritmos de MATlab y propuesto

Detalle 7			Detalle 8			Aproximacion 8			
Python	MATlab	Diferencia	Python	MATlab	Diferencia	Python	MATlab	Diferencia	
-0.07130081	-0.05573067	-0.01557013	-0.06569803	0.17730654	-0.24300458	0.00695673	39.14772036	-39.1407636	
-2.40980615	2.65908112	-5.06888727	-5.81399631	0.82775693	-6.64175324	0.57936096	38.15236364	-37.5730027	
11.0786974	5.64950937	5.42918806	-13.8480769	-21.9173914	8.06931447	-1.51025289	40.87330112	-42.383554	
-11.1890845	-9.53118838	-1.65789608	-14.7949193	-12.3870299	-2.40788935	5.50685421	28.24651364	-22.7396594	
13.6451584	13.6451584	9.9476E-14	-13.2437105	-13.2437105	0	34.5538713	34.55387131	9.9476E-14	
-4.51942051	-4.51942051	-2.0428E-14	-15.5016947	-15.5016947	-9.9476E-14	13.1170615	13.11706147	9.9476E-14	
6.21025311	6.21025311	2.0428E-14	-13.543229	-13.543229	0	27.7219496	27.72194963	1.0303E-13	
-6.11598085	-6.11598085	0	-13.59726	-13.59726	0	13.7623764	13.7623764	9.9476E-14	
4.88795889	4.88795889	1.954E-14	-10.9489374	-10.9489374	0	25.3057007	25.30570065	9.9476E-14	
-2.61938201	-2.61938201	-1.9984E-14	-11.4964	-11.4964	0	12.5014662	12.50146618	0	
1.73960605	1.73960605	9.992E-15	-9.46385658	-9.46385658	-1.954E-14	22.2395938	22.23959381	9.9476E-14	
-2.78882781	-2.78882781	0	-10.8928333	-10.8928333	0	12.2854225	12.28542254	1.0125E-13	
-2.25332756	-2.25332756	1.0214E-14	-5.44939167	-5.44939167	-2.0428E-14	22.9444783	22.94447835	1.0303E-13	
-0.20437265	-0.20437265	-8.0214E-15	-7.27305695	-7.27305695	-2.0428E-14	13.9495258	13.94952578	0	
-3.55597862	-3.55597862	0	-2.88896709	-2.88896709	-1.0214E-14	19.4372961	19.43729606	9.9476E-14	
2.71103986	2.71103986	0	-5.04715464	-5.04715464	-9.77E-15	13.3868313	13.38683134	0	
-6.00899882	-6.00899882	0	0.75397829	0.75397829	-5.9952E-15	20.7174155	20.7174155	0	
...									
-261.818436	-261.818436	0	1143.61082	1143.61082	0	2299.91673	2299.91673	1.0004E-11	
247.183076	247.183076	9.9476E-13	1241.0544	1241.0544	0	2313.60795	2313.60795	9.5497E-12	
-105.338218	-105.338218	0	1393.05251	1393.05251	0	2320.99833	2320.99833	1.0004E-11	
51.4745306	51.4745306	7.9581E-13	1480.11702	1480.11702	0	2281.87224	2281.87224	0	
42.4836542	42.4836542	9.9476E-14	1549.96243	1549.96243	0	2306.31105	2306.31105	1.0004E-11	
-142.872745	-142.872744	-6.556E-07	1515.18553	1515.18553	-2.309E-08	2315.02321	2315.02321	2.4497E-09	
210.565406	210.804642	-0.23923607	1533.88134	1534.65556	-0.77421487	2309.57624	2309.49426	0.08198115	
-333.038354	-309.232162	-23.8061918	1581.89656	1734.28429	-152.387728	2261.66026	2245.95154	15.7087116	
75.1124407	-261.245153	336.357593	-400.957637	-1134.13379	733.176148	2545.37833	2704.59933	-159.221001	
40.7507042	1024.2413	-983.490591	128.567348	-1626.02703	1754.59438	1214.16613	652.939229	561.226905	
ID 15:	Detalle 1	Detalle 2	Detalle 3	Detalle 4	Detalle 5	Detalle6	Detalle 7	Detalle 8	Aproximación 8
Error									
promedio:	0.001390%	0.002106%	0.001952%	0.002575%	0.007799%	0.014456%	0.068638%	0.204478%	0.047531%

A continuación se muestran los coeficientes de los filtros de descomposición pasa bajas y pasa altas de Daubechies 3:

```

PB=[ 0.0352262918821007
     -0.0854412738822415
     -0.135011020010391
     0.459877502119331
     0.806891509313339
     0.332670552950957],
PA=[ -0.332670552950957
     0.806891509313339
     -0.459877502119331
     -0.135011020010391
     0.0854412738822415
     0.0352262918821007]

```

Se investigó un nuevo algoritmo para ejecución de la transformada de ondoleta de Haar (con la intención de trasladarla a Daubechies), el cual consiste en utilizar vectores solo de tamaño 2^n , de donde se toman elementos por pares, y son sumados para el caso de las aproximaciones, y restados para los casos de los detalles, los resultantes son multiplicados por $1/\sqrt{2}$, y esos elementos son los utilizados para formar los nuevos vectores, incluido el submuestreo; y como en los casos anteriores, se utiliza el vector de aproximación para realizar los niveles siguientes. El problema con este proceso es que solo es para la implementación de la ondoleta Haar, y se buscó en la bibliografía alternativas para su implementación con Daubechies 3, pero la búsqueda requería de más tiempo, lo cual no es el objetivo de esta tesis, por lo que se decidió proceder con lo que ya se contaba.

Después, se buscó la forma de muestrear los datos con Scilab, pero se optó por hacerlo por medio de Python, debido a la documentación existente al respecto y a su ejecución ligera, dejando pendiente la comunicación entre ambas plataformas.

En convenio de colaboración con la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A. de C.V., se comentó que se utilizara el ADC MCP3008, el cual cuenta con tasas de muestro de hasta 200kM/s, y librerías muy intuitivas pasa su control a través de Python. Por esto y debido a la facilidad de implementación de la transformada en Scilab, y además, evitar la ejecución de dos plataformas a la vez, se optó por implementarla en Python. En esta plataforma, el único inconveniente fue la inexistente instrucción directa para la convolución (sin librería), para lo cual se optó por crear la propia (por medio de una función), la cual consiste en implementar en código, la tabulación para la convolución o su definición como tal:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n - k] \quad (34)$$

Tabla 3. Ejemplo convolución

n	-1	0	1	2	3	4	5
---	----	---	---	---	---	---	---

x[n]	1	2	3	4	0	0	0
h[n]	1	2	0	-1	0	0	0
-1	1*1	1*2	1*3	1*4	1*0	1*0	1*0
0		2*1	2*2	2*3	2*4	2*0	2*0
1			0*1	0*2	0*3	0*4	0*0
2				-1*1	-1*2	-1*3	-1*4
3					0*1	0*2	0*3
4						0*1	0*2
5							0*1
y[n]	y[-1]	y[0]	y[1]	y[2]	y[3]	y[4]	y[5]
	1	4	7	9	6	-3	-4

En código para Python la convolución (con submuestreo incluido) es el siguiente:

```
def subconvol(x,y):
    # "x" es la señal y "y" los filtros
    # adecuando los vectores
    r=len(y)-1
    t=len(x)+r
    # numero de ceros a agregar al principio y final del vector x
    # tamaño del vector final

    n=len(x)
    m=len(y)
    # tamaño del vector x
    # tamaño del vector y

    for i in range (0,r): # adecuando el vector x agregando ceros al principio y al final
        x.append(0)
        x.insert(0,0)

    #convolucion

    res=[]
    #inicializando el vector resultante

    #operaciones
    for i in range (0, t):
        if (t-i)%2==0: #solo para valores pares(submuestreo)
            cn=0 #inicializando el valor de cada iteracion
            if i<t:
                for j in range (0, m):
                    cn=cn+(x[t-j-i-1+r]*y[j]) #multiplicaciones acumuladas
                res.insert(0,cn) #agregando el resultado al principio del vector final

    for i in range (0,r): #regresando el vector x a su tamaño original
        del x[len(x)-1]
        del x[0]

    return res
```

El proceso de la transformada completa se muestra en la figura 38:

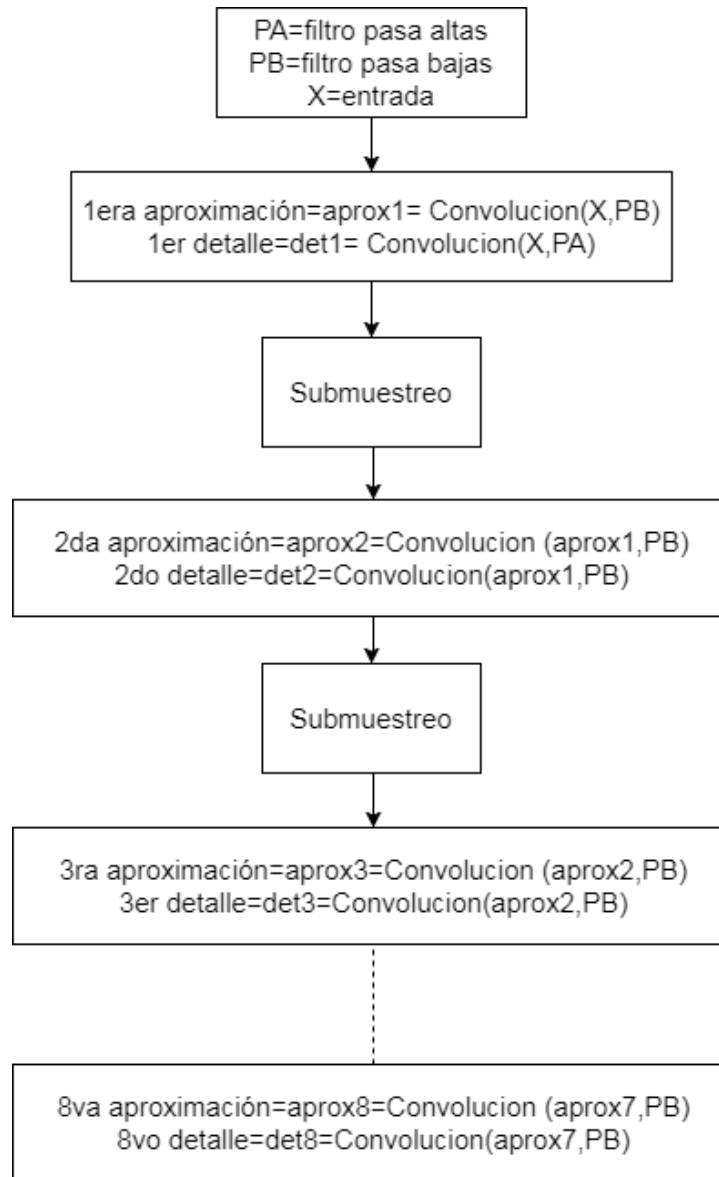


Figura 38. Diagrama de flujo de la transformada discreta de ondoleta

Se investigaron métodos complementarios a la transformada de ondoleta para la identificación de cargas, lo cual condujo a la medición de energía aplicando el teorema de Parseval[23]. El cual establece que la energía total de una función en el dominio del tiempo es igual a la suma de las energías de sus componentes espectrales y se define:

$$\frac{1}{N} \sum_t |f(t)|^2 = \frac{1}{N_J} \sum_k |a_J(k)|^2 + \sum_{J=1}^J \left(\frac{1}{N_J} \sum_k |d_J(k)|^2 \right) \quad (35)$$

En donde la parte a la izquierda de la igualdad representa la energía de la función en el dominio del tiempo, y la parte de la derecha sus componentes espectrales, en este caso, aproximación y detalle de la descomposición por transformada de ondoleta [23]. Se encontró, además, una función en MATLAB capaz de obtener los porcentajes de los niveles de energía llamada wenergy, la cual se usó como referencia para validar algoritmos desarrollados.

Se procedió a realizar la implementación de la medición de los porcentajes de los coeficientes de energía en Python, y se realizaron una serie de pruebas para verificar su similitud con el método de MATLAB y sus características para la identificación. En la siguiente tabla se muestra las pruebas realizadas a la mitad de los equipos de aire acondicionado:

Tabla 4. Resultados de porcentajes de coeficientes de energía para AC

PC											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	0.06466885	0.00061662	0.00032652	0.00020685	0.00048571	0.00424002	0.07907708	2.84982305	51.1695562	45.7781826	0.05281648
16	0.30606822	0.00063036	0.00033048	0.00021011	0.0004887	0.00409393	0.07345786	2.83605179	51.2636558	45.2054975	0.30951528
17	0.02782955	0.00071357	0.00040857	0.00026226	0.00057792	0.00360507	0.07878558	2.87039289	52.5871334	44.3834511	0.04684013
38	0.24594695	0.00115593	0.00063716	0.00035501	0.00049202	0.00425183	0.06973993	2.85384508	50.7695757	45.7991415	0.25485898
39	0.15329067	0.00104233	0.00059106	0.00032747	0.00054605	0.00391438	0.07482709	2.84063397	51.3767998	45.4017872	0.14624
40	0.36642061	0.00104419	0.00058866	0.0003332	0.00046066	0.00309625	0.07007029	2.8214054	51.8338768	44.5498489	0.35285506
83	0.99210582	2.16E-06	1.28E-05	0.00030008	0.00326101	0.01581987	0.15122417	3.00618149	49.1220566	46.6372156	0.07182049
84	0.23912342	2.46E-06	1.28E-05	0.00029335	0.00318392	0.01514478	0.14693671	3.03761939	51.9992335	44.471903	0.08654666
85	0.00354195	0.00083457	0.00039887	0.00024427	0.00103008	0.01424109	0.20814994	3.30285785	51.1797313	45.2858423	0.00312783
86	0.06837362	1.35E-05	1.96E-05	0.00029009	0.00355761	0.0281288	0.23386188	3.27464805	53.4334924	42.8033724	0.15424217

Raspberry											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	5.37103866	0.00083961	0.00123195	0.00192363	0.00593208	0.03534056	0.30039443	3.61436036	30.5639878	57.4441647	2.66078626
16	5.39902197	0.00102872	0.00185089	0.00211103	0.01136797	0.04031523	0.3020985	3.66916772	30.9213844	57.298513	2.35314056
17	5.34640714	0.00089373	0.00135233	0.00215674	0.0063967	0.03196947	0.29901755	3.60883487	30.8312322	56.2929405	3.57879881
38	5.39646349	0.00128213	0.00217506	0.00266607	0.01121646	0.04009083	0.29594319	3.67561839	30.7334874	57.6349943	2.2060626
39	5.37176482	0.00111576	0.00174264	0.00244127	0.00722789	0.03576615	0.29237897	3.61681786	30.6741296	57.2309436	2.76567135
40	5.40011771	0.00124959	0.00218094	0.00260318	0.01152521	0.03702922	0.29583515	3.66164339	31.1143803	56.9023598	2.57107555
83	5.34380328	7.60E-05	0.00027578	0.00233129	0.0154614	0.06795639	0.41766562	3.71048784	29.6591887	56.3394124	4.44334134
84	5.34701871	0.0007562	0.00182507	0.00253963	0.02015947	0.0787247	0.4063726	3.75196624	30.3497298	54.9006085	5.14029904
85	5.45084275	0.00099685	0.00140512	0.00214373	0.00907648	0.06540023	0.49904557	3.9544207	31.0472282	57.8262621	1.14317831
86	5.24066282	0.00015156	0.0003634	0.00223051	0.01566821	0.08791948	0.5062658	3.78851366	30.5153232	54.3222362	5.52066514

Al obtener resultados muy diferentes con respecto al valor de MATLAB, se procedió a aumentar el número de equipos, agregando aspiradoras, lámparas fluorescentes compactas, abanicos y lavadoras. En la tabla 5 se muestran los resultados para la mitad de los equipos de lámparas fluorescentes compactas:

Tabla 5. Resultados de porcentajes de coeficientes de energía para lámparas fluorescentes compactas

PC											
CFL	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	5.81363598	0.04192225	0.31140126	1.1468293	2.56152814	4.40064093	12.6575706	24.763504	26.7976305	21.2187966	0.28654041
2	0.07628252	1.02439166	5.95850168	3.79758299	7.8146258	4.33108066	11.5286297	21.7729482	25.3656577	18.2930745	0.03722462
3	0.02475532	0.18415967	0.98086915	2.18535807	2.83188661	4.97025417	12.4461856	24.6250694	28.7414985	22.9902651	0.01969843

4	0.04890837	1.25056778	1.16914842	8.87018744	3.38227522	6.95423235	11.5884097	20.8691513	27.6754997	18.0983947	0.09322498
5	0.15436159	1.61046915	0.6146488	3.17419679	7.03013799	4.3639524	12.0291581	22.1161124	28.0365177	20.8436034	0.02684159
18	2.32812479	2.82927458	8.18154303	16.2815685	2.89599467	7.02881927	10.4083635	15.5825761	19.3160118	15.0159249	0.13179893
19	0.11736601	3.66121162	18.3761684	3.11603517	3.49550794	8.36377775	10.5497081	17.2969271	18.6575436	16.2767788	0.08897558
20	2.89958985	4.19084493	1.55991247	2.41054032	4.4769384	6.82332246	12.8590427	20.377841	24.5766171	19.6547912	0.17055965
21	3.24216589	0.19693424	1.14260614	1.44166207	2.66551473	7.35314243	13.7222446	22.7757615	24.89707	22.3717575	0.19114094
22	0.13455948	9.77606846	5.45346333	3.33835983	7.92388296	6.43121257	11.4474175	17.4487667	20.5212403	17.4830713	0.04204851

Raspberry

CFL	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	5.86103872	0.00832747	0.04473264	0.17102594	0.51156744	1.33769035	4.5260717	12.6176214	25.7756964	44.4057099	4.74051803
2	5.85303084	0.0423621	0.20430756	0.32610274	0.93509173	1.3908116	4.52568618	12.3861898	26.3975613	43.7917372	4.14711885
3	5.91772801	0.01688605	0.07792989	0.23256463	0.52920104	1.40068173	4.42123857	12.3841407	26.4618276	46.3303937	2.22740817
4	5.74790718	0.04550576	0.0879873	0.48454637	0.59809884	1.71340854	4.41188433	11.7901984	26.8558473	42.5042861	5.76032985
5	5.82620211	0.05121598	0.06327324	0.28747615	0.85519619	1.34610722	4.44905269	11.995059	26.5317712	44.6940069	3.90063931
18	5.8226244	0.07950587	0.27031883	0.76209801	0.64489048	1.9992837	4.80889096	11.8184552	25.8799985	44.4030052	3.51082884
19	5.63447918	0.08517474	0.3815906	0.31416407	0.66513778	2.05529224	4.60445205	11.7376923	24.1057452	44.0587851	6.35724978
20	5.85048109	0.08576918	0.10471995	0.25992246	0.71063158	1.74901775	4.74729129	11.9831953	25.88982	45.047529	3.57159848
21	5.81516423	0.01773481	0.08535362	0.19162389	0.52114873	1.72610729	4.69310564	12.0976531	24.9383046	45.8785067	4.03529732
22	5.72612604	0.13734766	0.2051387	0.32089447	0.98824469	1.77871836	4.73354579	11.6406906	24.8776833	44.87338	4.71823032

Al considerar los resultados no satisfactorios, se procedió a utilizar los vectores de potencia, en lugar de solo los de corriente, intentando disminuir el margen de error. Los resultados de la mitad de los equipos de aire acondicionado se muestran a continuación:

Tabla 6. Resultados de AC para vectores de potencia sobre los porcentajes de coeficientes de energía

PC											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	65.1760993	0.00044078	0.00028153	0.00078834	0.00524753	0.04464922	1.05119434	17.6729578	15.8229025	0.07429307	0.15114569
16	65.5082893	0.00045159	0.00028368	0.00078875	0.00545794	0.04492337	1.04457997	17.807754	15.4171286	0.07388405	0.09645871
17	63.8635443	0.00063324	0.00044044	0.00120062	0.00767981	0.05474142	1.10475255	18.4612192	16.3145764	0.06794858	0.12326342
38	64.7968704	0.00151923	0.00084515	0.00059528	0.00246939	0.03348265	1.00613599	18.0563163	15.9696229	0.02587336	0.1062694
39	63.3130945	0.00135778	0.00120863	0.00138653	0.00700288	0.04472352	1.08927309	19.1211059	16.1037397	0.12458162	0.19252582
40	64.2126018	0.00081909	0.00052373	0.00043989	0.00242359	0.03278267	1.01913066	18.3528012	16.1296185	0.07512902	0.17372988
83	58.6699788	0.00147428	0.00094726	0.00170118	0.00818071	0.05491166	1.27077158	21.1860515	18.6470648	0.1286445	0.03027368
84	59.2476973	0.00137749	0.00090997	0.00172379	0.00827147	0.05363641	1.24094741	20.4974715	18.7570005	0.0815493	0.10941485
85	65.5020074	0.00151299	0.00085076	0.00125345	0.00633413	0.06037456	1.19783924	18.0300578	14.9788685	0.0992846	0.12161659
86	61.2183528	0.00113166	0.00075354	0.00151862	0.00904018	0.07098102	1.27559595	20.1902487	16.9624132	0.18420502	0.08575934

Raspberry											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	13.7611527	0.00181063	0.00289257	0.00967951	0.04994701	0.29120757	2.82379123	23.1015067	43.4798104	5.39562026	11.0825815
16	14.6680017	0.0026745	0.00535858	0.01064139	0.06254469	0.31916447	3.02357287	24.8475874	45.8840218	6.05521203	5.12122054
17	14.6228358	0.00230609	0.00384626	0.01269863	0.06421844	0.34270364	3.07688278	25.0931814	46.9172185	5.14676062	4.71734779
38	14.1441123	0.00385249	0.00656591	0.00896696	0.04551079	0.26579083	2.86220496	24.0992439	45.0018438	3.55779952	10.0041085
39	12.5467445	0.00290027	0.00547619	0.01170136	0.05261034	0.2658882	2.6193332	21.9112805	40.0216923	7.085081	15.4772922
40	13.7400967	0.00307029	0.00588381	0.00763395	0.04557374	0.25897392	2.79954594	23.6522983	44.0129713	5.12069228	10.3532597
83	13.5017458	0.003255	0.00521908	0.01397091	0.06124497	0.3169142	3.03727895	24.7268799	45.5506536	7.36828518	5.41455241
84	12.4881142	0.00325524	0.00676671	0.01502531	0.06863807	0.30025533	2.79652313	22.6456965	42.4135216	6.68725563	12.5749483
85	13.3563408	0.00325611	0.00489094	0.01183969	0.05324945	0.32853023	2.92315406	22.6413169	41.126239	4.86549392	14.6856888
86	12.9844618	0.00273441	0.00446312	0.01266533	0.06179516	0.34616493	2.93248775	23.2978355	42.597252	8.70648927	9.05365081

Al considerar la información regresada por las pruebas anteriores aún más errada, se encontró un método para la implementación del teorema de Parseval similar, con la diferencia de que utilizaba los valores totales de sus energías (no sus porcentajes como anteriormente) [24], y se recortaron los vectores de entrada a lo que se consideró eran solo los arranques de los equipos, variando el número de muestras de equipo a equipo. Los resultados se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Pruebas de energía total

AC	Energía total	Refrigerador	Energía total	Aspiradora	Energía total	CFL	Energía total	Abanico	Energía total	Lavadora	Energía total
15	9785254.39	6	4143859.81	52	487528048.09	1	422408.50	64	282749.46	80	61034.12
16	9729984.55	23	2769455.38	53	520124489.38	2	605033.06	65	276003.82	185	965854495.22
17	7245335.27	46	36967288.17	54	535763529.38	3	637595.18	66	277740.30	186	600390309.10
38	6187135.11	69	7699815.44	55	559156478.63	4	877275.40	67	280006.16	187	662462200.01
39	5695261.21	105	205102416.81	56	505887308.06	5	681679.17	68	258840.78	188	3775908916.15
40	6064546.69	106	179134333.03	697	481200252.72	18	137571.93	100	56040.87	189	500597184.05
83	3322727638.28	107	219264274.61	698	473227337.16	19	129858.07	101	57448.10	488	778558872.94
84	2720588530.01	129	175850054.13	699	499759614.72	20	79595.46	102	55857.77	489	498203468.76
85	16545662.95	195	1565346.91	726	18421199.99	21	72069.30	103	54305.06	490	521577339.90
86	504897110.67	196	444541370.54	727	18661466.37	22	110630.82	104	55973.43	491	476269794.11
87	3069443966.19	197	3576996632.75	728	16716550.54	41	111782.33	124	349540.95	492	528049983.18
160	4350151.50	198	839587.64	729	14337679.58	42	71858.85	125	345483.28	531	1047202.86
161	4035880.07	199	376200188.02	730	13528540.49	43	69793.78	126	301073.15	532	780615.65
162	3897537.79	333	188022244.05	810	10937987.26	44	70652.28	127	291879.03	533	968266.08
163	3910697.95	334	513006.38	811	11076712.63	45	86151.14	128	327498.09	534	953193.66
164	4010204.29	459	1043075.43	812	10047046.26	62	144669.40	170	2262698.24	535	1017173.98
288	1235536902.69	460	116131032.93	813	11324380.31	63	175336.68	171	2145508.73	620	65032368.35
289	4067477991.25	461	233810857.5	814	11526341.16	81	180080.37	172	2151178.76	621	92250151.93
290	1404309165.65	462	720658.1685	840	460762378.90	82	256905.14	173	2023749.43	622	86471783.75
291	3576996632.75	528	15838084.92	841	432624834.34	88	102936.32	174	1940346.32	623	94358119.97

Al considerar inconclusa la información que regresaron las pruebas, se procedió a recortar los vectores a longitudes estandarizadas de medio, y un segundo; predominando el análisis en medio segundo, además, se eliminaron equipos con inconsistencias en su arranque, y se utilizaron los valores de energía total de cada nivel. Los resultados de la mitad de los equipos de aire acondicionado se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados de valores de energía con recorte de vectores estandarizados a medio segundo

AC	Total	A8	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
15	11559749.34	8169479.828	0.381279883	0.950426979	3.796876574	53.20490719	832.9363428	36197.07654	1176576.243	2176604.922
100.0000%	70.6718%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0005%	0.0072%	0.3131%	10.1782%	18.8292%
16	10981310.91	7761159.666	2.465823291	12.87672745	22.83042627	280.9666596	896.956981	37851.61144	1183211.767	1997871.771
100.0000%	70.6761%	0.0000%	0.0001%	0.0002%	0.0002%	0.0026%	0.0082%	0.3447%	10.7748%	18.1934%
17	10927884.16	7630861.237	0.500662736	0.936849485	5.576875725	69.62518994	896.1034024	36775.03002	1228758.627	2030516.519
100.0000%	69.8293%	0.0000%	0.0000%	0.0001%	0.0001%	0.0006%	0.0082%	0.3365%	11.2443%	18.5811%
38	7202454.071	5068962.341	1.352788964	4.265037373	5.418590755	65.24693185	584.2947332	22008.56887	716617.4134	1394205.17
100.0000%	70.3783%	0.0000%	0.0001%	0.0001%	0.0001%	0.0009%	0.0081%	0.3056%	9.9496%	19.3574%
39	9103975.763	6401263.94	1.376791484	6.937053661	17.87600398	151.8420166	1254.201677	31791.90835	1035534.033	1633953.649
100.0000%	70.3128%	0.0000%	0.0001%	0.0002%	0.0017%	0.0138%	0.3492%	11.3745%	17.9477%	17.9477%
40	6748959.079	4735713.011	1.427316939	6.627227357	10.12474543	127.4255591	384.5079726	22917.67578	739348.2958	1250449.984
100.0000%	70.1695%	0.0000%	0.0001%	0.0002%	0.0019%	0.0057%	0.0396%	0.3396%	10.9550%	18.5280%
83	3322734215	2216578510	445.301521	580.5326588	2229.03697	21115.44868	277238.3314	13007805.26	425374822.5	667471468.5
100.0000%	66.7095%	0.0000%	0.0000%	0.0001%	0.0006%	0.0083%	0.3915%	12.8020%	20.0880%	20.0880%
84	3008414696	2005193468	706.3831568	2229.26485	4078.604207	46476.88586	301161.2713	11209530.33	361300075	630356969.8
100.0000%	66.6528%	0.0000%	0.0001%	0.0001%	0.0015%	0.0100%	0.3726%	12.0096%	20.9531%	20.9531%
85	23121056.97	16661354.01	2.383659925	3.528789138	10.00221182	99.37072748	2099.245281	75539.25964	2413956.463	3967992.703
100.0000%	72.0614%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0004%	0.0091%	0.3267%	10.4405%	17.1618%	17.1618%
86	2477998032	1675993130	308.1279152	420.6981049	1481.349058	15228.94573	207856.596	9226070.822	338765419.7	453788116.6
100.0000%	67.6350%	0.0000%	0.0000%	0.0001%	0.0006%	0.0084%	0.3723%	13.6709%	18.3127%	18.3127%

Para la clasificación de las cargas a partir de los resultados obtenidos con la transformada de ondoleta y el teorema de Parseval, se investigó sobre un árbol de regresión y clasificación, en el cual son utilizados dos conjuntos de datos, uno para entrenamiento (generación del árbol de decisión), y otro para prueba del árbol. Los datos utilizados para el entrenamiento, son ordenados por magnitud ascendente, y son generadas clases para cada tipo de equipo a

identificar. Para la elección del mejor punto de inicio del árbol, se miden las impurezas de los nodos, usando el índice de Gini; el cual se define como [18]:

$$Gini(\sigma) = 1 - \sum_{c=0}^{C-1} [f(c|\sigma)]^2 \quad (36)$$

Donde

C es el número de clases, y

$f(c|\sigma)$ es la probabilidad de que σ pertenezca a la clase C.

Y su promedio ponderado definido como:

$$Gini_{WA}(\sigma) = \frac{\Sigma_1}{N} \cdot Gini(\sigma)_a + \frac{\Sigma_2}{N} \cdot Gini(\sigma)_b \quad (37)$$

Donde

Σ_1 es el número de equipos con energía total menor al punto medio,

Σ_2 es el número de equipos con energía total mayor o igual al punto medio,

N es el número total de equipos,

$Gini(\sigma)_a$ es el índice de Gini para equipos con energía total menor al punto medio, y

$Gini(\sigma)_b$ es el índice de Gini para equipos con energía total mayor o igual al punto medio.

Tabla 9. Ejemplo de proceso para determinar el mejor punto de inicio de un árbol de decisión para 2 clases

Unsorted $E_{cd_i^u}$	Sorted $E_{cd_i^s}$	Mid-points $E_{cd_i^m}$	<	>=	Class	$Gini_{WA}$
72.32897	1.699156		0	10	1	
		1.822509	1	9	0	0.4736842
66.6607	1.945862		0	10	1	
		2.942305	2	8	0	0.4444444
71.51052	3.938748		0	10	1	
		26.41272	3	7	0	0.4117647
65.4793	48.88669		1	9	1	
		48.91834	3	7	0	0.4687500
52.00356	48.9500		2	8	1	
		50.47678	3	7	0	0.4933333
48.9500	52.00356		3	7	1	
		52.15919	3	7	0	0.5000000
52.31481	52.31481		4	6	1	
		58.89706	3	7	0	0.4945054
48.88669	65.4793		5	5	1	
		66.07	3	7	0	0.4791666
76.30978	66.6607		6	4	1	
		68.95901	3	7	0	0.4545454
71.25733	71.25733		7	3	1	
		71.38392	3	7	0	0.4200000
1.699156	71.51052		8	2	1	
		71.91974	3	7	0	0.3737373
194.2219	72.32897		9	1	1	
		74.31937	3	7	0	0.3125000
3.938748	76.30978		10	0	1	
		92.03386	3	7	0	0.2307692
208.3523	107.7579		10	0	1	
		109.2911	4	6	0	0.2857142
107.7579	110.8242		10	0	1	
		120.0285	5	5	0	0.3333333
345.8766	129.2328		10	6	1	
		161.7273	0	4	0	0.3750000
110.8242	194.2219		10	0	1	
		201.2871	7	3	0	0.4117647
360.5411	208.3523		10	0	1	
		277.1144	8	2	0	0.4444444
1.945862	345.8766		10	0	1	
		353.2088	9	1	0	0.4736842
129.2328	360.5411					

En la columna de la izquierda se muestran los datos sin ordenar, en la siguiente, los datos ordenados por magnitud, en la siguiente, los puntos medios de los datos ordenados, en las cuarta y quinta columna, se muestran los equipos restantes de lo clases de la sexta columna; y en la última columna, se muestran los promedios ponderados de los puntos medios, de los cuales se usa el de menor valor para la decisión del punto medio de inicio del árbol como se muestra en la figura 39.

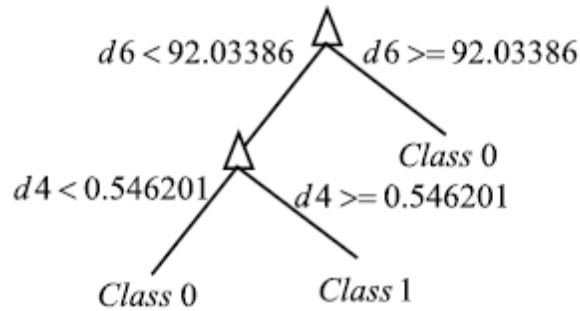


Figura 39. Ejemplo de árbol de decisión de la tabla 9

En términos generales el proceso quedó como sigue:

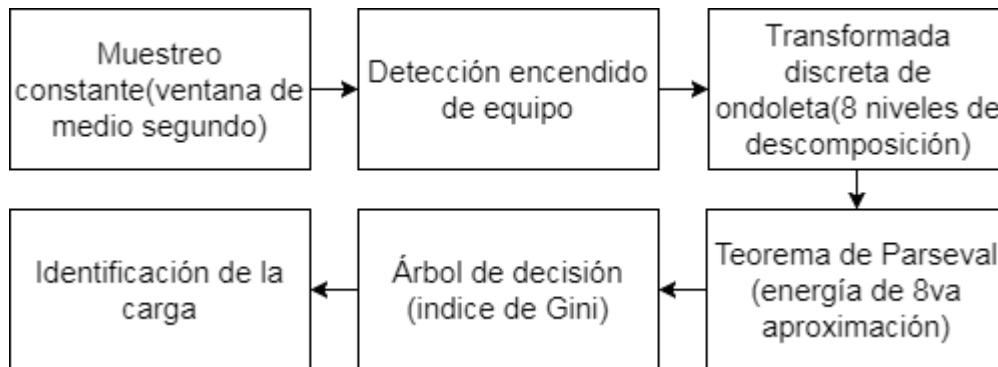


Figura 40. Diagrama de flujo del proceso completo

Como se mostró en capítulos anteriores, el prototipo se consideraría con el siguiente diseño:

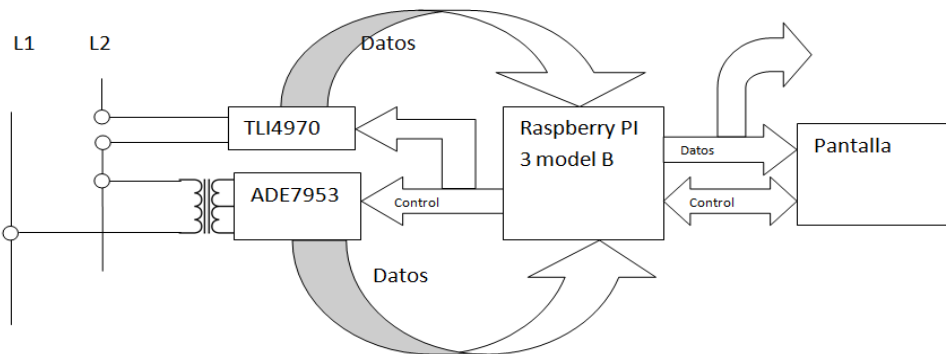


Figura 41. Diagrama a bloques del sistema

Pero debido a la modificación mencionada anteriormente respecto al ADC MPC3008, las cuales fueron resultado convenio de colaboración con la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A. de C.V., el diagrama a utilizar es:

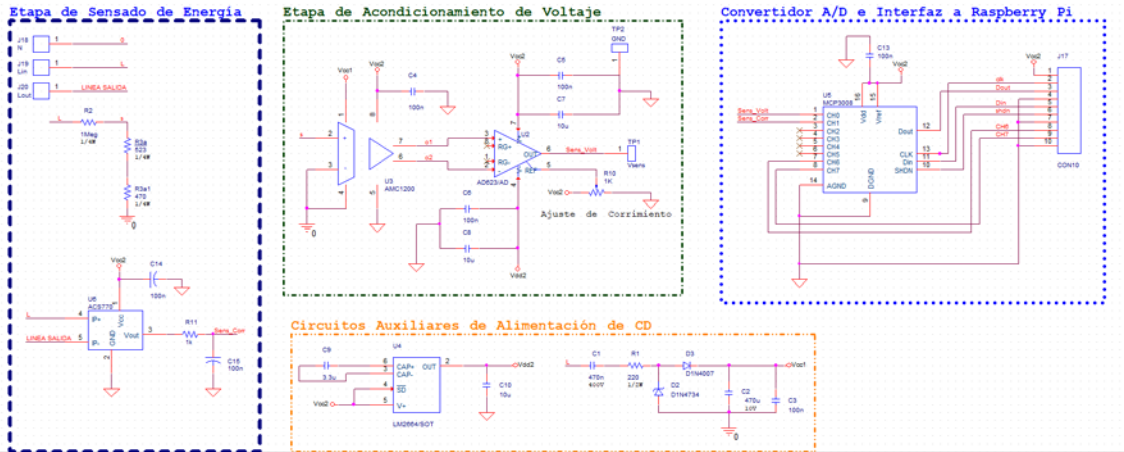


Figura 42. Diagrama eléctrico actualizado

Este trabajo tendrá continuación al terminar este proyecto de investigación de maestría con la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A. de C.V.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentaran las pruebas realizadas por medio de PC y Raspberry Pi 3 para obtener el algoritmo de detección de cargas por medio de ondoletas. Las primeras pruebas se realizaron con diferentes frecuencias de muestreo para la recolección de datos de voltaje y corriente de los equipos a identificar; en las siguientes pruebas también se utilizó una base de datos, la cual contenía, voltaje y corriente de diversos equipos con frecuencia de muestreo de 30KM/s; incluye, además, pruebas con el teorema de Parseval e índice de Gini.

4.2 Protocolo de experimentación y análisis de resultados.

El prototipo incluye el uso del software Python (antes era Scilab) en la plataforma Raspberry Pi, en el cual se desarrolló un algoritmo para la ejecución de la transformada de ondoleta. Aunque debido a la facilidad de uso de la PC y de la graficación de los resultados, se optó por hacer las primeras pruebas para la detección de las cargas en esta plataforma, para después extrapolarse al prototipo.

1.- Validación de algoritmo de transformada de ondoleta por convolución.

- Definición de ondoleta madre para implementación.

Con base en una serie de pruebas visuales realizadas y apoyado en bibliografía [18], la ondoleta madre utilizada para la implementación fue Daubechies 3(db3).

- Obtención de datos experimentales a diferentes frecuencias de muestreo.

Al frigorífico que se encuentra físicamente en el Laboratorio de Electrónica Industrial, se le muestrearon voltaje y corriente con osciloscopio. Tales muestras fueron tomadas a 2.5, 5, 10, 25, 50, 100 y 250 kM/s por 40 segundos, y posteriormente multiplicadas punto por punto para generar un vector de potencia.

- Análisis de Matlab de datos experimentales

Con los datos anteriores, se realizó la primera prueba, aplicándole la transformada de ondoleta discreta con la ondoleta madre Daubechies 3, por medio de la caja de herramientas (toolbox) de ondoletas de MATLAB.

A la prueba anterior se le realizó una modificación al muestreo de 25 kM/s, donde los valores (voltaje y corriente) fueron multiplicados en el mismo osciloscopio, debido a que al hacerlo en MATLAB, la señal se mostraba en ambos lados del eje de tiempo.

- Obtención de datos de consumo de una base de datos para aplicaciones de detección de firmas de consumo.

La segunda prueba se realizó con la base de datos mencionada en el capítulo anterior, la cual contiene más de 1000 muestreos a 30 kM/s de 11 tipos de equipos, como: calentador eléctrico, lavadora, abanico, foco, aspiradora, laptop, microondas, secadora de cabello, lámpara fluorescente, aire acondicionado y refrigerador; realizándose con 15 equipos de cada tipo, generando también sus vectores de potencia a partir de los valores de voltaje y corriente.

La tercera prueba se realizó solo con las cargas de aires acondicionados y refrigeradores, pero con los vectores recortados a 20,000 muestras para una mejor apreciación.

Para la cuarta prueba se utilizaron de nuevo los vectores completos de los muestreos, aunque solo el vector de corriente; para verificar si con esta variable fuese más simple la identificación de los cambios en las transformaciones.

- Análisis de los datos de la base de datos con MatLab y Python, con diferentes niveles de descomposición.

Con la implementación de la transformada de ondoleta en el Raspberry Pi por medio de una convolución digital de la entrada contra los filtros pasa bajas y pasa altas, se realizaron pruebas (5) en 30 (5 de cada tipo) equipos para verificar su similitud con el método realizado por MATlab, utilizando la ondoleta madre de Daubechies 3.

2.- Validación de algoritmo para implementación de Teorema de Parseval.

- Obtención de valores de energía normalizados (porcentajes) de los vectores de corriente

Con el fin de comprobar la validez del primer método propuesto para la obtención de los niveles de energía por medio del teorema de Parseval, mencionado en el capítulo anterior, y en búsqueda de patrones en magnitud, se realizaron una serie de pruebas (6) sobre la corriente de los equipos de aires acondicionados y refrigeradores.

Para la siguiente prueba (7), se aumentó el número de equipos de la prueba anterior, agregando aspiradoras, lámparas fluorescentes compactas, abanicos y lavadoras.

- Obtención de valores de energía normalizados (porcentajes) de los vectores de potencia

Para esta prueba (8), se reemplazaron los vectores de corriente por los de potencia, permaneciendo los demás parámetros de la prueba anterior.

- Obtención de valores de energía (crudos) de arranque de los equipos (vector de potencia)

Para la prueba siguiente (9), fue encontrado otro método para la implementación del Teorema de Parseval, el cual utiliza los valores totales de energía (no porcentajes), además, los vectores fueron recortados a solo sus arranques.

En la siguiente prueba (10), el recorte de los vectores se estandarizó a medio y un segundo, mostrando más ventajas el de medio segundo, como menor tiempo de procesamiento y mayor magnitud en la mayoría de los niveles de detalle; y se utilizaron los valores de energía por nivel de descomposición.

- Análisis comparativo de resultados

En esta prueba (11), fueron graficados los porcentajes de los niveles de energía de todos los equipos analizados de la base de datos; también los niveles totales de energía de tales equipos. Con estos resultados, también se realizó una gráfica del nivel D7 (12) de todos los equipos.

3.- Construcción de árbol de regresión y clasificación para identificación de cargas eléctricas

Con anterioridad se creó un árbol con todos los equipos utilizados hasta el momento, consistiendo en 20 equipos por cada tipo de carga (Aire acondicionado, aspiradora, lámpara fluorescente compacta, abanico, lavadora y refrigerador), utilizando sus magnitudes de energía totales, y eliminando después las lámparas fluorescentes compactas (por lo comentado con D6); pero tal prueba mostró muy bajo porcentaje de aciertos, por lo cual se prosiguió a generar un nuevo árbol.

Siguiente, se construyó un árbol (13) con las mismas herramientas que en el anterior, pero utilizando el valor de energía del nivel aproximación 8 (A8),

eliminando algunos casos particulares (debido a la falta de información con respecto a los equipos de la base de datos); utilizando 8 aires acondicionados, 10 aspiradoras, 10 abanicos, 6 lavadoras y 8 refrigeradores.

- Construcción de tabla de energía ordenada de forma ascendente
- Cálculo de índices Gini de promedio ponderado
- Identificación del punto de mejor ruptura (entrada al árbol)
- Construcción del árbol.

4.- Validación del árbol de regresión y clasificación

El último árbol, fue probado con 9 aires acondicionados, 10 aspiradoras, 10 abanicos, 7 lavadoras y 9 refrigeradores; quedando un árbol más pequeño y balanceado con respecto al anterior.

- Pruebas de clasificación
- Análisis de resultados

4.3 Resultados experimentales.

Primera prueba:

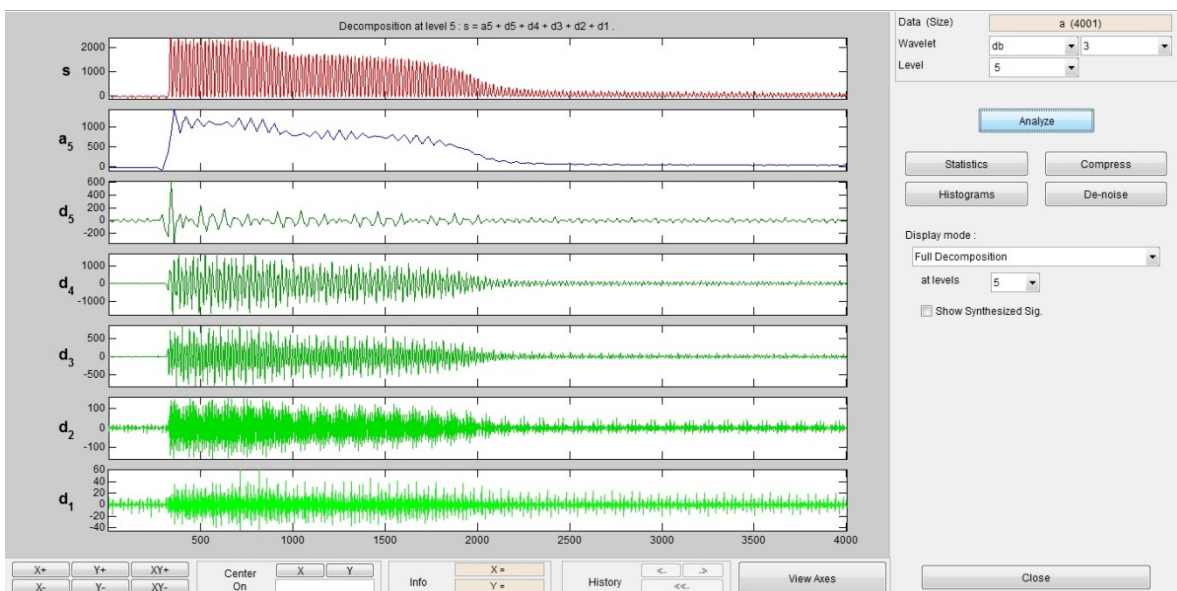


Figura 43. Muestreo y transformación a 2.5kM/s

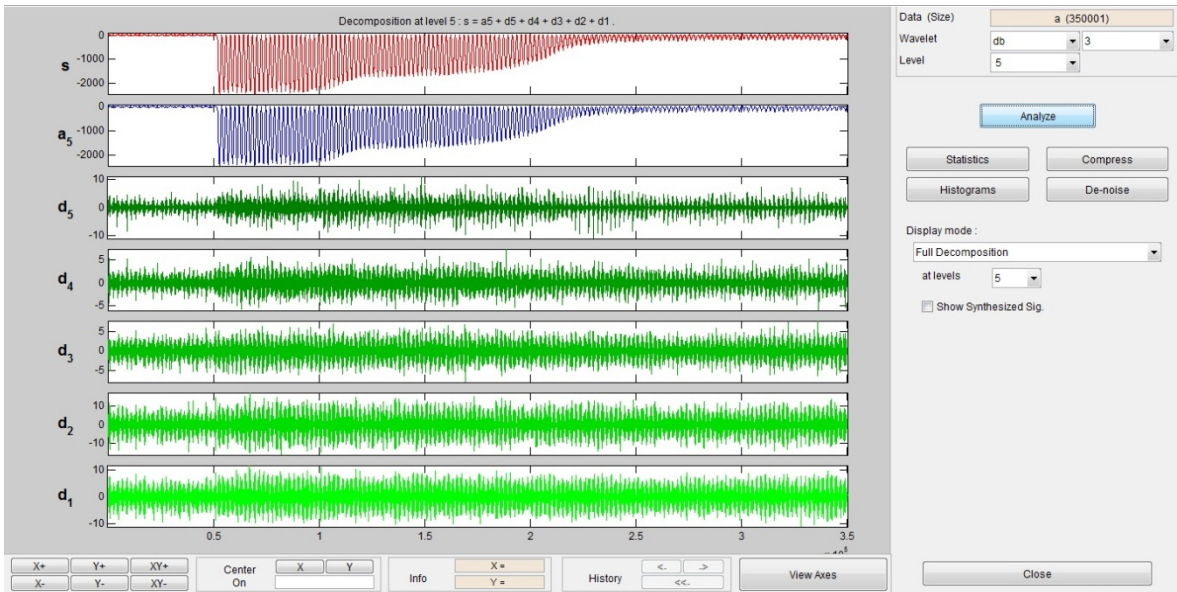


Figura 44. Muestreo y transformación a 250kM/s

Posteriormente se modificó el muestreo a 25 kM/s, realizando el producto de las variables(voltaje y corriente) directamente en el osciloscopio, debido a un comportamiento como corriente (en ambos lados del eje horizontal), quedando del siguiente modo:

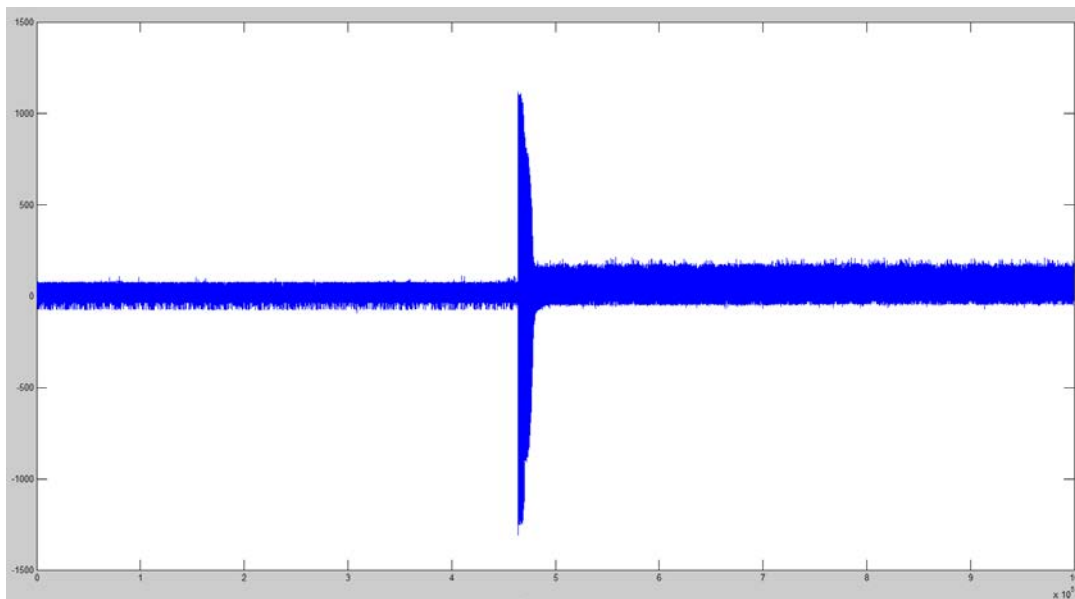


Figura 45. Potencia con operación en MATLAB

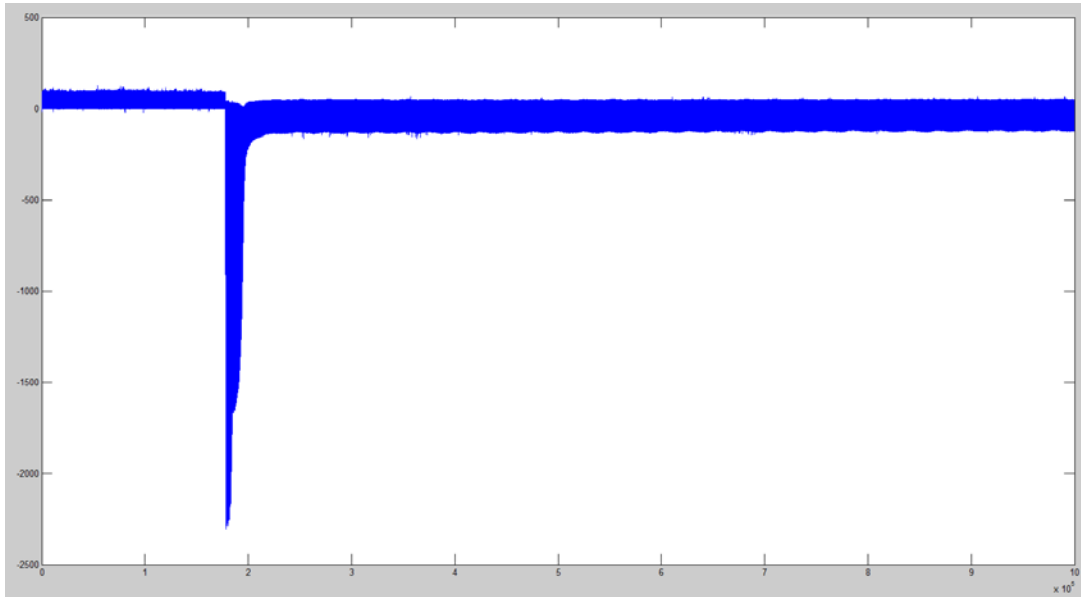


Figura 46. Potencia con operación en osciloscopio (negativo por tomar la corriente en sentido contrario)

Después se le aplico la trasformada:

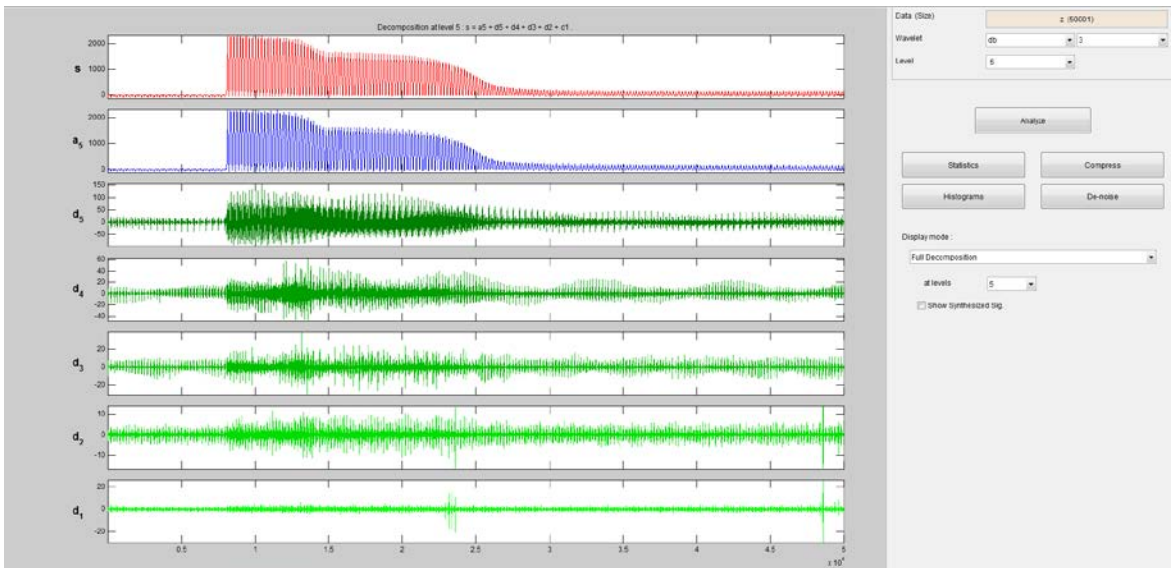


Figura 47. Trasformada del muestreo a 25 kM/s corregido

En este análisis aún son visibles los cambios de magnitudes en los niveles 1, 2, 3 y 4.

Segunda prueba:

AC:

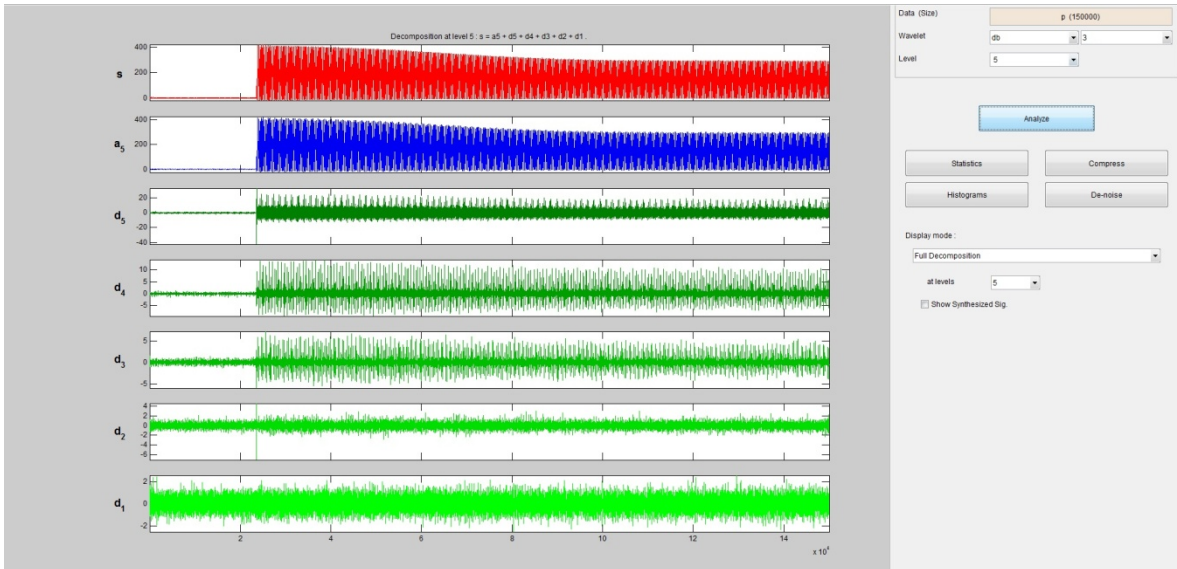


Figura 48. Transformada del muestreo #15 de la base de datos

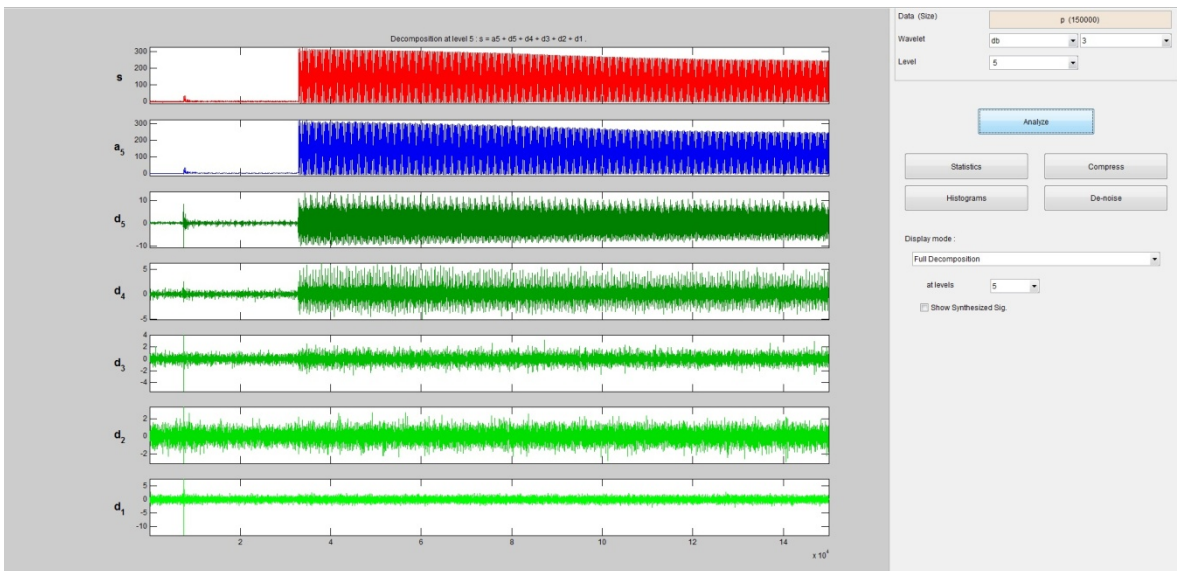


Figura 49. Transformada del muestreo #40 de la base de datos

Aspiradora:

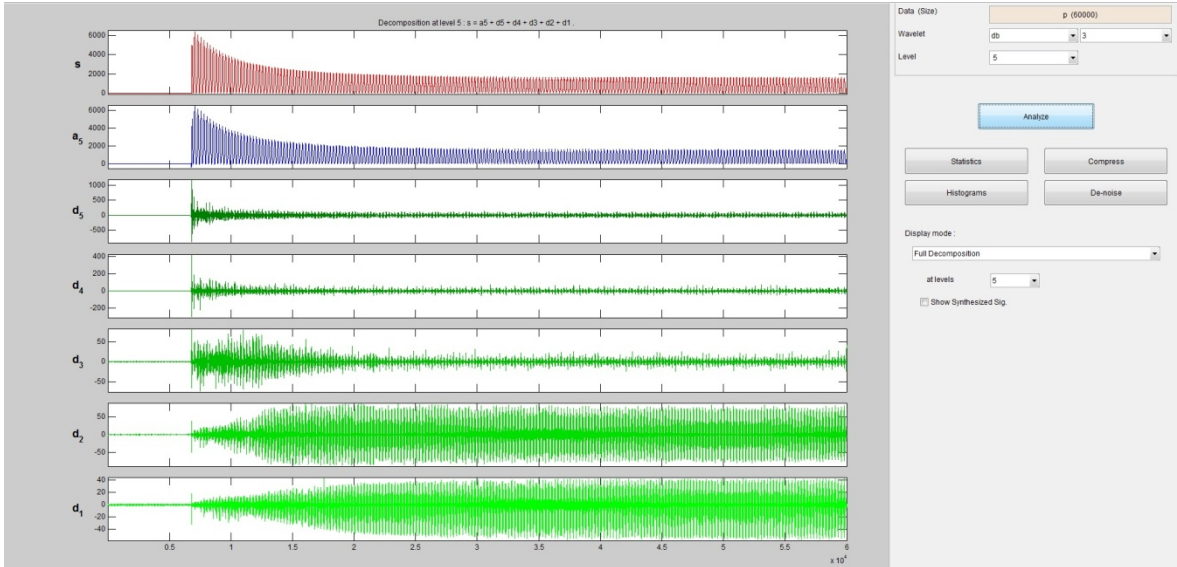


Figura 50. Transformada del muestreo #52 de la base de datos

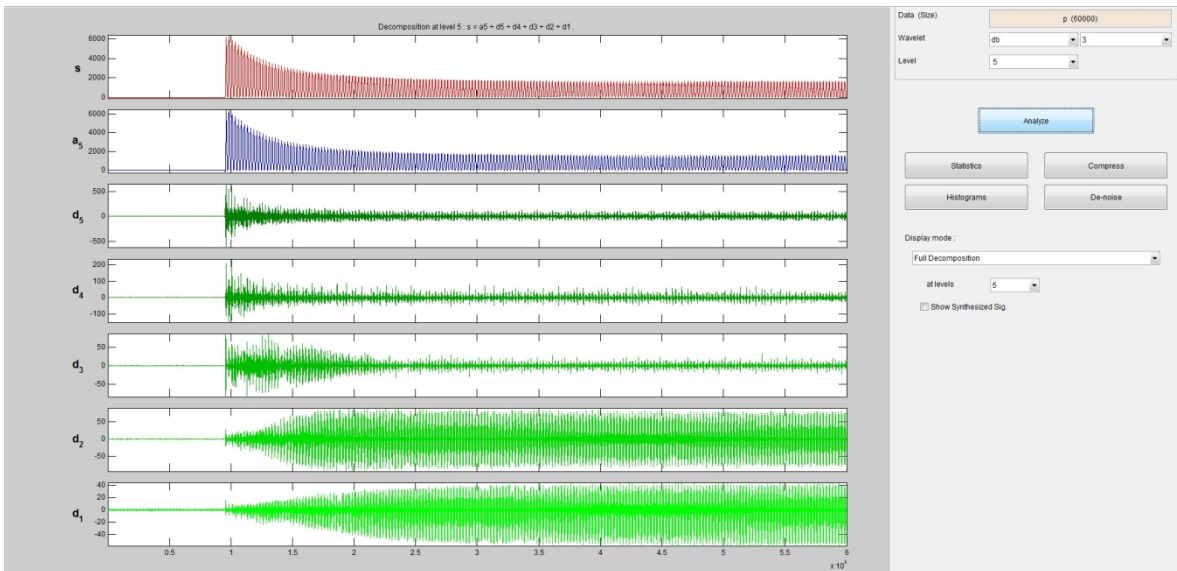


Figura 51. Transformada del muestreo #54 de la base de datos

Calentador:

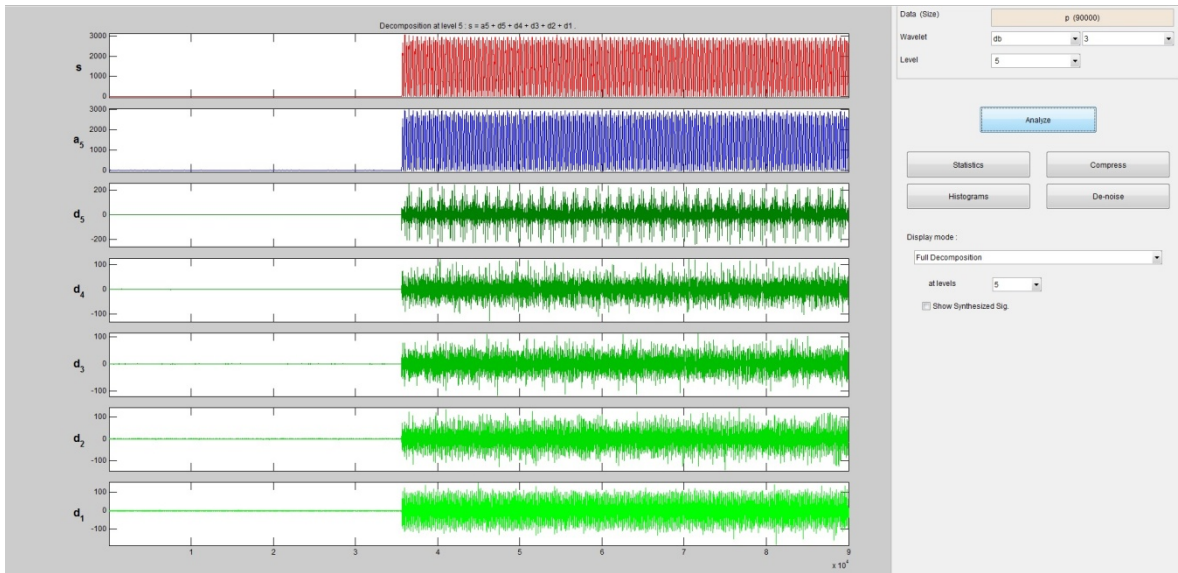


Figura 52. Transformada del muestreo #135 de la base de datos

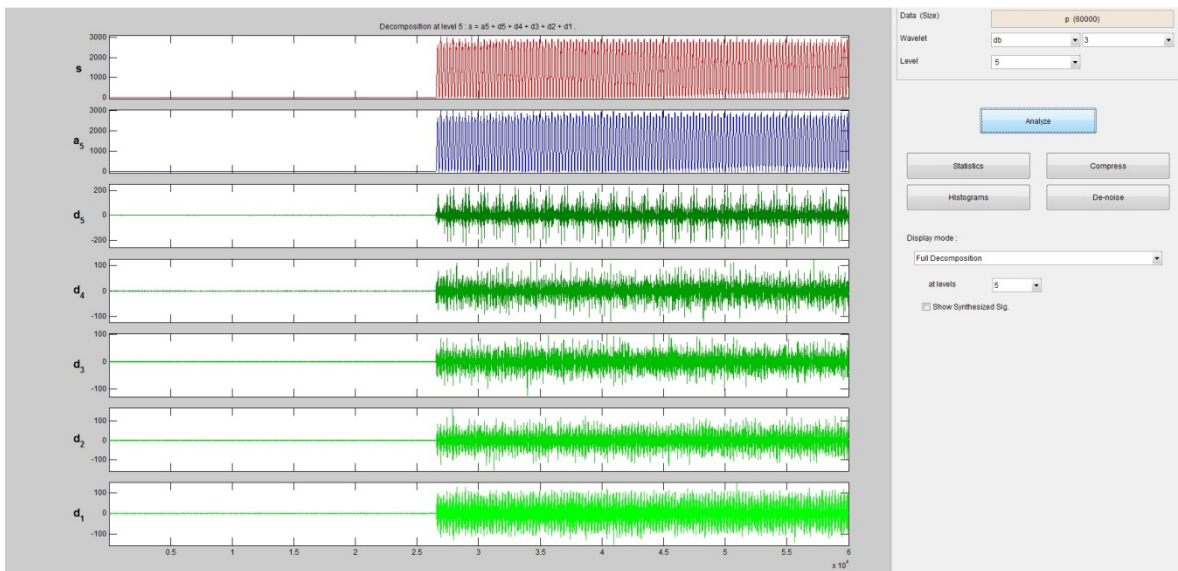


Figura 53. Transformada del muestreo #137 de la base de datos

Lámpara Fluorescente:

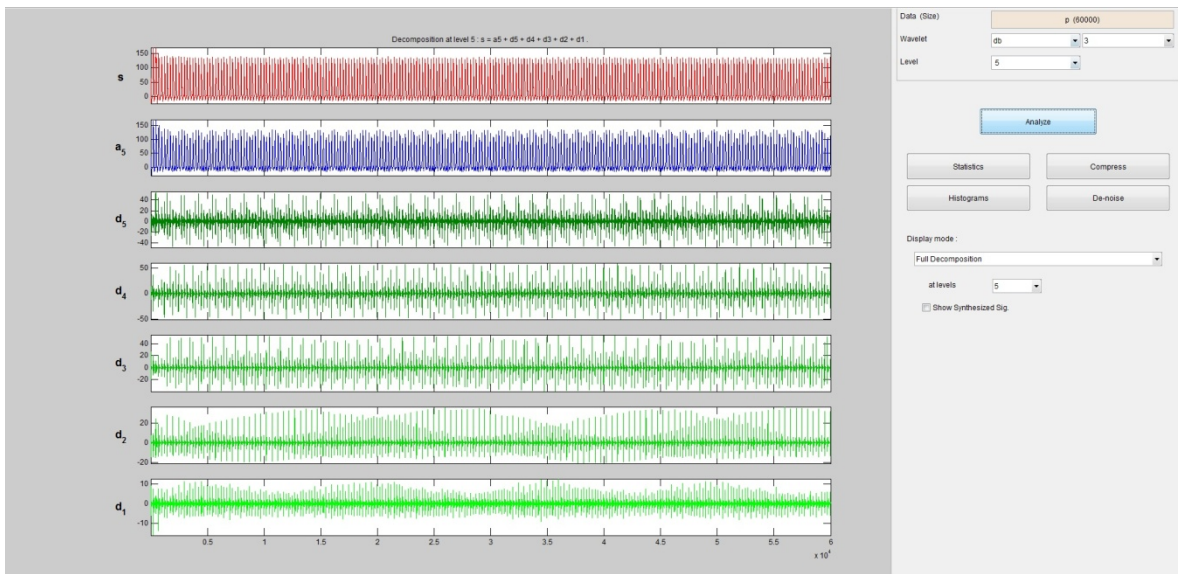


Figura 54. Transformada del muestreo #1 de la base de datos

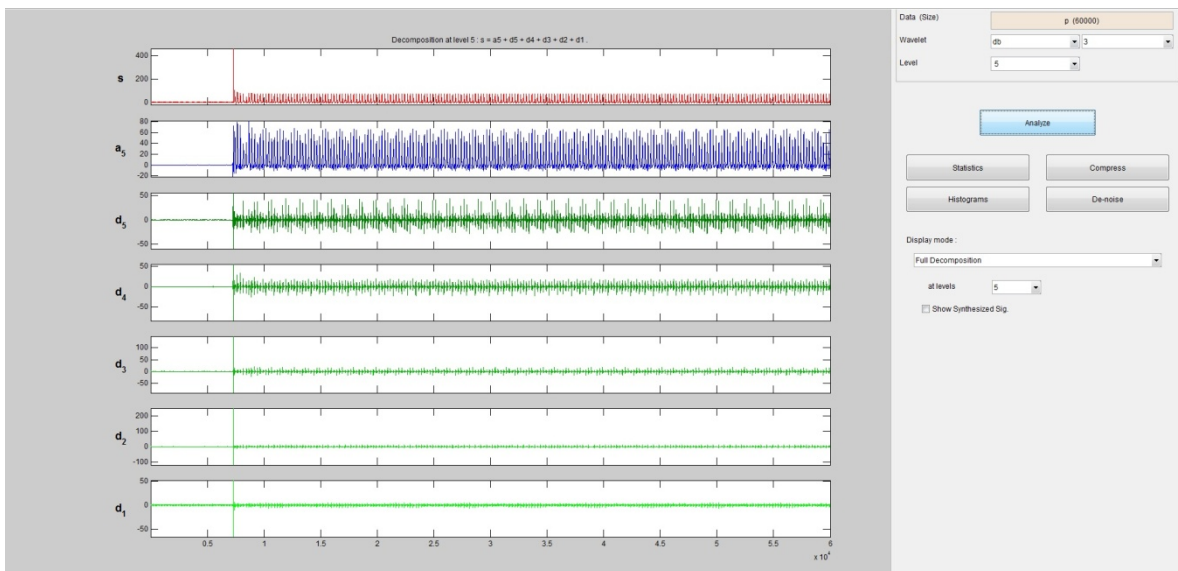


Figura 55. Transformada del muestreo #43 de la base de datos

Abanico:

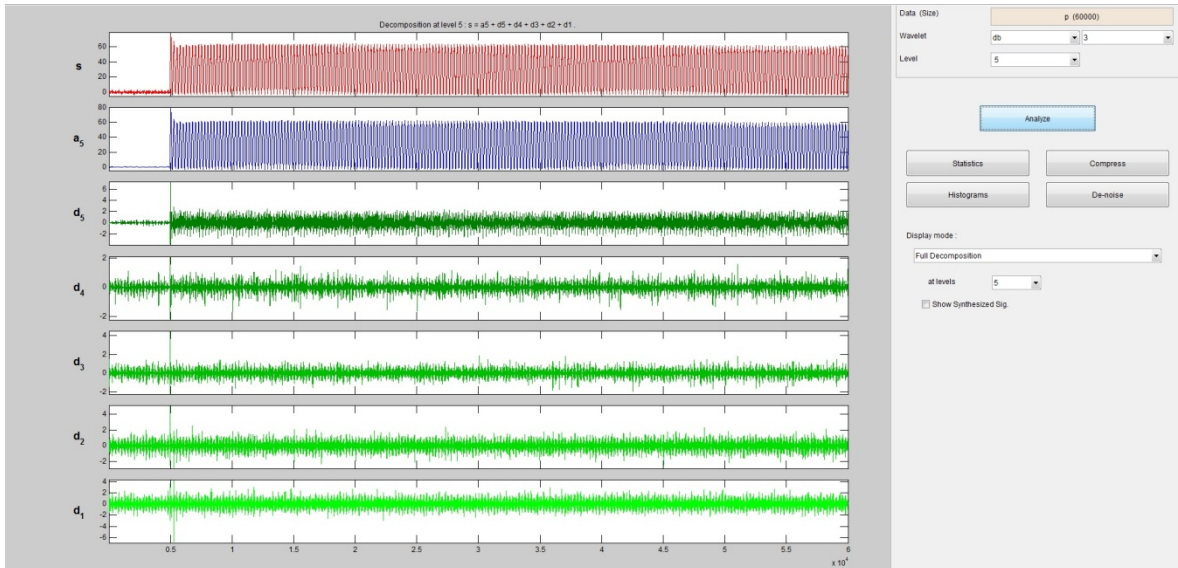


Figura 56. Transformada del muestreo #64 de la base de datos

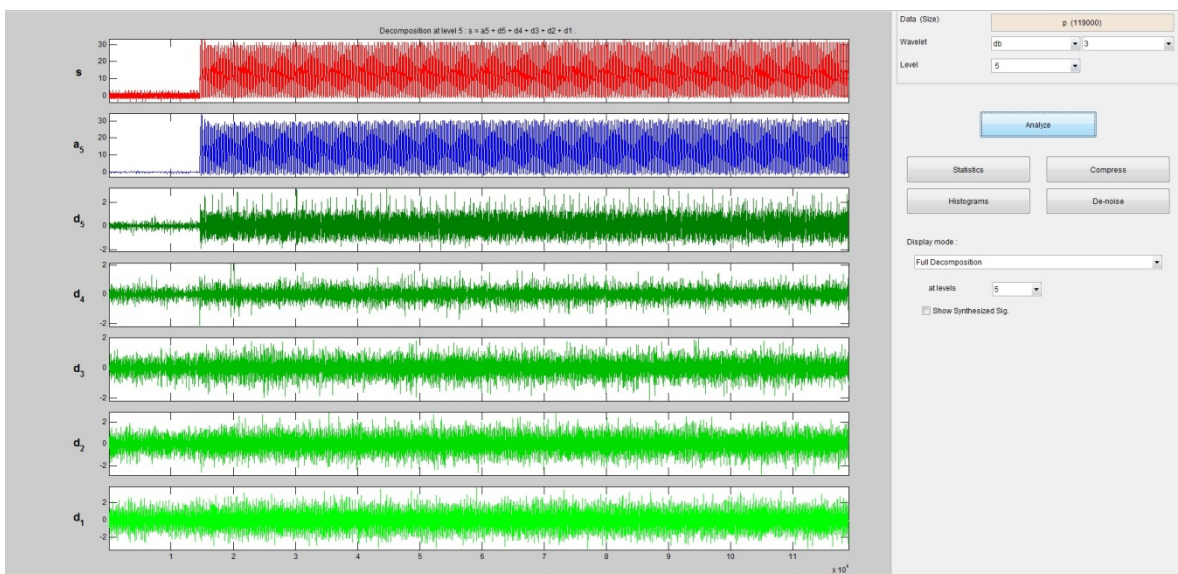


Figura 57. Transformada del muestreo #103 de la base de datos

Foco incandescente:

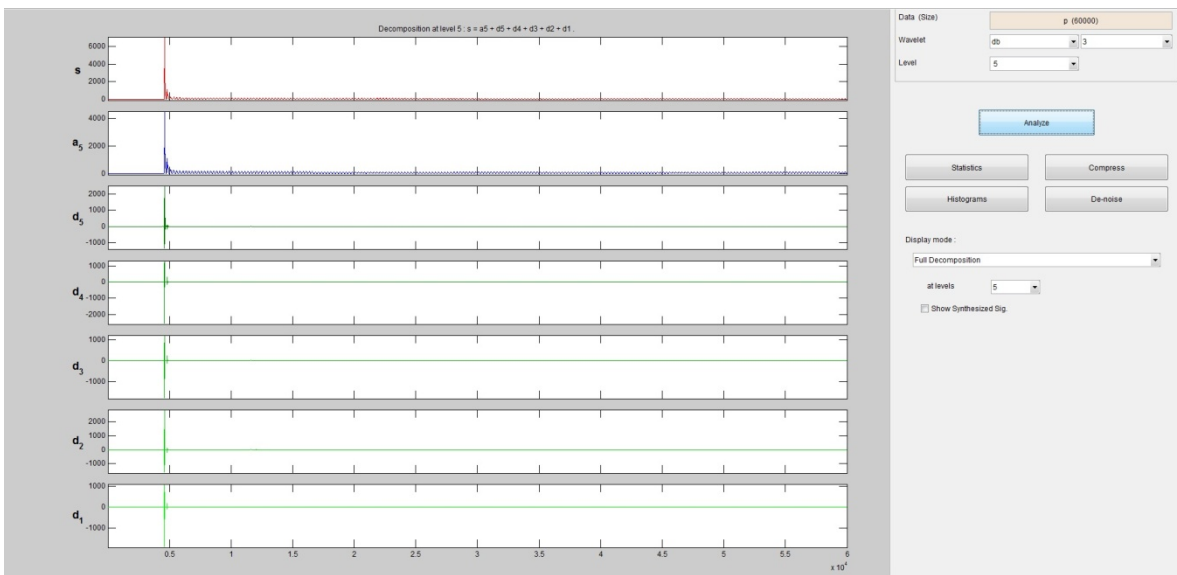


Figura 58. Transformada del muestreo #57 de la base de datos

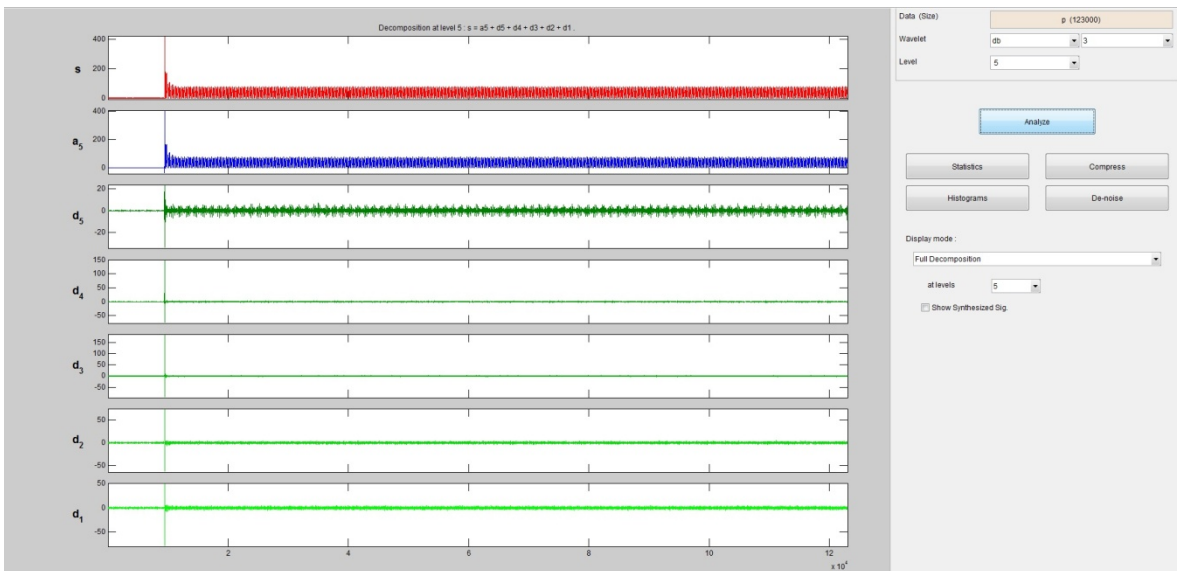


Figura 59. Transformada del muestreo #122 de la base de datos

Laptop:

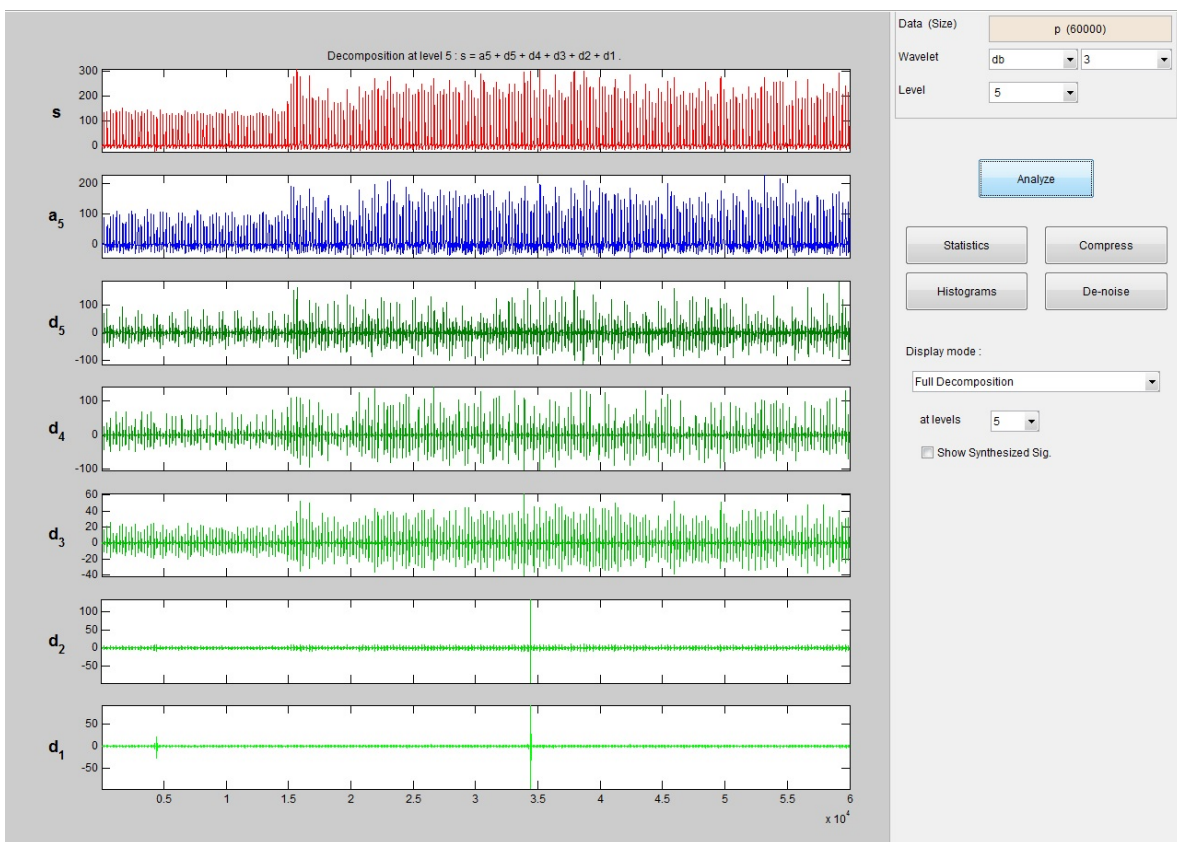


Figura 60. Transformada del muestreo #28 de la base de datos

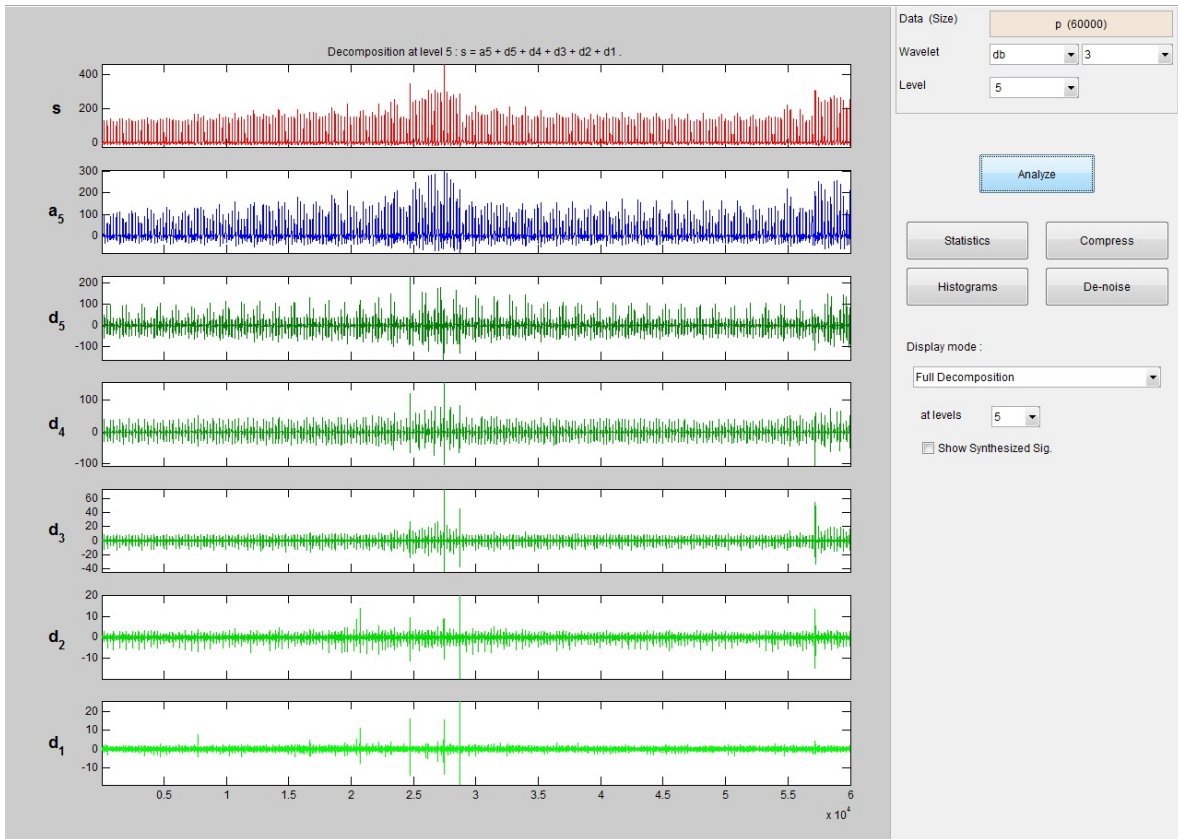


Figura 61. Transformada del muestreo #76 de la base de datos

Lavadora:

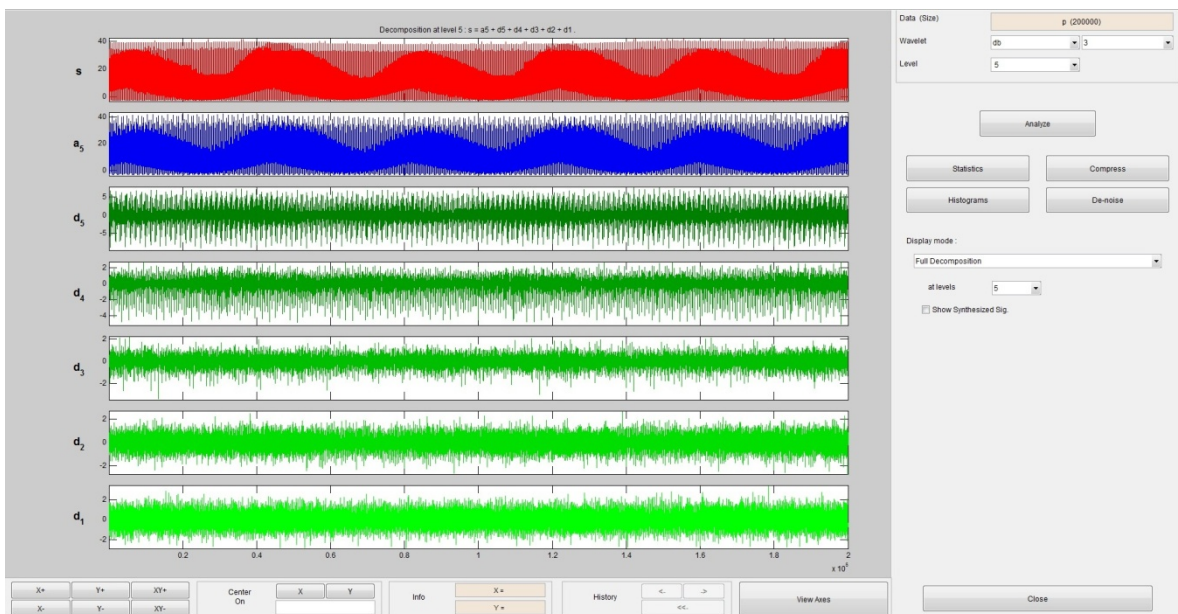


Figura 62. Transformada del muestreo #80 de la base de datos

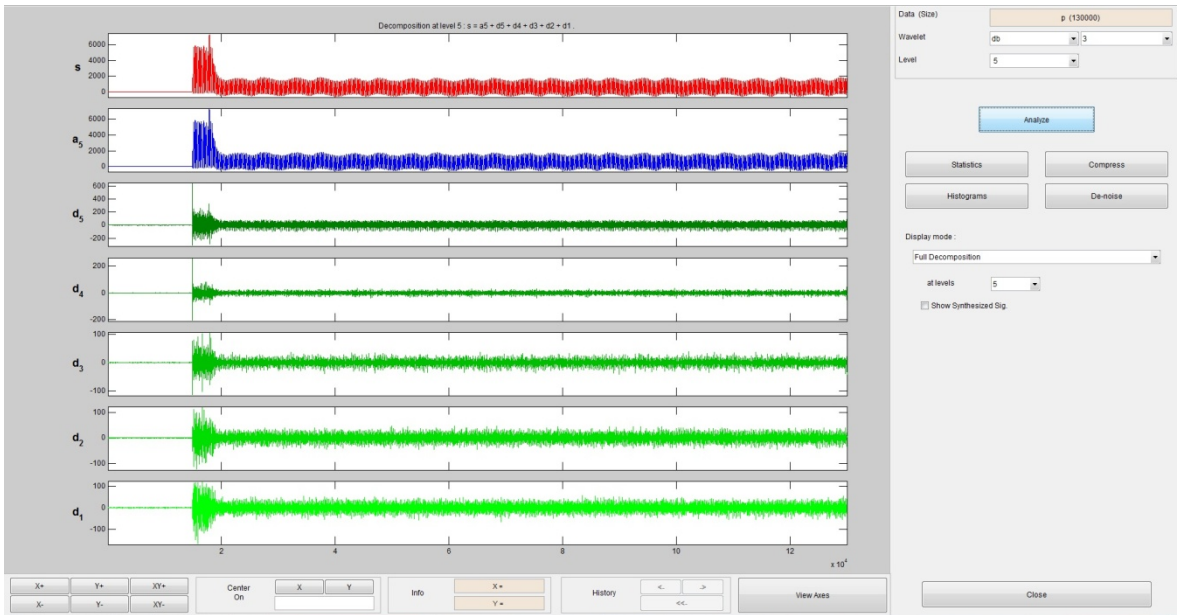


Figura 63. Transformada del muestreo #186 de la base de datos

Horno de microondas:

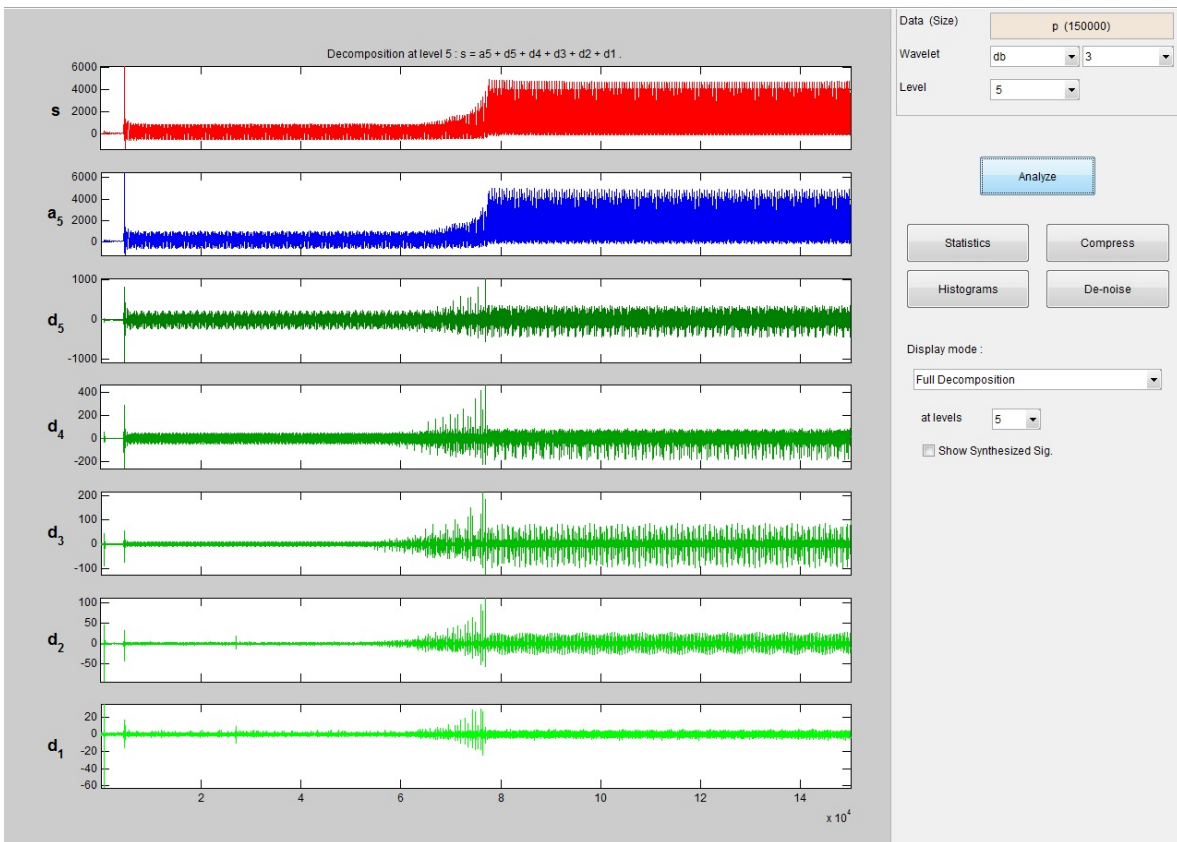


Figura 64. Transformada del muestreo #10 de la base de datos

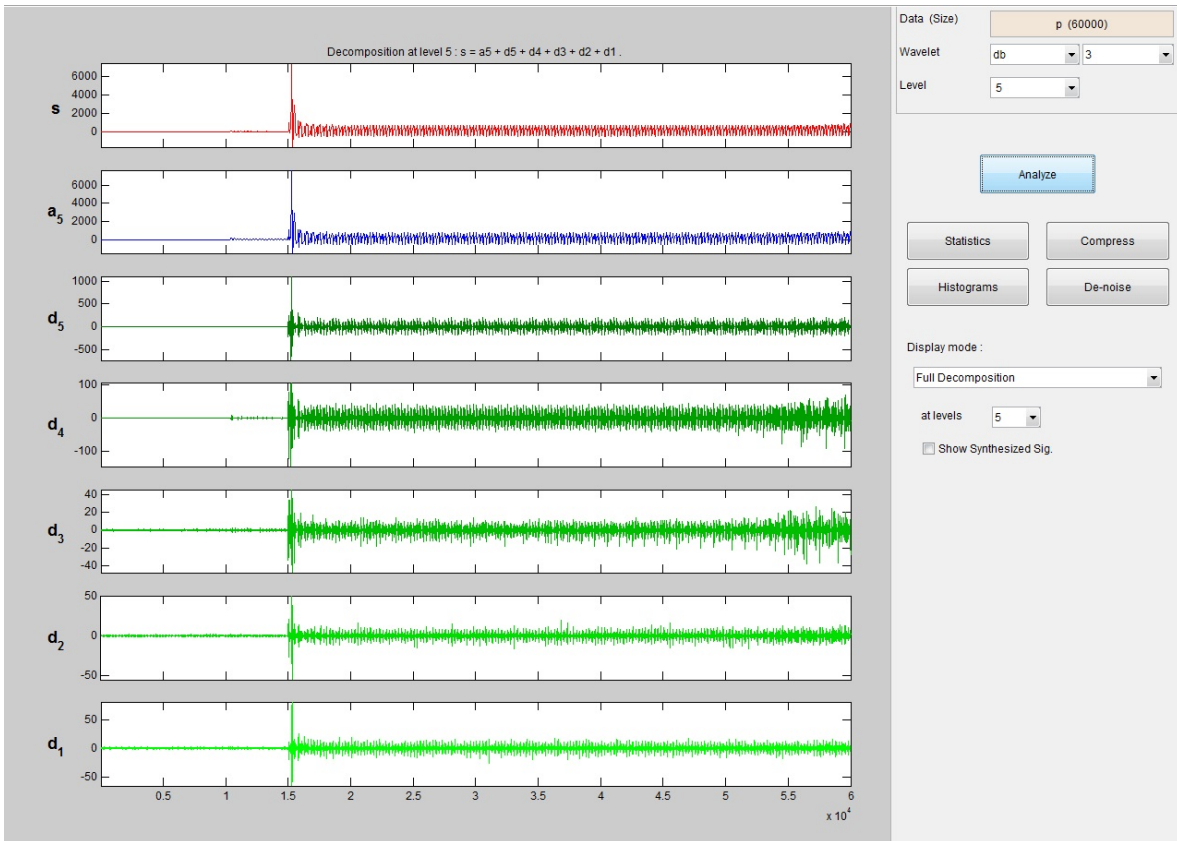


Figura 65. Transformada del muestreo #37 de la base de datos

Refrigerador:

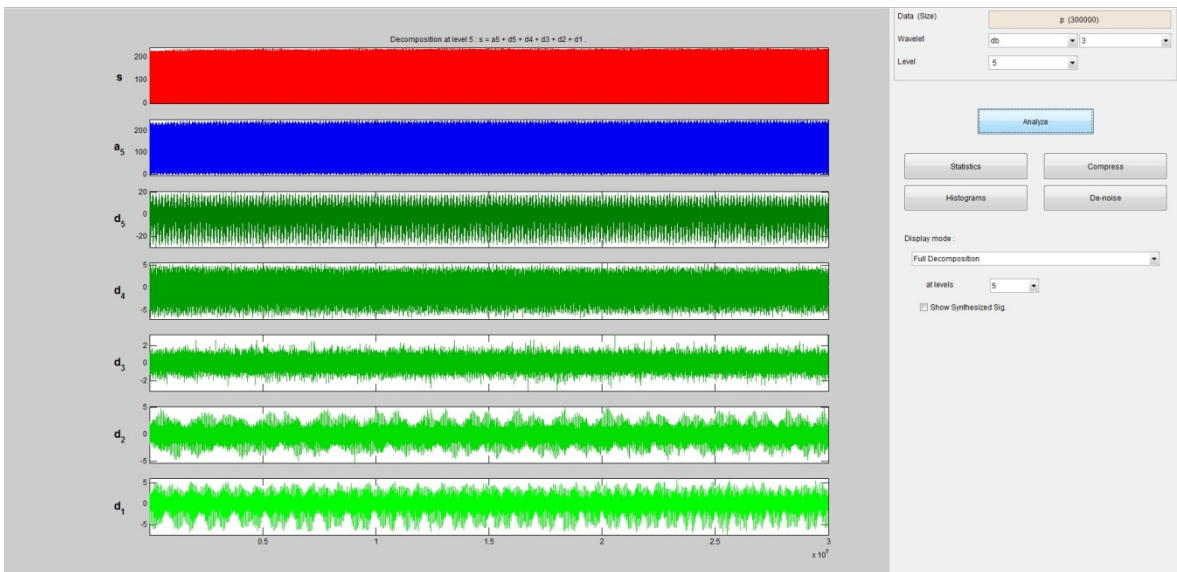


Figura 66. Transformada del muestreo #6 de la base de datos

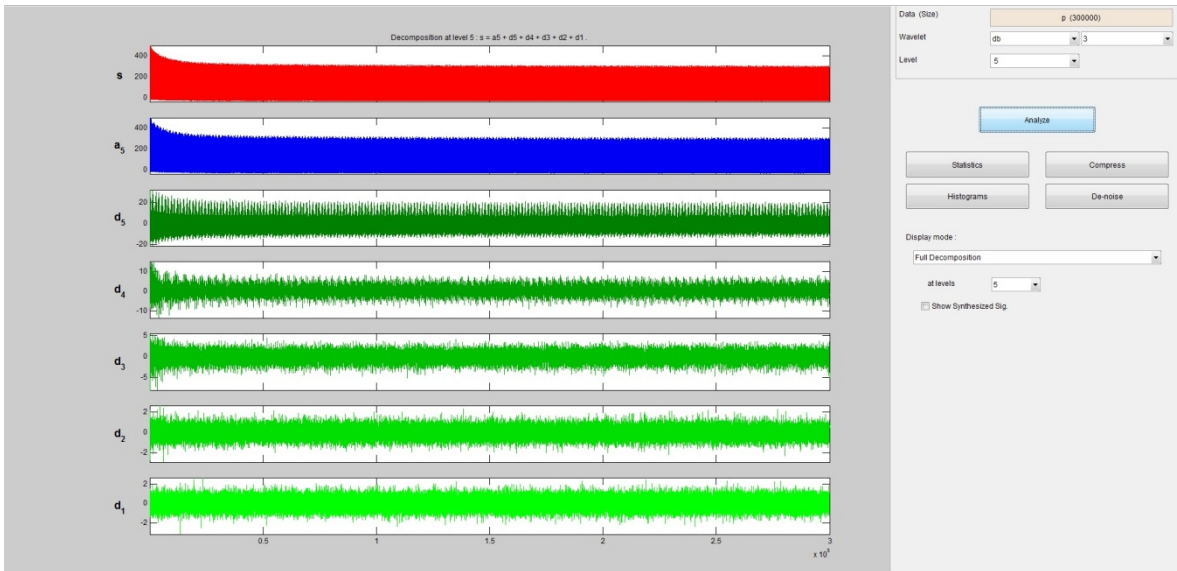


Figura 67. Transformada del muestreo #69 de la base de datos

Secadora de pelo:

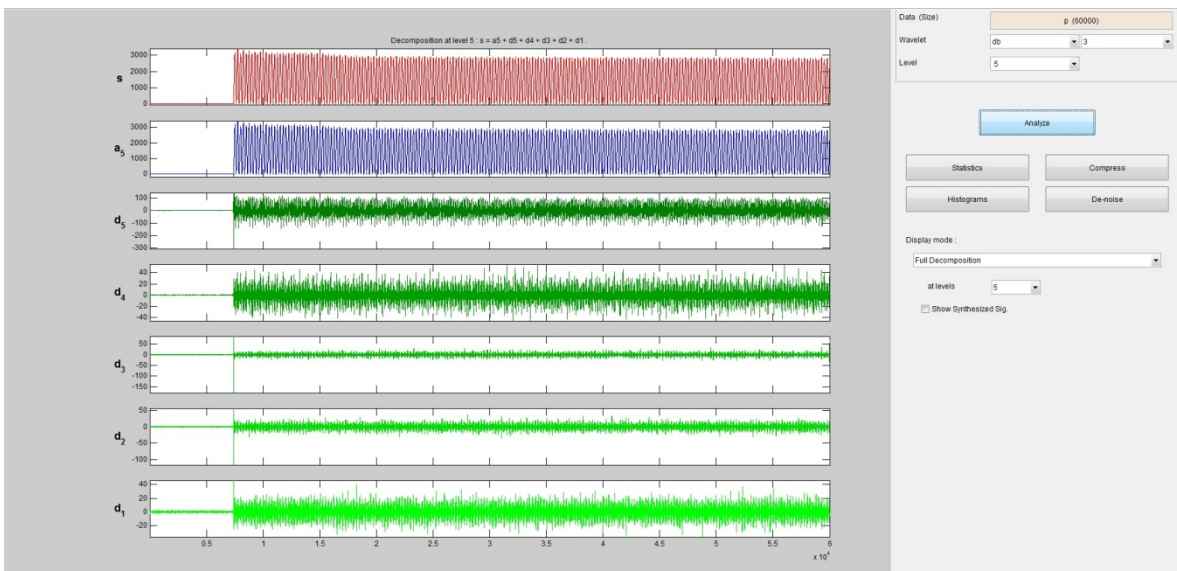


Figura 68. Transformada del muestreo #7 de la base de datos

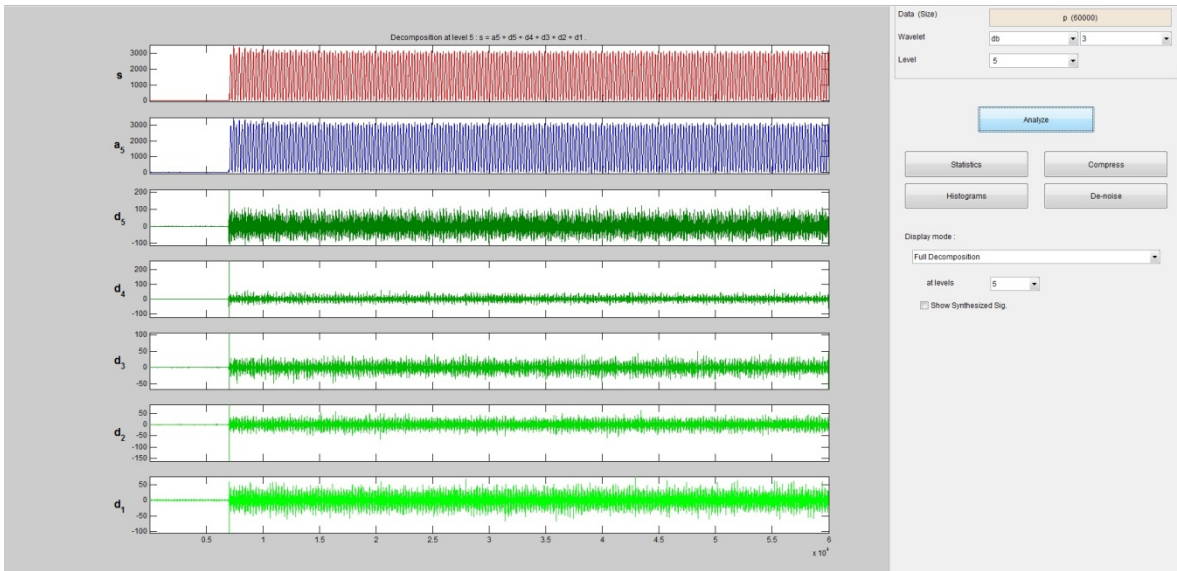


Figura 69. Transformada del muestreo #73 de la base de datos

Esta prueba no arrojó resultados claros gráficamente, por lo que se procedió con la siguiente.

Tercera prueba:

Aire acondicionado:

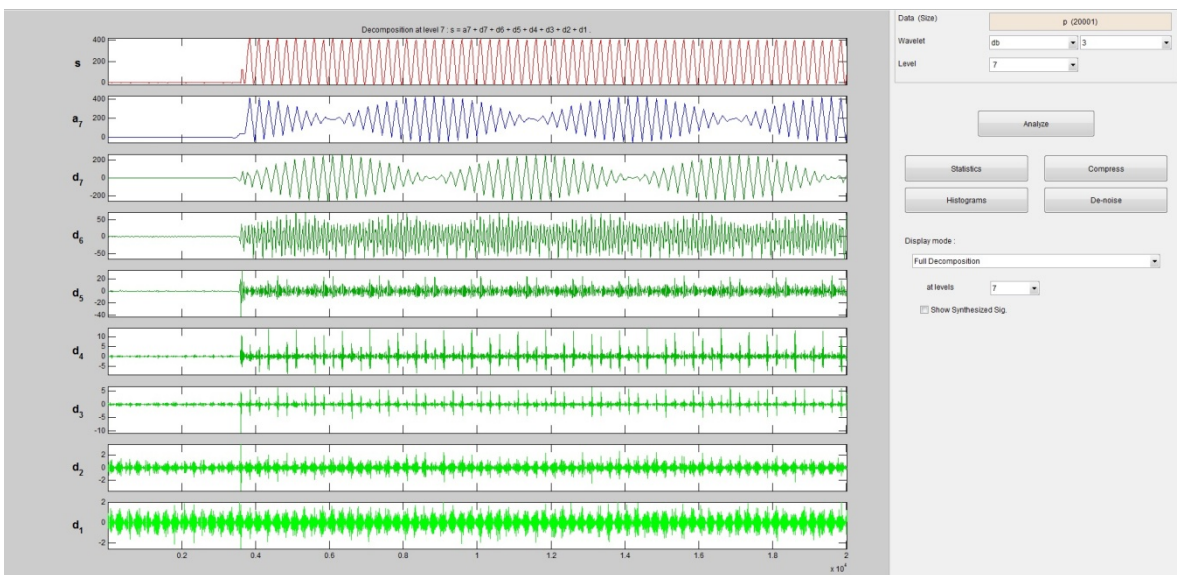


Figura 70. Transformada del muestreo #15 de la base de datos con 20000 puntos

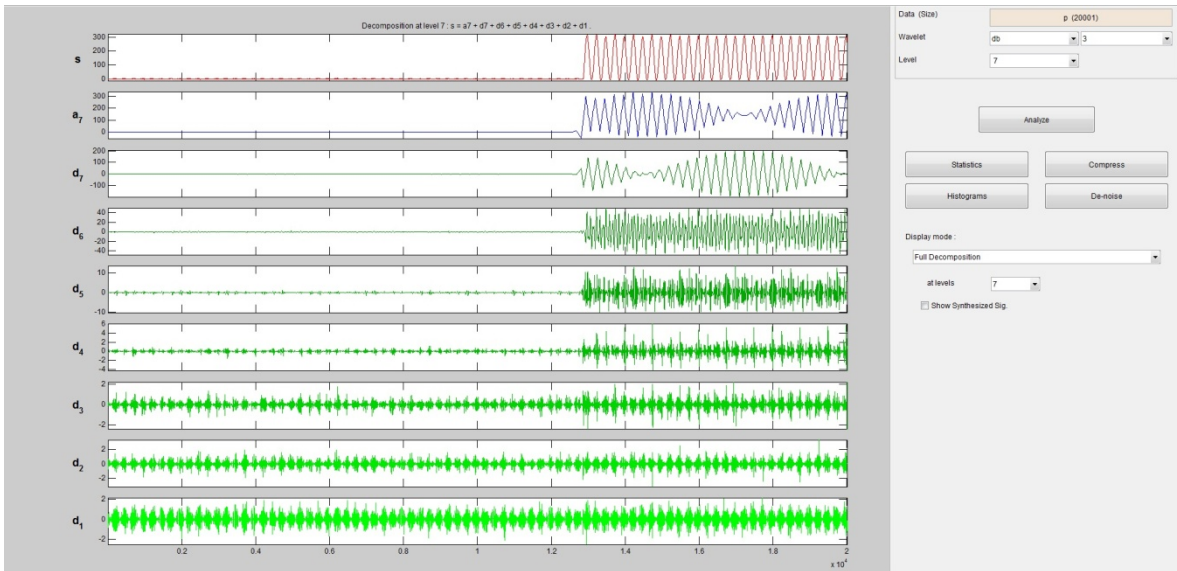


Figura 71. Transformada del muestreo #40 de la base de datos con 20000 puntos

Refrigerador:

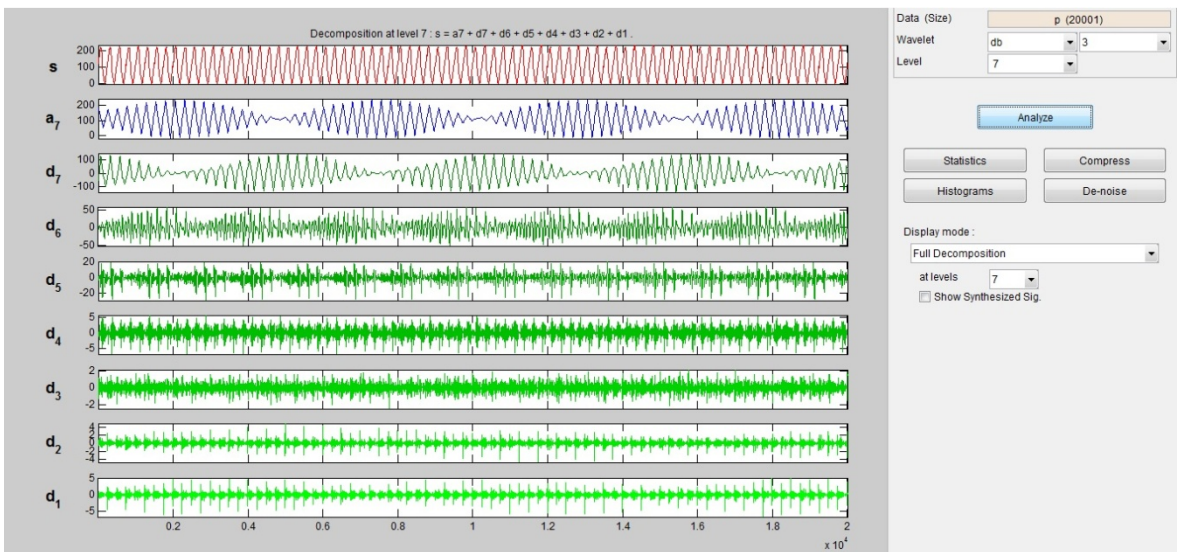


Figura 72. Transformada del muestreo #6 de la base de datos con 20000 puntos

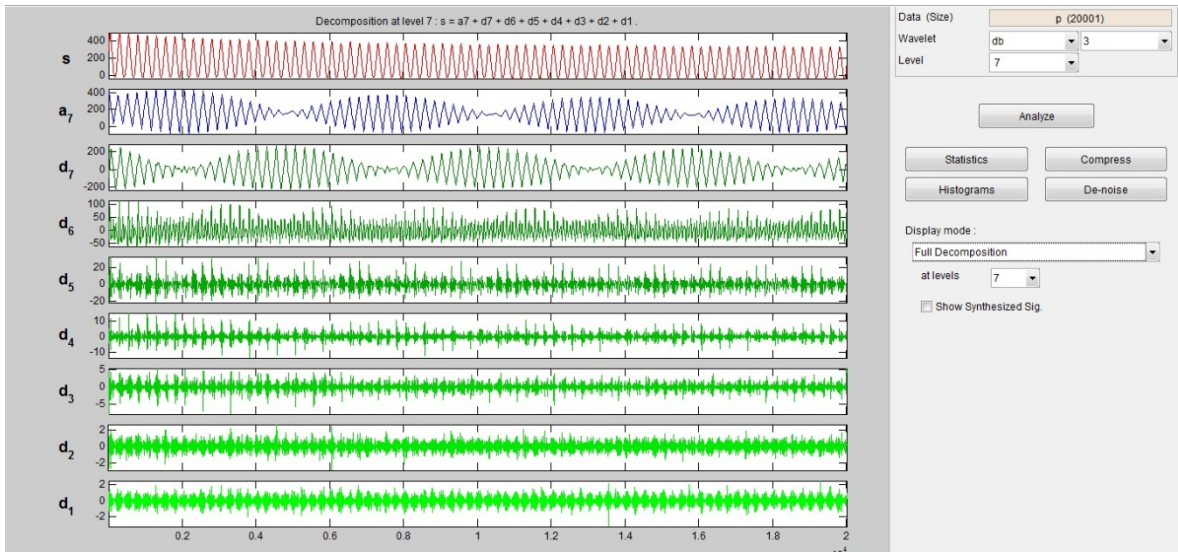


Figura 73. Transformada del muestreo #69 de la base de datos con 20000 puntos

Esta prueba, arrojó lo que parecía ser un comportamiento característico en los niveles a7 y d7, pero es un patrón que se repitió en diferentes equipos. Debido a esto fueron necesarias más pruebas.

Cuarta prueba:

Aire acondicionado:

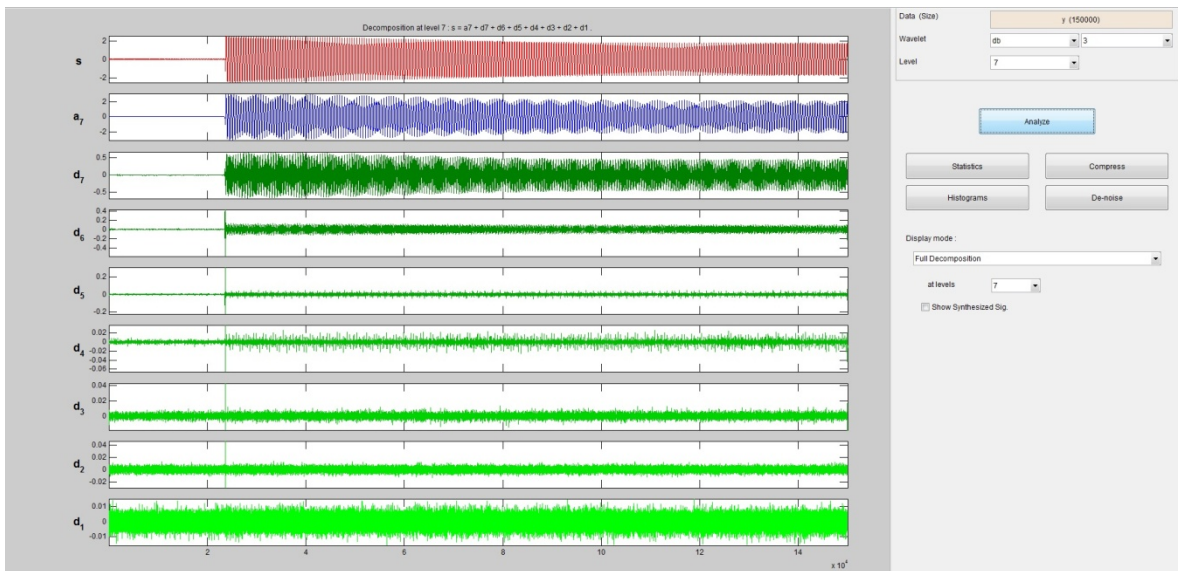


Figura 74. Transformada de la corriente del muestreo #15

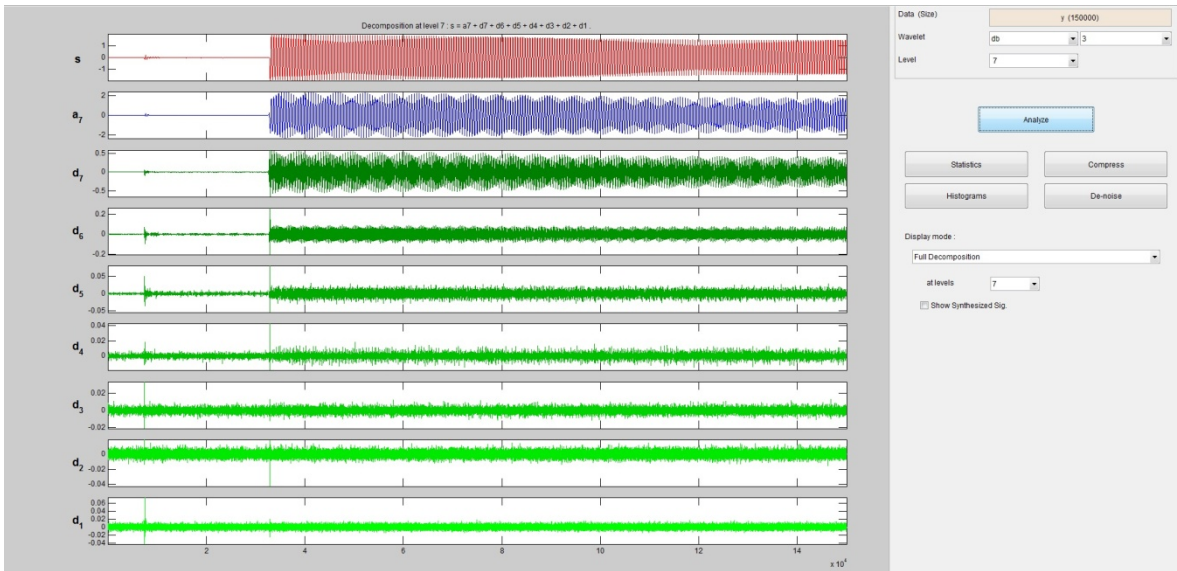


Figura 75. Transformada de la corriente del muestreo #40

Refrigerador:

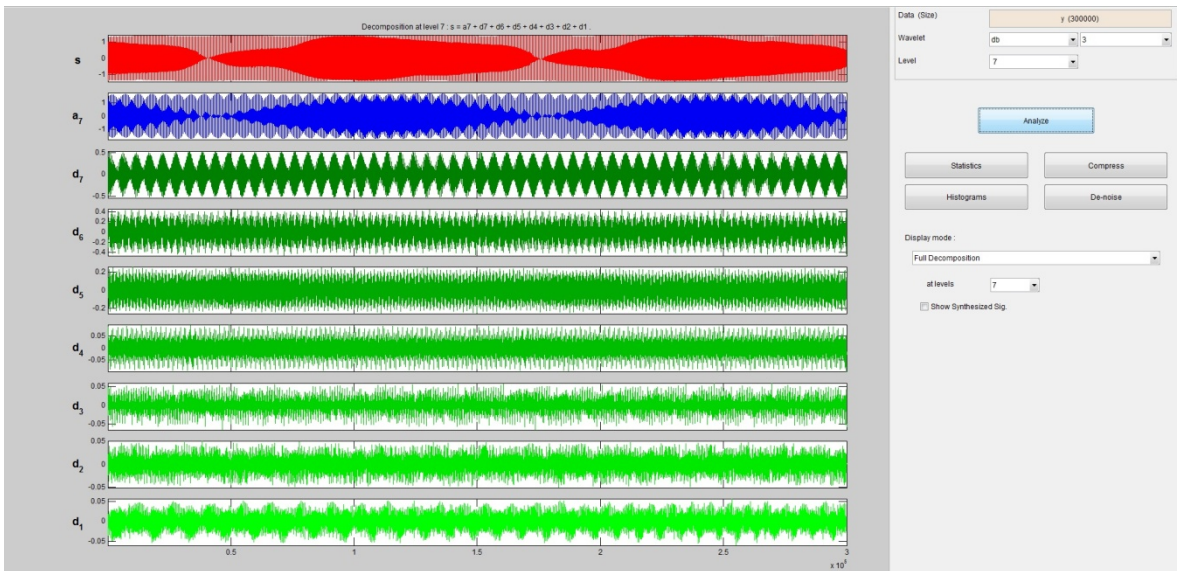


Figura 76. Transformada de la corriente del muestreo #6

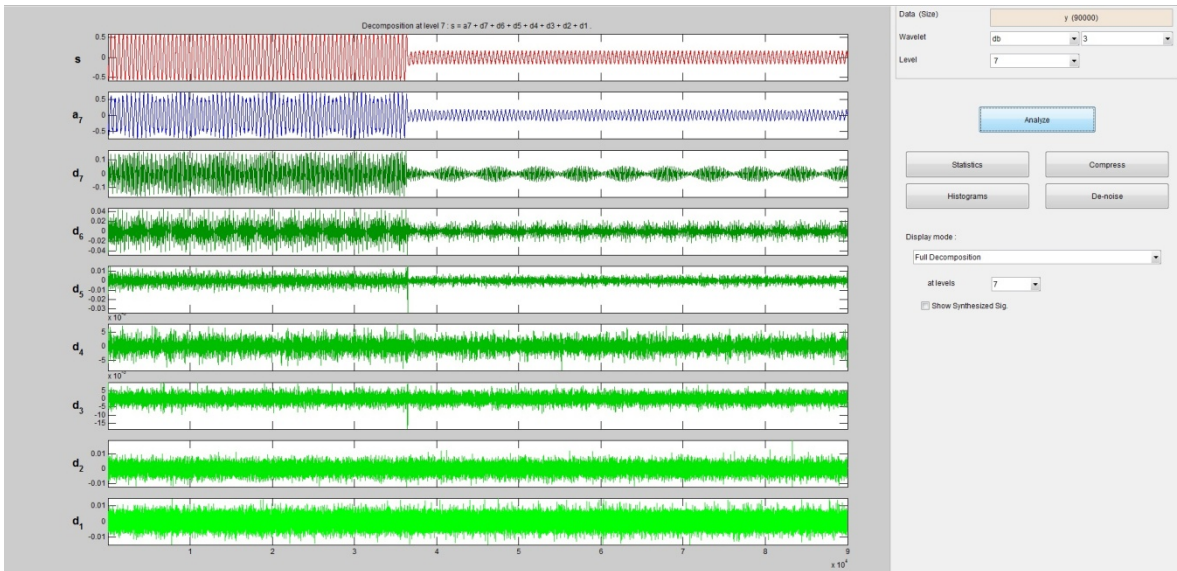


Figura 77. Transformada de la corriente del muestreo #62

En esta prueba, los resultados no mostraron mucho en el aire acondicionado, aunque en el refrigerador hubo notorias magnitudes en los niveles d_2 , d_3 , d_4 y d_5 , aunque no se presentó en todas las cargas del mismo tipo.

Quinta prueba:

Tabla 10. Comparación de algoritmos de MATLAB y propuesto

Detalle 7			Detalle 8			Aproximación 8		
Python	MATlab	Diferencia	Python	MATlab	Diferencia	Python	MATlab	Diferencia
-0.07130081	-0.05573067	-0.01557013	-0.06569803	0.17730654	-0.24300458	0.00695673	39.14772036	-39.1407636
-2.40980615	2.65908112	-5.06888727	-5.81399631	0.82775693	-6.64175324	0.57936096	38.15236364	-37.5730027
11.0786974	5.64950937	5.42918806	-13.8480769	-21.9173914	8.06931447	-1.51025289	40.87330112	-42.383554
-11.1890845	-9.53118838	-1.65789608	-14.7949193	-12.3870299	-2.40788935	5.50685421	28.24651364	-22.7396594
13.6451584	13.6451584	9.9476E-14	-13.2437105	-13.2437105	0	34.5538713	34.55387131	9.9476E-14
-4.51942051	-4.51942051	-2.0428E-14	-15.5016947	-15.5016947	-9.9476E-14	13.1170615	13.11706147	9.9476E-14
6.21025311	6.21025311	2.0428E-14	-13.543229	-13.543229	0	27.7219496	27.72194963	1.0303E-13
-6.11598085	-6.11598085	0	-13.59726	-13.59726	0	13.7623764	13.7623764	9.9476E-14
4.88795889	4.88795889	1.954E-14	-10.9489374	-10.9489374	0	25.3057007	25.30570065	9.9476E-14
-2.61938201	-2.61938201	-1.9984E-14	-11.4964	-11.4964	0	12.5014662	12.50146618	0
1.73960605	1.73960605	9.992E-15	-9.46385658	-9.46385658	-1.954E-14	22.2395938	22.23959381	9.9476E-14
-2.78882781	-2.78882781	0	-10.8928333	-10.8928333	0	12.2854225	12.28542254	1.0125E-13
-2.25332756	-2.25332756	1.0214E-14	-5.44939167	-5.44939167	-2.0428E-14	22.9444783	22.94447835	1.0303E-13
-0.20437265	-0.20437265	-8.0214E-15	-7.27305695	-7.27305695	-2.0428E-14	13.9495258	13.94952578	0
-3.55597862	-3.55597862	0	-2.88896709	-2.88896709	-1.0214E-14	19.4372961	19.43729606	9.9476E-14
2.71103986	2.71103986	0	-5.04715464	-5.04715464	-9.77E-15	13.3868313	13.38683134	0
-6.00899882	-6.00899882	0	0.75397829	0.75397829	-5.9952E-15	20.7174155	20.7174155	0
...
-261.818436	-261.818436	0	1143.61082	1143.61082	0	2299.91673	2299.91673	1.0004E-11
247.183076	247.183076	9.9476E-13	1241.0544	1241.0544	0	2313.60795	2313.60795	9.5497E-12
-105.338218	-105.338218	0	1393.05251	1393.05251	0	2320.99833	2320.99833	1.0004E-11
51.4745306	51.4745306	7.9581E-13	1480.11702	1480.11702	0	2281.87224	2281.87224	0
42.4836542	42.4836542	9.9476E-14	1549.96243	1549.96243	0	2306.31105	2306.31105	1.0004E-11
-142.872745	-142.872744	-6.556E-07	1515.18553	1515.18553	-2.309E-08	2315.02321	2315.02321	2.4497E-09
210.565406	210.804642	-0.23923607	1533.88134	1534.65556	-0.77421487	2309.57624	2309.49426	0.08198115
-333.038354	-309.232162	-23.8061918	1581.89656	1734.28429	-152.387728	2261.66026	2245.95154	15.7087116
75.1124407	-261.245153	336.357593	-400.957637	-1134.13379	733.176148	2545.37833	2704.59933	-159.221001
40.7507042	1024.2413	-983.490591	128.567348	-1626.02703	1754.59438	1214.16613	652.939229	561.226905

Tal prueba verificó que a excepción de los primeros 4 y los últimos 5, el método propuesto es prácticamente igual al realizado por MATLAB.

Para las pruebas siguientes, el algoritmo para la transformada en Python ya había sido probado con éxito, además se ya había sido integrada la función para el cálculo de energía en porcentaje, con lo cual fue posible realizarlas en Raspberry Pi y pc; las cuales fueron realizadas con la corriente de los aires acondicionados y refrigeradores también.

Sexta prueba:

Tabla 11. Algunos resultados de porcentajes de coeficientes de energía para AC

PC											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	0.06466885	0.00061662	0.00032652	0.00020685	0.00048571	0.00424002	0.07907708	2.84982305	51.1695562	45.7781826	0.05281648
16	0.30606822	0.00063036	0.00033048	0.00021011	0.00048887	0.00409393	0.07345786	2.83605179	51.2636558	45.2054975	0.30951528
17	0.02782955	0.00071357	0.00040857	0.00026226	0.00057792	0.00360507	0.07878558	2.87039289	52.5871334	44.3834511	0.04684013
38	0.24594695	0.00115593	0.00063716	0.00035501	0.00049202	0.00425183	0.06973993	2.85384508	50.7695757	45.7991415	0.25485898
39	0.15329067	0.00104233	0.00059106	0.00032747	0.00054605	0.00391438	0.07482709	2.84063397	51.3767998	45.4017872	0.14624
40	0.36642061	0.00104419	0.00058866	0.0003332	0.00046066	0.00309625	0.07007029	2.8214054	51.8338768	44.5498489	0.35285506
83	0.99210582	2.16E-06	1.28E-05	0.00030008	0.00326101	0.01581987	0.15122417	3.00618149	49.1220566	46.6372156	0.07182049
84	0.23912342	2.46E-06	1.28E-05	0.00029335	0.00318392	0.01514478	0.14693671	3.03761939	51.9992335	44.471903	0.08654666
85	0.00354195	0.00083457	0.00039887	0.00024427	0.00103008	0.01424109	0.20814994	3.30285785	51.1797313	45.2858423	0.00312783
86	0.06837362	1.35E-05	1.96E-05	0.00029009	0.00355761	0.0281288	0.23386188	3.27464805	53.4334924	42.8033724	0.15424217

Raspberry											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	5.37103866	0.00083961	0.00123195	0.00192363	0.00593208	0.03534056	0.30039443	3.61436036	30.5639878	57.4441647	2.66078626
16	5.39902197	0.00102872	0.00185089	0.00211103	0.01136797	0.04031523	0.3020985	3.66916772	30.9213844	57.298513	2.35314056
17	5.34640714	0.00089373	0.00135233	0.00215674	0.0063967	0.03196947	0.29901755	3.60883487	30.8312322	56.2929405	3.57879881
38	5.39646349	0.00128213	0.00217506	0.00266607	0.01121646	0.04009083	0.29594319	3.67561839	30.7334874	57.6349943	2.2060626
39	5.37176482	0.00111576	0.00174264	0.00244127	0.00722789	0.03576615	0.29237897	3.61681786	30.6741296	57.2309436	2.76567135
40	5.40011771	0.00124959	0.00218094	0.00260318	0.01152521	0.03702922	0.29583515	3.66164339	31.1143803	56.9023598	2.57107555
83	5.34380328	7.60E-05	0.00027578	0.00233129	0.0154614	0.06795639	0.41766562	3.71048784	29.6591887	56.3394124	4.44334134
84	5.34701871	0.0007562	0.00182507	0.00253963	0.02015947	0.0787247	0.4063726	3.75196624	30.3497298	54.9006085	5.14029904
85	5.45084275	0.00099685	0.00140512	0.00214373	0.00907648	0.06540023	0.49904557	3.9544207	31.0472282	57.8262621	1.14317831
86	5.24066282	0.00015156	0.0003634	0.00223051	0.01566821	0.08791948	0.5062658	3.78851366	30.5153232	54.3222362	5.2066514

En esta prueba, se mostró que el método utilizado para el cálculo de energía, difería algo del método de MATLAB.

Séptima prueba:

Tabla 12. Mitad de los resultados de porcentajes de coeficientes de energía para lámparas fluorescentes compactas

PC											
CFL	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	5.81363598	0.04192225	0.31140126	1.1468293	2.56152814	4.40064093	12.6575706	24.763504	26.7976305	21.2187966	0.28654041
2	0.07628252	1.02439166	5.95850168	3.79758299	7.8146258	4.33108066	11.5286297	21.7729482	25.3656577	18.2930745	0.03722462
3	0.02475532	0.18415967	0.98086915	2.18535807	2.83188661	4.97025417	12.4461856	24.6250694	28.7414985	22.9902651	0.01969843
4	0.04890837	1.25056778	1.16914842	8.87018744	3.38227522	6.95423235	11.5884097	20.8691513	27.6754997	18.0983947	0.09322498
5	0.15436159	1.61046915	0.6146488	3.17419679	7.03013799	4.3639524	12.0291581	22.1161124	28.0365177	20.8436034	0.02684159
18	2.32812479	2.82927458	8.18154303	16.2815685	2.89599467	7.02881927	10.4083635	15.5825761	19.3160118	15.0159249	0.13179893
19	0.11736601	3.66121162	18.3761684	3.11603517	3.49550794	8.36377775	10.5497081	17.2969271	18.6575436	16.2767788	0.08897558
20	2.89958985	4.19084493	1.55991247	2.41054032	4.4769384	6.82332246	12.8590427	20.377841	24.5766171	19.6547912	0.17055965
21	3.24216589	0.19693424	1.14260614	1.44166207	2.66551473	7.35314243	13.7222446	22.7757615	24.89707	22.3717575	0.19114094
22	0.13455948	9.77606846	5.45346333	3.33835983	7.92388296	6.43112157	11.4474175	17.4487667	20.5212403	17.4830713	0.04204851

Raspberry											
CFL	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	5.86103872	0.00832747	0.04473264	0.17102594	0.51156744	1.33769035	4.5260717	12.6176214	25.7756964	44.4057099	4.74051803
2	5.85303084	0.0423621	0.20430756	0.32610274	0.93509173	1.3908116	4.52568618	12.3861898	26.3975613	43.7917372	4.14711885
3	5.91772801	0.01688605	0.07792989	0.23256463	0.52920104	1.40068173	4.42123857	12.3841407	26.4618276	46.3303937	2.22740817
4	5.74790718	0.04550576	0.0879873	0.48454637	0.59809884	1.71340854	4.41188433	11.7901984	26.8558473	42.5042861	5.76032985
5	5.82620211	0.05121598	0.06327324	0.28747615	0.85519619	1.34610722	4.44905269	11.995059	26.5317712	44.6940069	3.90063931
18	5.8226244	0.07950587	0.27031883	0.76209801	0.64489048	1.9992837	4.80899096	11.8184552	25.8799985	44.4030052	3.51082884
19	5.63447918	0.08517474	0.3815906	0.31416407	0.66513778	2.05552924	4.60445205	11.7376923	24.1057452	44.0587851	6.35724978
20	5.85048109	0.08576918	0.10471995	0.25992246	0.71063158	1.74901775	4.74729129	11.9831953	25.88982	45.4075529	3.57159848
21	5.81516423	0.01773481	0.08535362	0.19162389	0.52114873	1.72610729	4.69310564	12.0976531	24.9383046	45.8785067	4.03529732
22	5.72612604	0.13734766	0.2051387	0.32089447	0.98824469	1.77871836	4.73354579	11.6406906	24.8776833	44.87338	4.71823032

En esta prueba, se mostró una tendencia similar a la prueba anterior, por lo cual se procedió a la siguiente.

Octava prueba:

Tabla 13. Mitad de los resultados de AC para vectores de potencia sobre los porcentajes de coeficientes de energía

PC											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	65.1760993	0.00044078	0.00028153	0.00078834	0.00524753	0.04464922	1.05119434	17.6729578	15.8229025	0.07429307	0.15114569
16	65.5082893	0.00045159	0.00028368	0.00078875	0.00545794	0.04492337	1.04457997	17.807754	15.4171286	0.07388405	0.09645871
17	63.8635443	0.00063324	0.00044044	0.00120062	0.00767981	0.05474142	1.10475255	18.4612192	16.3145764	0.06794858	0.12326342
38	64.7968704	0.00151923	0.00084515	0.00059528	0.00246939	0.03348265	1.00613599	18.0563163	15.9696229	0.02587336	0.1062694
39	63.3130945	0.00135778	0.00120863	0.00138653	0.00700288	0.04472352	1.08927309	19.1211059	16.1037397	0.12458162	0.19252582
40	64.2126018	0.00081909	0.00052373	0.00043989	0.00242359	0.03278267	1.01913066	18.3528012	16.1296185	0.07512902	0.17372988
83	58.6699788	0.00147428	0.00094726	0.00170118	0.00818071	0.05491166	1.27077158	21.1860515	18.6470648	0.1286445	0.03027368
84	59.2476973	0.00137749	0.00090997	0.00172379	0.00827147	0.05363641	1.24094741	20.4974715	18.7570005	0.0815493	0.10941485
85	65.5020074	0.00151299	0.00085076	0.00125345	0.00633413	0.06037456	1.19783924	18.0300578	14.9788685	0.0992846	0.12161659
86	61.2183528	0.00113166	0.00075354	0.00151862	0.00904018	0.07098102	1.27559595	20.1902487	16.9624132	0.18420502	0.08575934
Raspberry											
AC	A10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
15	13.7611527	0.00181063	0.00289257	0.00967951	0.04994701	0.29120757	2.82379123	23.1015067	43.4798104	5.39562026	11.0825815
16	14.6680017	0.0026745	0.00535858	0.01064139	0.06254469	0.31916447	3.02357287	24.8475874	45.8840218	6.05521203	5.12122054
17	14.6228358	0.00230609	0.00384626	0.01269863	0.06421844	0.34270364	3.07688278	25.0931814	46.9172185	5.14676062	4.71734779
38	14.1441123	0.00385249	0.00656591	0.00896696	0.04551079	0.26579083	2.86220496	24.0992439	45.0018438	3.55779952	10.0041085
39	12.5467445	0.00290027	0.00547619	0.01170136	0.05261034	0.26588882	2.6193332	21.9112805	40.0216923	7.085081	15.4772922
40	13.7400967	0.00307029	0.00588381	0.00763395	0.04557374	0.25897392	2.79954594	23.6522983	44.0129713	5.12069228	10.3532597
83	13.5017458	0.003255	0.00521908	0.01397091	0.06124497	0.3169142	3.03727895	24.7268799	45.5506536	7.36828518	5.41455241
84	12.4881142	0.00325524	0.00676671	0.01502531	0.06863807	0.30025533	2.79652313	22.6456965	42.4135216	6.68725563	12.5749483
85	13.3563408	0.00325611	0.00489094	0.01183969	0.05324945	0.32853023	2.92315406	22.6413169	41.126239	4.86549392	14.6856888
86	12.9844618	0.00273441	0.00446312	0.01266533	0.06179516	0.34616493	2.93248775	23.2978355	42.597252	8.70648927	9.05365081

Al realizar esta prueba sobre los vectores de potencia, se mostró un aún más diferido al método de MATlab.

Novena prueba:

Tabla 14. Pruebas de energía total

AC	Energía total	Refrigerador	Energía total	Aspiradora	Energía total	CFL	Energía total	Abanico	Energía total	Lavadora	Energía total
15	9785254.39	6	4143859.81	52	487528048.09	1	422408.50	64	282749.46	80	61034.12
16	9729984.55	23	2769455.38	53	520124489.38	2	605033.06	65	276003.82	185	965854495.22
17	7245335.27	46	36967288.17	54	535763529.38	3	637595.18	66	277740.30	186	600390309.10
38	6187135.11	69	7699815.44	55	559156478.63	4	877275.40	67	280006.16	187	662462200.01
39	5695261.21	105	205102416.81	56	505887308.06	5	681679.17	68	258840.78	188	3775908916.15
40	6064546.69	106	179134333.03	697	481200252.72	18	137571.93	100	56040.87	189	500597184.05
83	3322727638.28	107	219264274.61	698	473227337.16	19	129858.07	101	57448.10	488	778558872.94
84	2720588538.01	129	175850054.13	699	499759614.72	20	79595.46	102	55857.77	489	498203468.76
85	16545662.95	195	1565346.91	726	18421199.99	21	72069.30	103	54305.06	490	521577339.90
86	504897110.67	196	444541370.54	727	18661466.37	22	110630.82	104	55973.43	491	476269794.11
87	3069443966.19	197	3576996632.75	728	16716550.54	41	111782.33	124	349540.95	492	528049983.18
160	4350151.50	198	839587.64	729	14337679.58	42	71858.85	125	345483.28	531	1047202.86
161	4035880.07	199	376200188.02	730	13528540.49	43	69793.78	126	301073.15	532	780615.65
162	3897537.79	333	188022244.05	810	10937987.26	44	70652.28	127	291879.03	533	968266.08
163	3910697.95	334	513006.38	811	11076712.63	45	86151.14	128	327498.09	534	953193.66
164	4010204.29	459	1043075.43	812	10047046.26	62	144669.40	170	2262698.24	535	1017173.98
288	1235536902.69	460	116131032.93	813	11324380.31	63	175336.68	171	2145508.73	620	65032368.35
289	4067477991.25	461	233810857.5	814	11526341.16	81	180080.37	172	2151178.76	621	92250151.93
290	1404309165.65	462	720658.1685	840	460762378.90	82	256905.14	173	2023749.43	622	86471783.75
291	3576996632.75	528	15838084.92	841	432624834.34	88	102936.32	174	1940346.32	623	94358119.97

Tal prueba, no mostró un patrón totalmente identificable, por lo que se procedieron a más pruebas.

Décima prueba:

Tabla 15. Mitad de resultados de valores de energía con recorte de vectores estandarizados a medio segundo

	Total	A8	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
AC										
15	11559749.34 100.0000%	8169479.828 70.6718%	0.381279883 0.0000%	0.950426979 0.0000%	3.796876574 0.0000%	53.20490719 0.0005%	832.9363428 0.0072%	36197.07654 0.3131%	1176576.243 10.1782%	2176604.922 18.8292%
16	10981310.91 100.0000%	7761159.666 70.6761%	2.465823291 0.0000%	12.87672745 0.0001%	22.83042627 0.0002%	280.9666596 0.0026%	896.956981 0.0082%	37851.61144 0.3447%	1183211.767 10.7748%	1997871.771 18.1934%
17	10927884.16 100.0000%	7630861.237 69.8293%	0.500662736 0.0000%	0.936849485 0.0000%	5.576875725 0.0001%	69.62518994 0.0006%	896.1034024 0.0082%	36775.03002 0.3365%	1228758.627 11.2443%	2030516.519 18.5811%
38	7202454.071 100.0000%	5068962.341 70.3783%	1.352788964 0.0000%	4.265037373 0.0001%	5.418590755 0.0001%	65.24693185 0.0009%	584.2947332 0.0081%	22008.56887 0.3056%	716617.4134 9.9496%	1394205.17 19.3574%
39	9103975.763 100.0000%	6401263.94 70.3128%	1.376791484 0.0000%	6.937053661 0.0001%	17.87600398 0.0002%	151.8420166 0.0017%	1254.201677 0.0138%	31791.90835 0.3492%	1035534.033 11.3745%	1633953.649 17.9477%
40	6748959.079 100.0000%	4735713.011 70.1695%	1.427316939 0.0000%	6.627227357 0.0001%	10.12474543 0.0002%	127.4255591 0.0019%	384.5079726 0.0057%	22917.67578 0.3396%	739348.2958 10.9550%	1250449.984 18.5280%
83	3322734215 100.0000%	2216578510 66.7095%	445.301521 0.0000%	580.5326588 0.0000%	2229.03697 0.0001%	21115.44868 0.0006%	277238.3314 0.0083%	13007805.26 0.3915%	425374822.5 12.8020%	667471468.5 20.0880%
84	3008414696 100.0000%	2005193468 66.6528%	706.3831568 0.0000%	2229.26485 0.0001%	4078.604207 0.0001%	46476.88586 0.0015%	301161.2713 0.0100%	11209530.33 0.3726%	361300075 12.0096%	630356969.8 20.9531%
85	23121056.97 100.0000%	16661354.01 72.0614%	2.383659925 0.0000%	3.528789138 0.0000%	10.00221182 0.0000%	99.37072748 0.0004%	2099.245281 0.0091%	75539.25964 0.3267%	2413956.463 10.4405%	3967992.703 17.1618%
86	2477998032 100.0000%	1675993130 67.6350%	308.1279152 0.0000%	420.6981049 0.0000%	1481.349058 0.0001%	15228.94573 0.0006%	207856.596 0.0084%	9226070.822 0.3723%	338765419.7 13.6709%	453788116.6 18.3127%

Décima primera prueba:

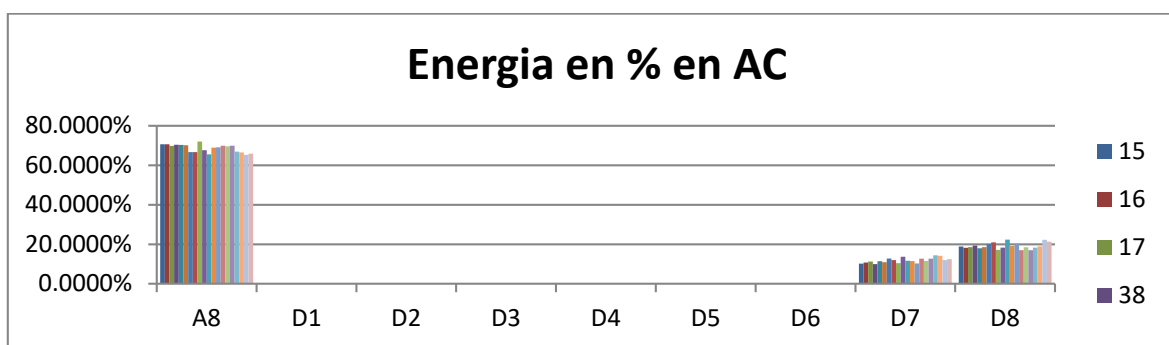


Figura 78. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de AC para medio segundo

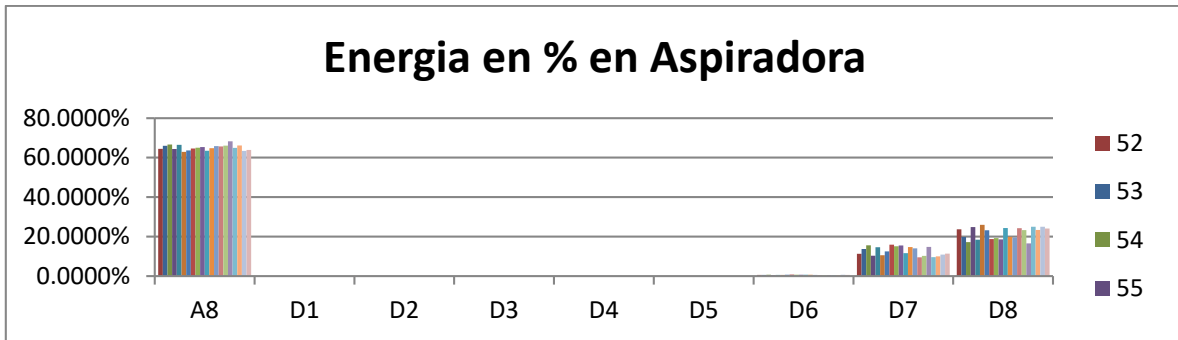


Figura 79. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de aspiradoras para medio segundo

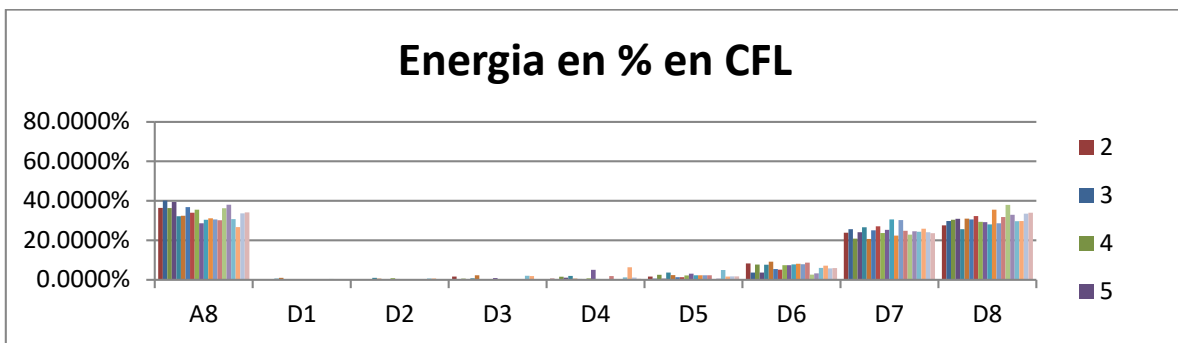


Figura 80. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de CFL para medio segundo

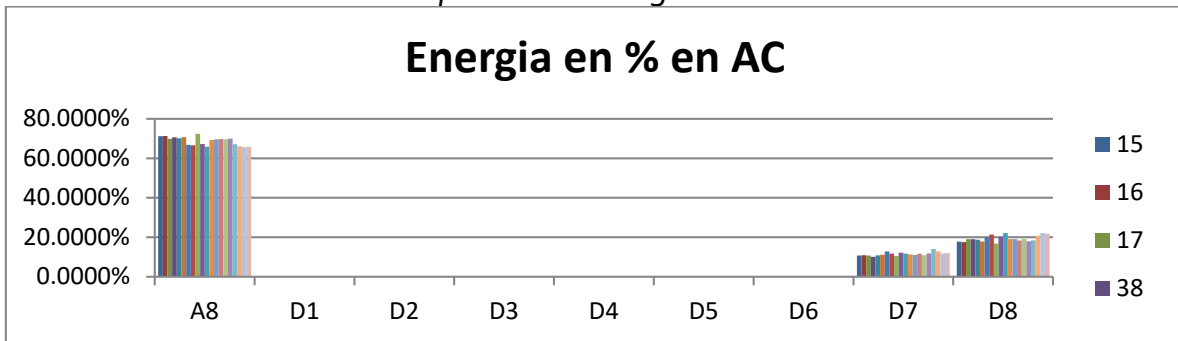


Figura 81. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de AC para un segundo

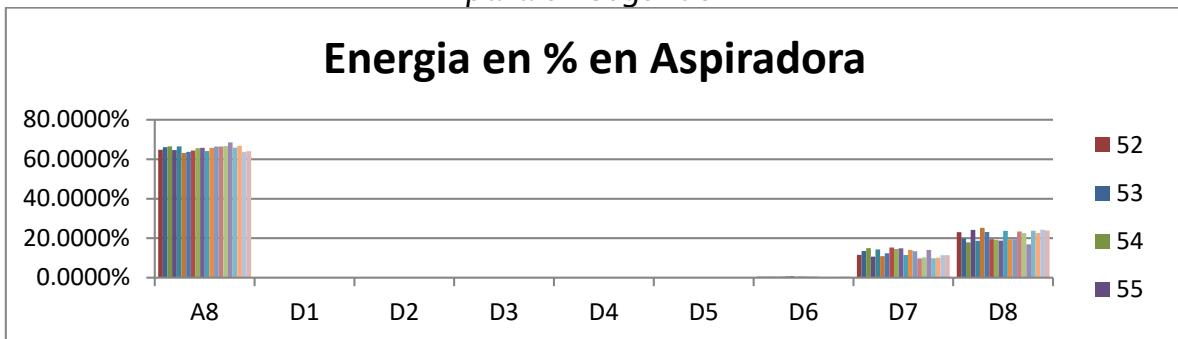


Figura 82. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de aspiradora para un segundo

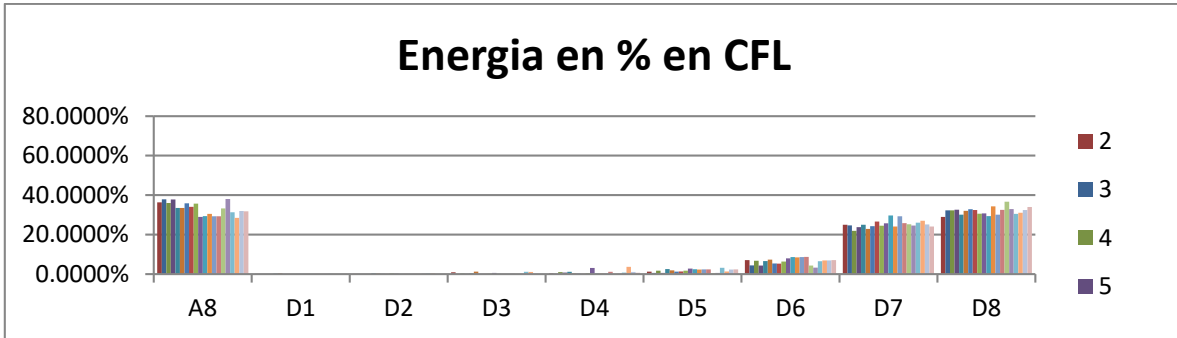


Figura 83. Gráfica con niveles de energía en porcentajes con equipos de CFL para un segundo

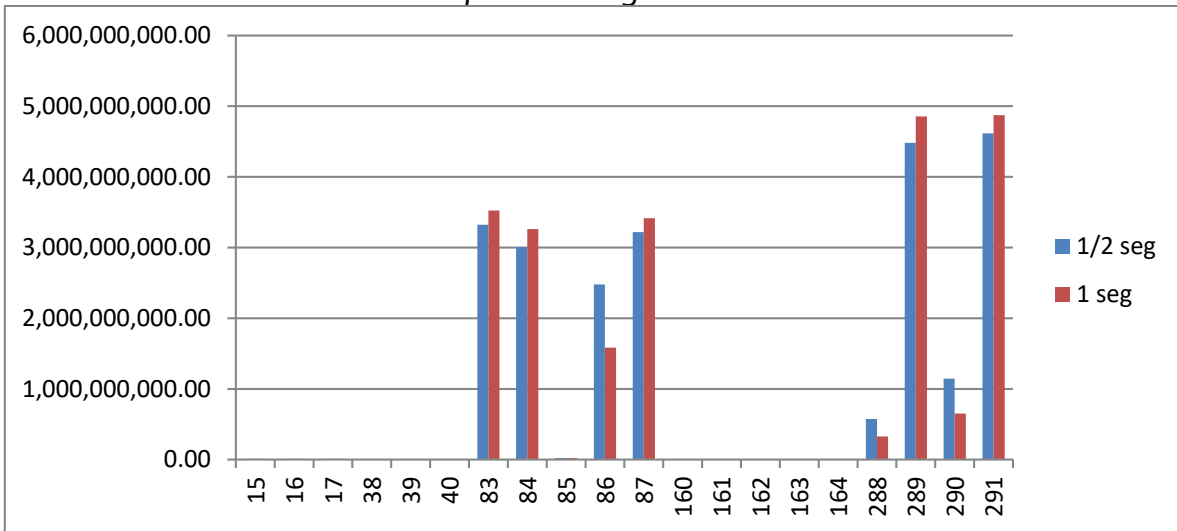


Figura 84. Niveles de energía totales en equipos de AC

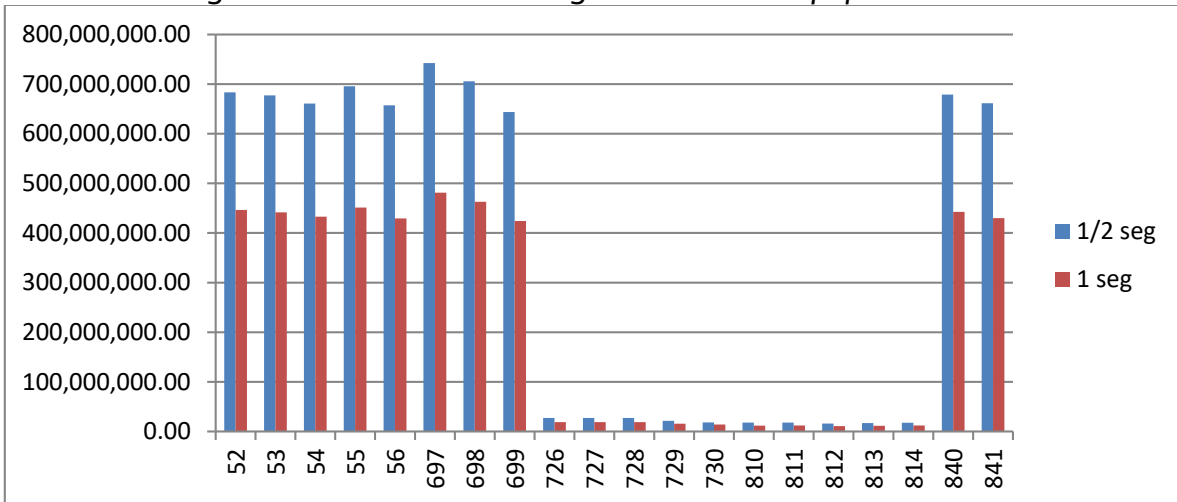


Figura 85. Niveles de energía totales en equipos de aspiradoras

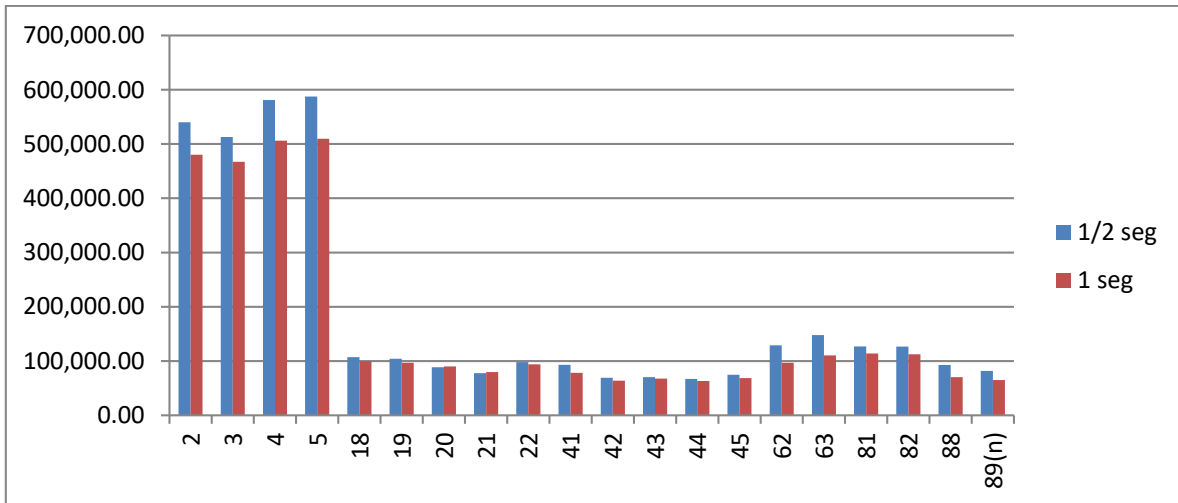


Figura 86. Niveles de energía totales en equipos de CFL

En esta prueba, se vio que para el caso de las lámparas fluorescentes compactas, el nivel en porcentaje del detalle 6, siempre supero el 2%, a diferencia de todos los demás equipos; lo cual dio pie a una identificación definitiva para este tipo de cargas.

Décima segunda prueba:

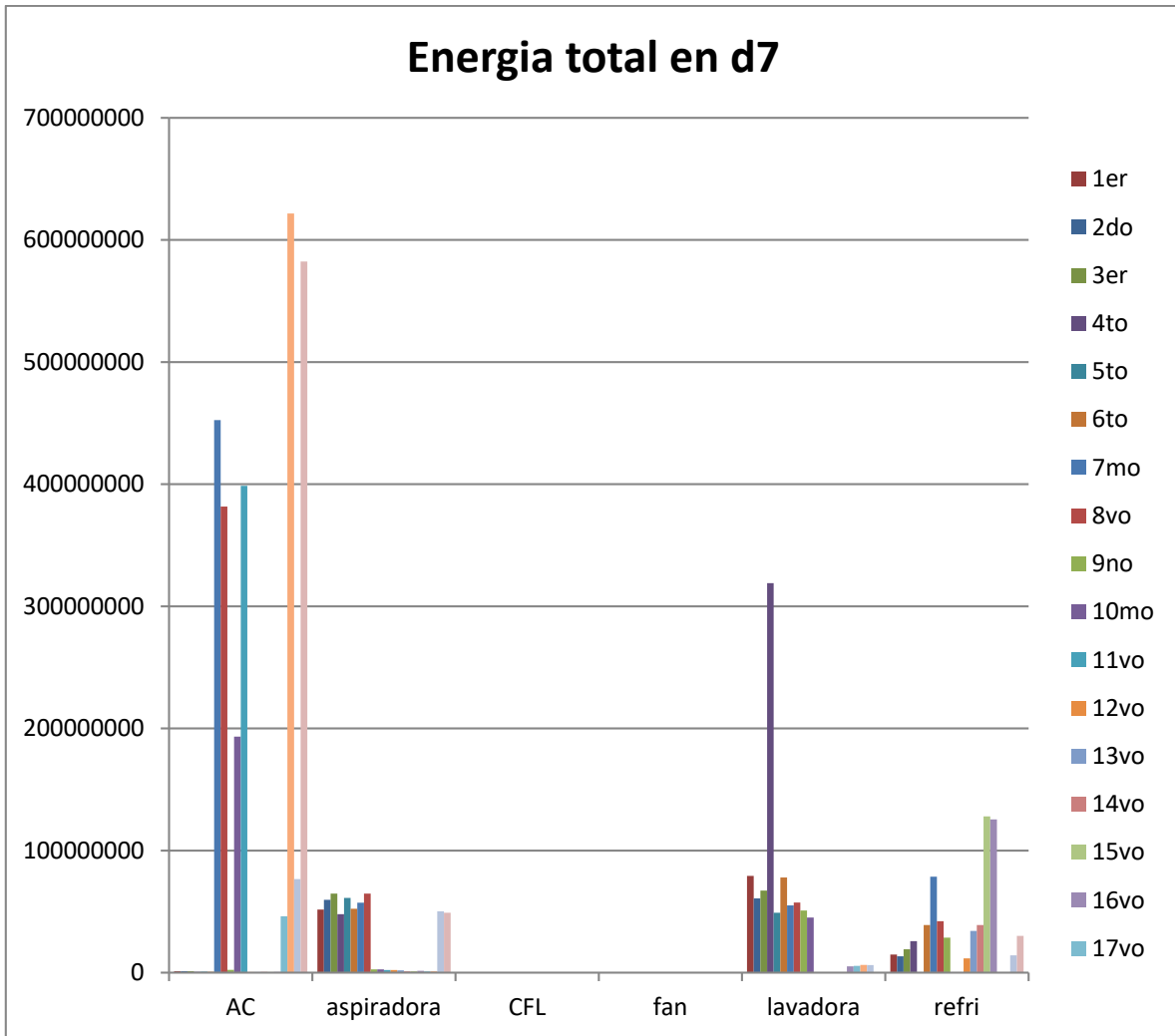


Figura 87. Niveles de energía totales de D7

En tal prueba se esperaba encontrar algún distintivo en las lavadoras, pero no se encontró nada excluyente con respecto a los demás equipos, por lo cual se procedió a mas pruebas.

Décima tercera prueba:

Clase 0: Aire acondicionado

Clase 1: Abanico

Clase 2: Refrigerador

Clase 3: Aspiradora

Tabla 16. Fragmento de cálculo de índices de Gini ponderados

tipo	id	punto medio	energía total	clase	<	>=	Tipo de clase	gini(a)	gini(WA)
fan	102	38,823.39	38,201.24	1	0	8	0	0	0.77584204

fan	100	39,445.54	1	1	9	1	
				0	8	2	
				0	10	3	gini(b)
				0	6	4	0.79476502
				0	8		gini(a)
				2	8		gini(WA)
	39,447.83			0	8	1	
				0	8	2	0.75714286
				0	10	3	gini(b)
fan	101	39,450.11	1	4	6	4	0.795
				0	8		gini(a)
				0	8		gini(WA)
				3	7	0	
	124,053.52			1	8	1	
				2	8	2	0.73748474
				0	10	3	gini(b)
				0	6	4	0.79421433
				0	8		gini(a)
				0	8		gini(WA)
fan	65	208,656.93	1	0	8	0	
				4	6	1	
				0	8	2	0.71679198
	210,909.89			0	10	3	gini(b)
				0	6	4	0.79224377
fan	67	213,162.85	1				

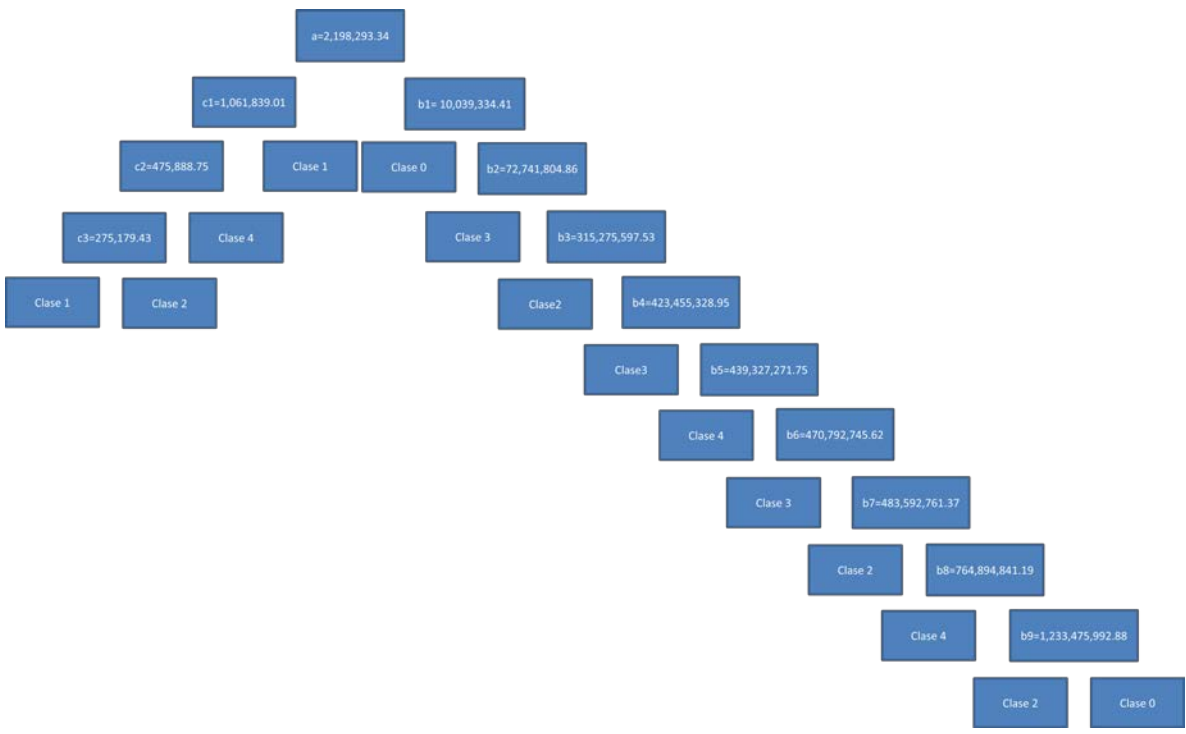


Figura 88. Árbol de decisión final

Tabla 17. Resultados de árbol de decisión

	AC		ASP		FAN			
38	5,068,962.34	Clase 0	52	440,526,566.46	Clase 3	64	207,738.45	Clase 1
39	6,401,263.94	Clase 0	53	447,020,171.79	Clase 3	103	38,974.38	Clase 1
40	4,735,713.01	Clase 0	54	440,117,912.43	Clase 3	104	38,942.82	Clase 1
83	2,216,578,509.93	Clase 0	810	11,635,282.11	Clase 3	124	269,325.52	Clase 1
162	3,178,574.22	Clase 0	811	11,792,830.65	Clase 3	125	257,915.45	Clase 1
163	2,997,666.64	Clase 0	812	10,938,671.45	Clase 3	126	259,111.06	Clase 1
164	3,348,381.30	Clase 0	813	11,055,917.86	Clase 3	127	254,253.94	Clase 1

289	2,982,960,548.77	Clase 0	814	11,691,801.60	Clase 3	128	255,415.80	Clase 1
291	3,040,013,971.14	Clase 0	840	430,632,854.23	Clase 4	173	1,469,087.94	Clase 1
			841	422,847,417.60	Clase 3	174	1,460,730.24	Clase 1
	LAV			REFRI				
185	709,885,914.78	Clase 4	105	176,929,892.88	Clase 2			
186	516,062,255.24	Clase 4	106	169,328,607.56	Clase 2			
187	437,091,698.73	Clase 4	107	209,598,773.73	Clase 2			
189	501,084,674.10	Clase 4	129	168,943,098.92	Clase 2			
534	606,428.64	Clase 4	199	491,911,499.96	Clase 4			
535	671,421.31	Clase 4	333	140,133,393.48	Clase 2			
624(n)	700,800.70	Clase 4	334	341,717.87	Clase 2			
			460	141,701,467.19	Clase 2			
			632(n)	471,640,674.88	Clase 2			

En esta última prueba, se presenta un porcentaje de aciertos de 95.5%, el cual resultó muy confiable para los fines de identificación.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

-El prototipo indicado en la propuesta de solución fue insuficiente, debido a la falta de librerías necesarias en python para el manejo de las señales de los sensores propuestos, por lo cual fue modificada esa parte, por un ADC con documentación existente y transductores de voltaje-voltaje y corriente-voltaje.

-Las frecuencias de muestreo que mejor reflejaban cambios en magnitud en diferentes niveles de detalle de la transformada de ondoleta, son de alrededor de 25 a 30 kM/s.

-Los vectores de potencia (a diferencia de los de corriente), muestran mejores características de magnitud para la identificación de cargas.

-La ondoleta madre Daubechies 3, es suficiente para notar los cambios en magnitud en diferentes niveles de detalles.

-Es posible implementar la transformada de ondoleta, por medio de convolución digital (FIR) de la señal de entrada con los filtros de las ondoletas madre con más del 99.93% de eficacia.

-El teorema de Parseval muestra detalles ocultos muy útiles para la identificación de cargas.

-Las lámparas fluorescentes compactas, muestran mayores magnitudes de energía en sus niveles de detalles (con respecto al total), que el resto de los equipos, por lo cual son los equipos más fácil de identificar con el 100% de aciertos.

-Es necesario utilizar un número de muestras específico para la identificación de cargas, siendo, el de medio segundo (15,000 muestras) suficiente para la identificación.

-El uso de la transformada discreta de ondaleta, el teorema de Parseval, y un árbol de regresión y clasificación, es suficiente para la identificación de cargas eléctricas con un porcentaje de aciertos del 95.5%, presentando solamente errores en un equipo de refrigerador y uno de aspiradora.

5.2 Trabajos futuros.

-Es necesario realizar pruebas sobre cargas locales, para tener un mejor registro de marcas y potencias consumidas por los equipos.

-Realizar pruebas de muestreo con el hardware propuesto por la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A. de C.V.

-Continuar con la integración de la identificación de cargas al medidor Bidireccional producido por la empresa mencionada.

Referencias Bibliográficas

- [1] Honorable Congreso de la union, “LEY PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LA ENERGÍA,” 2008.
- [2] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Department of energy, “Energy Conservation Standards for New Federal Commercial and Multi-Family High-Rise Residential Buildings,” vol. 72, no. 245, pp. 3–9, 2007.
- [3] Department for Communities and Local Government: London, “Building Regulations. Energy efficiency requirements for new dwellings,” 2007.
- [4] K. Chmutina, “BUILDING ENERGY CONSUMPTION AND ITS REGULATIONS IN CHINA.” The University of Nottingham, China Policy Institute, 2010.
- [5] EL PARLAMENTO EUROPEO Y EL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, “DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.” Diario Oficial de la Unión Europea, 19 de mayo 2010, p. L 153/13 – L 153/35, 2010.
- [6] H. Chang, K. Lian, Y. Su, and W. Lee, “Power-Spectrum-Based Wavelet

- Transform for Nonintrusive Demand Monitoring and Load Identification,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 2081–2089, 2014.
- [7] M. E. Berges, E. Goldman, H. S. Matthews, and L. Soibelman, “Enhancing electricity audits in residential buildings with nonintrusive load monitoring,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 14, no. 5, pp. 844–858, 2010.
- [8] H. H. Chang, K. L. Chen, Y. P. Tsai, and W. J. Lee, “A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 764–771, 2012.
- [9] M. D. Gillman, J. S. Donnal, J. Paris, S. B. Leeb, M. A. H. El Sayed, K. Wertz, and S. Schertz, “Energy accountability using nonintrusive load monitoring,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 6, pp. 1923–1931, 2014.
- [10] K.-L. Chen, H.-H. Chang, and N. Chen, “A new transient feature extraction method of power signatures for Nonintrusive Load Monitoring Systems,” *2013 IEEE Int. Work. Appl. Meas. Power Syst.*, pp. 79–84, 2013.
- [11] J. Moron, *Señales y sistemas*, 1st ed. Maracaibo, Venezuela: Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta, 2011.
- [12] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete Time Signal Processing Oppenheim.*, 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [13] M. Misiti, J. Poggi, Y. Misiti, and G. Oppenheim, *Wavelet Toolbox™ User’s Guide*, 4th ed. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2009.
- [14] D. L. Fugal, *Conceptual Wavelets In Digital Signal Processing*. San Diego, California: Space & Signals Technical Publishing, 2009.
- [15] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 2008.
- [16] A. Rodriguez Penin, *SISTEMAS SCADA*, 2nd ed. Barcelona, Spain: MARCOMBO, EDICIONES TECNICAS, 2007.

- [17] W. H. Hayt Jr, J. E. Kemmerly, and S. M. Durbin, *ENGINEERING CIRCUIT ANALYSIS*, 8th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [18] J. M. Gillis, S. Member, S. M. Alshareef, S. Member, and W. G. Morsi, "Nonintrusive Load Monitoring Using Wavelet Design and Machine Learning," pp. 1–9, 2015.
- [19] S. I. Kim, H. S. Kim, Y. J. Joo, and J. H. Kim, "Power usage pattern and consumption separation method by load devices based on remote metering system's Load profile data," in *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, 2011, pp. 1669–1671.
- [20] M. Zeifman and K. Roth, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring : Review and Outlook," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 76–84, 2011.
- [21] J. M. Ramirez Cortés, "Wavelets 1." [Online]. Available: www-elec.inaoep.mx/~jmram/pds09/wavelets1.ppt.
- [22] J. M. Ramirez Cortés, "Wavelets2." [Online]. Available: www-elec.inaoep.mx/~jmram/pds09/wavelets2.ppt.
- [23] Ç. Kocaman and M. Özdemir, "Comparison of Statistical Methods and Wavelet Energy Coefficients for Determining Two Common PQ Disturbances : Sag and Swell," in *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on*, 2009, pp. 80–84.
- [24] M. D. Salwani and Y. Jasmy, "Relative Wavelet Energy as a tool to select suitable wavelet for artifact removal in EEG," in *Computers, Communications, & Signal Processing with Special Track on Biomedical Engineering, 2005. CCSP 2005. 1st International Conference on*, 2005, pp. 282–287.

Anexo. Construcción de árbol de regresión y clasificación.

En este apartado, se muestra el proceso completo para la construcción del árbol de regresión y clasificación, el cual fue utilizado para la identificación de cargas eléctricas por medio del valor de energía de la transformada de ondoleta del vector de potencia, con un nivel de aproximación 8 (A8).

Como se mencionó en el cuerpo del documento, fueron tomadas las primeras quince mil muestras (medio segundo) de los siguientes equipos de la base de datos en <http://plaidplug.com/>: aires acondicionados, 15, 16, 17, 38, 39, 40, 83, 84, 86, 87, 160, 161, 162, 163, 164, 289, 291; aspiradoras, 52, 53, 54, 55, 56, 697, 698, 699, 726, 727, 728, 729, 730, 810, 811, 812, 813, 814, 840, 841; abanicos, 64, 65, 66, 67, 68, 100, 101, 102, 103, 104, 124, 125, 126, 127, 128, 170, 171, 172, 173, 174; lavadoras, 185, 186, 187, 189, 488, 489, 490, 531, 532, 533, 534, 535, 624; y refrigeradores, 105, 106, 107, 129, 195, 196, 199, 333, 334, 460, 632, 634, 635, 686, 710, 922, 933; y a cuyos vectores de potencia se les aplicó la transformada discreta de ondoleta, seguido por el cálculo de energía del nivel A8.

De los equipos anteriores, se utilizaron los siguientes equipos para la construcción del árbol:

Tabla A.1 equipos para construcción de árbol

ID	EQ
----	----

15	AC
16	AC
17	AC
84	AC
86	AC
87	AC
160	AC
161	AC
55	ASP
56	ASP
697	ASP
698	ASP
699	ASP
726	ASP
727	ASP
728	ASP
729	ASP
730	ASP
65	FAN
66	FAN
67	FAN
68	FAN
100	FAN
101	FAN
102	FAN
170	FAN
171	FAN
172	FAN
488	LAV
489	LAV
490	LAV
531	LAV
532	LAV
533	LAV
195	REFRI
196	REFRI
634	REFRI
635	REFRI
686	REFRI
710	REFRI
922	REFRI
933	REFRI

Como se menciona en el capítulo 3, primero se ordenan los equipos en magnitud ascendente, mostrado en la tabla A.2, además se les asignó una clase a cada tipo de carga: Aire acondicionado (AC), clase 0; abanico (FAN), clase 1; refrigerador (REFRI), clase 2; aspiradora (ASP), clase 3; lavadora (LAV), clase 4.

Tabla A.2 Ordenamiento de equipos por magnitud de energía de A8

Lista por equipos			Lista por magnitud		
ID	A8	EQ	ID	A8	EQ
15	8,169,479.83	AC	102	38,201.24	FAN
16	7,761,159.67	AC	100	39,445.54	FAN
17	7,630,861.24	AC	101	39,450.11	FAN
84	2,005,193,467.89	AC	65	208,656.93	FAN
86	1,675,993,129.55	AC	67	213,162.85	FAN
87	2,110,081,703.52	AC	68	213,162.85	FAN
160	2,822,611.80	AC	66	213,870.32	FAN
161	3,069,419.38	AC	710	336,488.53	REFRI
55	447,641,007.82	ASP	686	360,021.42	REFRI
56	447,641,007.82	ASP	533	591,756.08	LAV
697	467,352,640.29	ASP	532	599,232.06	LAV
698	449,203,768.82	ASP	531	678,670.54	LAV
699	415,897,122.23	ASP	171	1,445,007.47	FAN
726	17,692,513.34	ASP	172	1,500,221.12	FAN
727	17,709,408.16	ASP	170	1,573,974.88	FAN
728	17,208,370.78	ASP	160	2,822,611.8	AC
729	13,944,492.35	ASP	161	3,069,419.38	AC
730	11,909,188.99	ASP	17	7,630,861.24	AC
65	208,656.93	FAN	16	7,761,159.67	AC
66	213,870.32	FAN	15	8,169,479.83	AC
67	213,162.85	FAN	730	11,909,188.99	ASP
68	213,162.85	FAN	729	13,944,492.35	ASP
100	39,445.54	FAN	728	17,208,370.78	ASP
101	39,450.11	FAN	726	17,692,513.34	ASP
102	38,201.24	FAN	727	17,709,408.16	ASP
170	1,573,974.88	FAN	922	127,774,201.55	REFRI
171	1,445,007.47	FAN	195	168,943,098.92	REFRI
172	1,500,221.12	FAN	933	214,654,072.82	REFRI
488	761,943,338.96	LAV	699	415,897,122.23	ASP
489	431,013,535.67	LAV	489	431,013,535.67	LAV
490	492,952,671.79	LAV	55	447,641,007.82	ASP

531	678,670.54	LAV	56	447,641,007.82	ASP
532	599,232.06	LAV	698	449,203,768.82	ASP
533	591,756.08	LAV	697	467,352,640.29	ASP
195	168,943,098.92	REFRI	196	474,232,850.94	REFRI
196	474,232,850.94	REFRI	490	492,952,671.79	LAV
634	790,958,856.20	REFRI	488	761,943,338.96	LAV
635	767,846,343.41	REFRI	635	767,846,343.41	REFRI
686	360,021.42	REFRI	634	790,958,856.2	REFRI
710	336,488.53	REFRI	86	1,675,993,129.55	AC
922	127,774,201.55	REFRI	84	2,005,193,467.89	AC
933	214,654,072.82	REFRI	87	2,110,081,703.52	AC

Después, para medir las impurezas de los nodos, se obtienen los índices de Gini de todos los equipos, para después obtener los promedios ponderados de sus valores intermedios como se muestra en la tabla A.3.

Tabla A.3 Calculo de impurezas de los nodos

tipo	id	punto medio	energía total	clase	<	>=	Tipo de clase		
fan	102	38,201.24	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				1	9	1		0	
				0	8	2			
				0	10	3			
		38,823.39		0	6	4		gini(b)	
								0.79476502	0.77584204
fan	100	39,445.54	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				2	8	1		0	
				0	8	2			
				0	10	3			
		39,447.83		0	6	4		gini(b)	
								0.795	0.75714286
fan	101	39,450.11	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				3	7	1		0	
				0	8	2			
				0	10	3			
		124,053.52		0	6	4		gini(b)	
								0.79421433	0.73748474
fan	65	208,656.93	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				4	6	1		0	
				0	8	2			
				0	10	3			
		210,909.89		0	6	4		gini(b)	
								0.79224377	0.71679198
fan	67	213,162.85	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				5	5	1		0	
				0	8	2			
				0	10	3			
		213,162.85		0	6	4		gini(b)	
								0.78889701	0.69498069
fan	68	213,162.85	1	0	8	0		gini(a)	gini(WA)
				6	4	1		0	
				0	8	2			
				0	8	2			
		213,516.59							0.67195767

				2	6	0	0.59515571	
				10	0	1		0.6637535
		5,350,140.31		2	6	2		
				0	10	3	gini(b) 0.7104	
AC	17		7,630,861.24	0	3	3	gini(a) 0.62345679	gini(WA)
					3	5		
					10	0		0.66997354
		7,696,010.46			2	6	gini(b) 0.70486111	
AC	16		7,761,159.67	0	3	3	gini(a) 0.64265928	gini(WA)
					4	4		
					10	0		0.6716792
		7,965,319.75			2	6	gini(b) 0.69565217	
AC	15		8,169,479.83	0	3	3	gini(a) 0.655	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.66904762
		10,039,334.41			2	6	gini(b) 0.68181818	
asp	730		11,909,188.99	3	3	3	gini(a) 0.68480726	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.6893424
		12,926,840.67			2	6	gini(b) 0.69387755	
asp	729		13,944,492.35	3	3	3	gini(a) 0.70661157	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.70584416
		15,576,431.57			2	6	gini(b) 0.705	
asp	728		17,208,370.78	3	3	3	gini(a) 0.7221172	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.71875341
		17,450,442.06			2	6	gini(b) 0.71468144	
asp	726		17,692,513.34	3	3	3	gini(a) 0.73263889	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.7281746
		17,700,960.75			2	6	gini(b) 0.72222222	
asp	727		17,709,408.16	3	4	6	gini(a) 0.7392	gini(WA)
					3	3		
					5	3		0.73411765
		72,741,804.86			10	0	gini(b) 0.7266436	
refri	922(n)		127,774,201.55	2	3	3	gini(a) 0.75147929	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.74496337
		148,358,650.24			3	5	gini(b) 0.734375	
refri	195		168,943,098.92	2	3	3	gini(a) 0.75994513	gini(WA)
					5	3		
					10	0		0.75202822
		191,798,585.87			4	4		

				5	3	0	0.78531856	
				10	0	1		
		779,402,599.81		7	1	2		0.7462406
				10	0	3	gini(b) 0.375	
refri	634(n)		790,958,856.20	2	6	0	gini(a) 0.78632479	gini(WA)
					5	3		
					10	0		
					8	0		0.73015873
					10	0	gini(b) 0	
					6	0		
AC	86		1,675,993,129.55	0	6	2	gini(a) 0.79	gini(WA)
					10	0		
					8	0		0.75238095
					10	0	gini(b) 0	
					6	0		
AC	84		2,005,193,467.89	0	7	1	gini(a) 0.79238548	gini(WA)
					10	0		
					8	0		0.77351916
					10	0	gini(b) 0	
					6	0		
AC	87		2,110,081,703.52	0				

En la tabla se aprecia el punto de ruptura (a), el cual muestra el menor promedio ponderado; se muestran, además, los puntos medios en los que las clases cambian (b) (c), los cuales constituyen los demás puntos de decisión en el árbol.

Con la información anterior, se procede, a realizar el árbol, el cual resulta como se muestra:

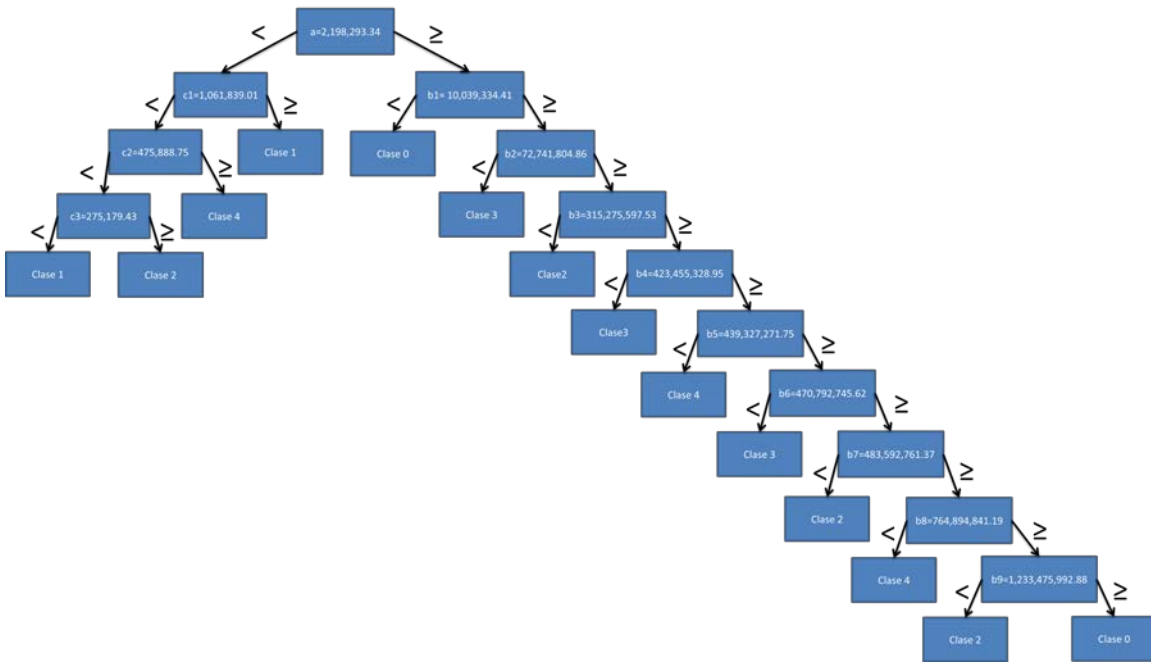


Figura A.1 Árbol de decisión final