

C1

ANALIZADORES DE RED DE BAJO COSTE

Torres García, Fco. Javier; Bravo Rodríguez, Juan Carlos; Borrás Talavera, María Dolores. Grupo de investigación en Ingeniería Eléctrica (INVESPO). Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El uso masivo de dispositivos electrónicos, tanto en entornos domésticos como industriales, tiene un impacto directo e inmediato en la creciente y compleja red de distribución eléctrica a la que se conectan. De aquí la necesidad de analizar la calidad de la señal eléctrica y su energía asociada en la propia red e instalaciones afectadas.

Por otra parte, la evolución exponencial de microcontroladores y micro PC'S y su aplicación al procesamiento de señales, convierte a estos dispositivos en candidatos excepcionales para cubrir la mencionada necesidad del análisis de la calidad eléctrica. Esta es justamente la propuesta que se hace en este trabajo.

La detección de las perturbaciones eléctricas de mayor incidencia en la calidad de la señal de red se puede realizar de diferentes formas. En este caso, se propone el uso de una potente herramienta matemática como es la Transformada Wavelet (TW), con una contrastada aplicabilidad en este campo. Su traducción a nivel de programación mediante un complejo algoritmo es implementada en dispositivos de bajo coste, particularmente en Arduino y Raspberry Pi. A partir de este algoritmo es posible la detección, análisis y clasificación de distintas perturbaciones eléctricas de forma más intuitiva.

Se ha diseñado un sistema capaz de adquirir y analizar la señal de la tensión eléctrica y monitorizar dichos resultados, demostrando la aptitud de estos sistemas de bajo coste para dicho análisis.

Palabras clave: "Power Quality", "Wavelet", "Electrical disturbances", "Low cost devices".

ABSTRACT

The massive use of electronic devices, both in domestic and industrial environments, has a direct and immediate impact on the electrical network in which they are connected. This fact generates the need for a power quality analysis in the electrical distribution network and affected installations.

On the other hand, the exponential evolution of microcontrollers and micro PC'S and their application to signal processing, makes these devices exceptional candidates to cover the aforementioned power quality analysis. This is precisely the proposal made in this work.

The detection of electrical disturbances with greater incidence in power quality can be made in different ways. In this case, the use of a powerful mathematical tool such as the Wavelet Transform (WT), with a proven applicability in this field, is proposed. Its translation at the programming level through a complex algorithm is implemented in low cost devices, particularly in Arduino and Raspberry Pi. From this algorithm it is possible to detect, analyze and classify different electrical disturbances in a more intuitive way.

A system capable of acquiring and analyzing the voltage signal, as well as monitoring the results, has been designed, showing the capacity of these low cost devices for such analysis.

Keywords: "Power Quality", "Wavelet", "Electrical disturbances", "Low cost devices".

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción

Los innumerables dispositivos electrónicos que facilitan múltiples tareas cotidianas tienen un impacto directo en la red de suministro eléctrico que los alimentan. Estos dispositivos causan diferentes

perturbaciones en la señal eléctrica con variados efectos, que van desde molestias visuales en las personas que comparten un espacio iluminado artificialmente, hasta el salto intempestivo de protecciones eléctricas, pasando por daños o malfuncionamiento de sistemas de control, etc. Por tanto, dado que estas perturbaciones causan efectos adversos y considerables pérdidas económicas, se hace necesario su análisis y caracterización para tomar medidas que puedan mitigar su efecto.

Para el procesamiento de estas señales eléctricas se ha propuesto el uso de la Transformada Wavelet (TW), debido fundamentalmente a que es capaz de realizar un análisis multirresolución (MRA), tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, para localizar de forma precisa los eventos que alteran la calidad eléctrica.

Estado de la cuestión

Wavelets

La bibliografía sobre la TW en el análisis de perturbaciones eléctricas comienza a finales del siglo XX (1994-1995). Sin embargo, en lo que se refiere a su aspecto matemático, no es un método novedoso, ya que se conocía con anterioridad a esta fecha.

La TW, objeto principal de este proyecto, fue el resultado de numerosas investigaciones. Fue Jean Morlet el primero que, investigando un método para modelar la propagación del sonido a través de la corteza terrestre, descubrió este nuevo método matemático que no tenía las limitaciones de la Transformada de Fourier (TF).

Posteriormente, un matemático también francés llamado Yves Meyer [6] descubrió que estas funciones Wavelets formaban bases ortonormales caracterizadas por tener contenido energético finito. Estas bases ortonormales fueron estudiadas y definidas por Ingrid Daubechies [7]. Sin embargo, el encargado de relacionar los bancos de filtros en cuadratura con estas bases ortonormales fue Stephane Mallat [8]. Mallat y Meyer fueron los precursores de la construcción de wavelets tal y como la conocemos hoy en día, gracias a su Análisis Multirresolución (MRA).

A partir de este descubrimiento de Mallat, se hace un avance decisivo en el análisis de señales mediante procesamiento digital. Además, es a partir de este momento cuando se comienza a investigar en la incorporación de esta nueva herramienta en distintos campos de aplicación, como la compresión de imágenes, la detección de terremotos, etc.

Calidad de la señal eléctrica

Tradicionalmente, el análisis de la calidad eléctrica se realiza desde dos estados de la señal bien diferenciados: el estado estacionario y el estado transitorio o no estacionario. El primero de ellos puede ser debido principalmente a la distorsión armónica, por lo que para su análisis se aplica la TF, mientras que para el estado no estacionario se utiliza la TW que es objeto de este trabajo.

Como se explicará con posterioridad, la TW empleada para la detección de fallos en la señal eléctrica ofrece una mayor resolución en el tiempo para altas frecuencias y una mayor resolución en frecuencia para componentes de baja frecuencia. Por ello es el método más apropiado para detectar fallos eléctricos no estacionarios. Sin embargo, los resultados están fuertemente condicionados por la óptima elección de la función wavelet base [35].

Por tanto, la TW se presenta como un método efectivo para detectar y localizar distintas perturbaciones eléctricas [34], clasificarlas con el apoyo de la inteligencia artificial [15], e incluso para calcular distintos términos de potencia [22], [23], [3].

En particular, la TW implementada en este proyecto sigue las directrices que proporciona un algoritmo propuesto en un trabajo referente en este campo [2].

Índices de calidad

Para poder efectuar este análisis se hace necesaria la utilización de unos índices de calidad, mediante los cuales pueda realizarse una caracterización de forma rápida y simple.

Tradicionalmente se han usado diferentes índices para la cuantificación de dicha calidad de la señal eléctrica. En [38] y [39] se muestran los índices de calidad más comunes para la cuantificación de dicha calidad eléctrica hasta el momento. Sin embargo, tienen el inconveniente de la utilización solo para régimen estacionario.

Debido a la gran difusión y utilización del método de la Transformada Wavelet para el análisis no estacionario, se hace necesario que en se redefinan los índices de calidad utilizados hasta el momento [39].

En la actualidad, han surgido otros índices de calidad de la señal eléctrica. En particular, en este proyecto se utiliza el índice de calidad propuesto en [5], llamado Distorsión Transitoria Instantánea (ITD), mediante el cual se pueden detectar las perturbaciones eléctricas y representarlas gráficamente, de forma rápida y simple.

Implementación en dispositivos inteligentes

El desarrollo e investigación acerca de medidores eléctricos inteligentes es algo muy usual hoy día, tal y como podemos observar en [13] y [15]. El papel de estos dispositivos en las redes de distribución inteligentes (Smart Grid) es crucial. La capacidad que ofrecen de conocer en tiempo cuasi real las potencias asociadas a las diferentes cargas eléctricas que se distribuyen por la red, y realizar estas medidas de forma sincrónica constituyen un hito sin precedentes [14], [16], [17] y [18]. La versatilidad de estos dispositivos es incuestionable, ya que además permiten la recogida de datos remotos según diferentes protocolos de comunicaciones o su visualización y monitoreo en aplicaciones (App) de dispositivos móviles.

Sin embargo, los estudios que actualmente tiene más interés por su carácter innovador, tratan del desarrollo de estos medidores con dispositivos de bajo coste [10], [11] y [12] como el propuesto en este trabajo.

Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es el análisis de perturbaciones no estacionarias mediante la transformada Wavelet. Además, con dicho análisis se pretende algo también fundamental como es la detección de estos eventos eléctricos.

Para ello, se propone el desarrollo y la creación de un prototipo medidor con dispositivos de bajo coste, de manera que pueda ser adquirido por cualquier tipo de usuario, tanto en el ámbito doméstico como en un entorno industrial.

METODOLOGÍA

Marco teórico

Transformada Wavelet (TW)

Una onda wavelet tiene una forma oscilante característica que confina bien su energía y le permite hacer análisis en tiempo y frecuencia de forma conjunta.

El aspecto más relevante de estas ondas wavelets es que pueden servir como base para la generación y el análisis de señales no estacionarias, proporcionando mayor información en tiempo y frecuencia que los análisis convencionales como el de Fourier.

Esta TW es eficiente para el análisis de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad. Esta transformada mapea la señal en una representación de tiempo-escala. La principal ventaja que tiene respecto a anteriores análisis es que facilita el MRA con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas estrechas, mientras que el análisis de las frecuencias de menor rango se realiza con ventanas más anchas, como se ilustra en la figura 1.

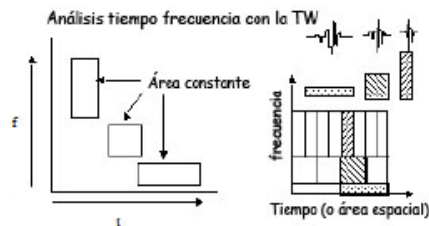


Figura 1: Estructura gráfica del análisis tiempo-frecuencia con Wavelets.

En los sistemas eléctricos, las señales pueden presentar variaciones temporales de frecuencia, huecos de tensión, sobretensiones, transitorios, etc. Es por ello, por lo que la TW se vuelve una herramienta muy apropiada para detectar estos eventos que pueden producirse en dichas señales eléctricas.

La TW de una función $f(t)$ consiste en la descomposición en una serie de funciones $\Psi_{s,\tau}(t)$ que forman una base y son llamadas "Wavelet madre". Esta TW, de forma general, se define de la siguiente forma:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) * \Psi_{s,\tau}^*(t) dt$$

Las funciones Wavelets se generan a partir de la translación y cambio de escala de la "Wavelet madre" de la siguiente forma:

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} * \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$$

Donde " τ " y " s " son los parámetros de translación y de escala de dicha función Wavelet.

En la Figura 2 se representan diferentes tipos de funciones Wavelet madre. En este trabajo se utiliza la de Daubechies 4 (db04). Se ha escogido esta función debido a que es la de mayor aceptación en éste ámbito, en relación a resultados obtenidos y optimización de recursos matemáticos.

El (MRA) suele realizarse mediante la transformada Wavelet discreta (WMRA). De esta forma se realiza el análisis wavelet de cada componente de frecuencia con una resolución diferente. Este es el hecho en el que reside su gran ventaja frente a otros métodos de análisis.

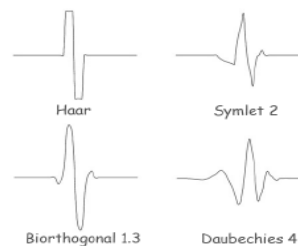


Figura 2: Diferentes ondas Wavelets madre.

De forma general, en este análisis MRA se filtra una señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso-baja, $h(n)$, y filtros paso-alta, $g(n)$, con lo que se consigue eliminar ciertas componentes de alta y baja frecuencia. Estas componentes discriminadas son distintas en cada fase debido a que la salida de cada filtro es diezmada con un factor de 2. En el presente trabajo este proceso es realizado en 6 niveles diferentes.

El proceso de descomposición del mencionado análisis se describe de forma gráfica en la siguiente imagen, donde se observa la descomposición en diferentes niveles con los filtros paso-baja y paso-alta:

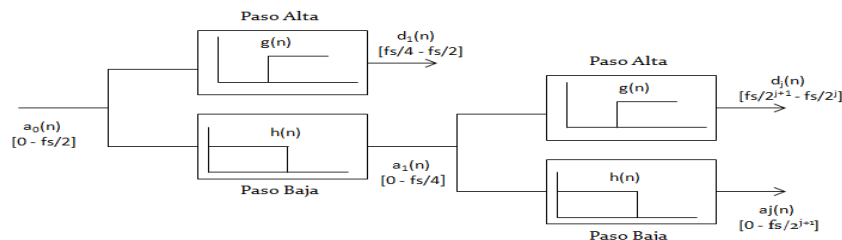


Figura 3: Descomposición en distintos niveles en análisis Wavelet.

Al realizar este análisis, los resultados de interés quedan en los coeficientes de salida de los filtros paso-alta ("d") y paso-baja ("a"). Según la descomposición realizada se pueden obtener las componentes frecuenciales en cada nivel (Tabla 1).

Nivel	Banda de frecuencia (Hz)	Banda armónicos
d1	3200 Hz- 6400 Hz	63º - 127º
d2	1600 Hz- 3200 Hz	33º - 63º
d3	800 Hz- 1600 Hz	17º - 31º
d4	400 Hz- 800 Hz	9º, 11º, 13º, 15º
d5	200 Hz- 400 Hz	5º, 7º
d6	100 Hz- 200 Hz	3º
a6	DC- 100 Hz	1º (Fundamental)

Tabla 1: Frecuencia de corte de distintos niveles de descomposición Wavelets.

Mediante este MRA cualquier señal puede ser expresada según:

$$x(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j,k} * h_{j,k}(n) + \sum_{i=j}^{\infty} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{i,k} * g_{i,k}(n)$$

Los coeficientes “d” son los denominados coeficientes de detalle, y los coeficientes “a” se denominan coeficientes de aproximación. Los coeficientes h(n) son los coeficientes del filtro paso-baja, y los g(n) son los coeficientes de los filtros paso-alta.

Estos coeficientes de detalle y de aproximación pueden ser definidos, de forma general, mediante la siguiente expresión:

$$d_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} * \int_{-\infty}^{\infty} x(n) * g_{j,k}(2^{-j}n - k) dn$$

$$a_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} * \int_{-\infty}^{\infty} x(n) * h_{j,k}(2^{-j}n - k) dn$$

Para la realización de este WMRA existen diferentes algoritmos. En este caso, se ha utilizado el algoritmo de la TW recursiva, en su forma matricial.

El inicio para la formulación de este algoritmo ha de partir necesariamente de la definición de los citados bancos de filtros, filtros paso-baja y filtros paso-alta. La Wavelet madre seleccionada, Daubechies 4, que definen dichos filtros según matrices que tienen cuatro elementos por cada fila.

En cuanto a los filtros paso-alta, g(n), utilizados para obtener los coeficientes Wavelet “d”, se realizan utilizando estos cuatro componentes:

$$\tilde{g}(1) = \frac{1+\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(2) = \frac{3+\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(3) = \frac{3-\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(4) = \frac{1-\sqrt{3}}{8}$$

Mientras que los componentes de la matriz de los filtros paso-baja, h(n), se definen de la siguiente forma:

$$\tilde{h}(1) = \tilde{g}(4); \quad \tilde{h}(2) = -\tilde{g}(3); \quad \tilde{h}(3) = \tilde{g}(2); \quad \tilde{h}(4) = -\tilde{g}(1)$$

La formulación de las matrices que definen los filtros de paso-alta (\tilde{A}_1) y paso-baja (\tilde{B}_1) son:

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix}$$

Sin embargo, la realización de este algoritmo tiene un pequeño inconveniente. Se trata de la aparición del llamado “Efecto de Borde”. Este efecto de borde es el responsable de crear en extremos de la ventana unos valores de los coeficientes de aproximación y coeficientes Wavelet falsos.

Para evitar este efecto indeseado se ha realizado el análisis con un tamaño de muestras de 10+1 ciclos, para posteriormente y una vez realizado el MRA, eliminar ese ciclo extra de 256 muestras. La mitad de dichas muestras se eliminan del principio de la ventana y la otra mitad del final de la misma. De esta forma se obtiene un resultado final con 10 ciclos de la señal (2560 muestras) limpias de efecto de borde.

Índice de calidad de distorsión transitoria instantánea (ITD)

Para la caracterización del método presentado se utiliza el denominado Índice de Distorsión Transitoria (ITD) [15], propuesto por nuestro grupo de investigación para poder clasificar estas perturbaciones eléctricas y que se define como:

$$ITD(n) = \sqrt{\frac{\sum_{k \in Kd} d_{j,k}^2}{\sum_{k \in Ka} A_k^2}}$$

$$A_k^2 = \frac{1}{N} * \sum_{j=1}^N a_{j,k}^2$$

donde:

- N: se trata del número de muestras que se obtienen en el análisis Wavelet. En el caso de nuestra investigación se tratan de 2560 muestras.
- $d_{j,k}$: se tratan de todas las componentes de los coeficientes Wavelet del análisis, en cada uno de los 6 niveles tratados. En definitiva, se tratan de todas las muestras de d1, d2, d3, d4, d5 y d6.
- A_k : se trata del valor RMS de la componente fundamental, es decir de la componente a6.

La definición de este índice de calidad ITD(n) se puede interpretar como una evaluación de la calidad de la señal eléctrica variable en el tiempo, determinada por el cociente en el dominio de tiempo-frecuencia entre la energía de la perturbación eléctrica y la energía de la componente fundamental de la señal eléctrica.

Implementación

Una etapa importante en el desarrollo de este proyecto ha sido la implementación de la TW para poder conseguir los objetivos propuestos. Se ha abordado desde una doble perspectiva. En la primera se ha desarrollado todo el hardware, donde se implementan los componentes físicos del dispositivo, como circuito de acondicionamiento, sensores, etc.; y en la segunda fase se ha abordado el software, donde se implementa con programación C y Python en el microcontrolador y micro-PC.

Implementación hardware

El dispositivo diseñado para poder analizar la calidad eléctrica será capaz de analizar redes monofásicas de tensión.

El desarrollo del hardware se divide en tres partes fundamentales (Figura 4): por un lado está el microcontrolador de bajo coste (Arduino) y el micro-PC de bajo coste (Raspberry Pi 3) utilizados; y por otro lado se encuentra la placa de acondicionamiento, para poder adaptar los valores de la señal medidas hacia los valores admitidos por el microcontrolador y micro-PC.

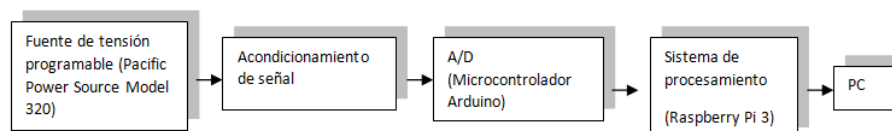


Figura 4: Etapas de implementación hardware de dispositivo diseñado.

El microcontrolador seleccionado es el Arduino DUE. Este microcontrolador es usado para la adquisición de la señal a medir con el convertidor analógico-digital (ADC) y enviar estos datos por puerto serie. El principal requerimiento de este microcontrolador es tener la suficiente capacidad para muestrear la señal de tensión de la red y poder enviar estos datos por el puerto serie hacia un micro-PC, más potente que este microcontrolador, en el que realizar el procesamiento de estos datos.

Las especificaciones de este microcontrolador usado son:

- CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits a 84 MHz.
- SDRAM de 96 KB.
- Controlador DMA
- Memoria Flash de 512 KB.
- ADC, 12 entradas analógicas con 12 bits de resolución.
- 54 pines digitales de entrada/salida.
- 2 puertos USB para comunicación serie.
- Salida HDMI.
- Conexión Ethernet.

Este microcontrolador tiene 12 entradas analógicas con un rango de medida de 0 – 3.3V. En este proyecto de investigación se usa una sola entrada para adquirir la señal de tensión. Debido al pequeño rango de medida que tiene dicho microcontrolador en sus entradas analógicas se hace indispensable una etapa de acondicionamiento de la señal, previa al ADC.

De acuerdo al teorema de Niquist-Shannon, la mínima frecuencia de muestreo para obtener hasta el armónico número 50 (2500 Hz) es de 5kHz. Sin embargo, en este trabajo es necesario obtener una frecuencia de muestreo más alta debido a que se muestrearán señales con transitorios oscilatorios rápidos. Además, tal y como se explicó en el apartado de la transformada Wavelet, se quiere obtener 11 ciclos de la señal de tensión con una tasa de 256 muestras por ciclo. Debido a ello, la frecuencia de muestreo a la que trabaja el dispositivo ADC es de 12,8kHz.

El segundo requerimiento de este microcontrolador era el envío de los datos digitales, salida del dispositivo ADC, por el puerto serie hacia otro dispositivo. Estos datos deben ser recibidos por el micro-PC de bajo coste. Este envío de datos se realiza a través de un puerto serie como el puerto USB con una tasa de 2400 bits por segundo (bps).

El micro ordenador de bajo coste es usado para poder recibir los datos enviados anteriormente por el microcontrolador y realizar el procesamiento adecuado de estos datos digitales recibidos. De esta forma, una vez recibidos los datos digitales, el siguiente paso será el procesamiento de la monitorización de la señal de tensión medida y la detección de posibles perturbaciones presentes en la señal eléctrica, con la transformada Wavelet. Sin embargo, todo este procesamiento es llevado a cabo por software en el micro ordenador.

Las especificaciones de la Raspberry Pi 3 son:

- Quad Cortex A53, CPU de 4 núcleos a 1,2 GHz.
- GPU de 400 MHz.
- SDRAM de 1 GB.
- Memoria Micro-SD.
- 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output).
- 4 puertos USB para la comunicación serie.
- Conexión Ethernet.
- Conexión de Bluetooth 4.0 (802.11n).
- Salida HDMI.

Este micro-PC Raspberry Pi 3 es mucho más potente que el microcontrolador de Arduino DUE. Por esta razón éste último sólo realiza la adquisición de la señal y se reserva para la primero todo el bloque de cálculo del procesamiento.

El acondicionador tiene como objetivo trasladar los valores de la señal de tensión de la red eléctrica (230 V RMS) a valores admisibles por el ADC (0 – 3,3 V).

La medida de la señal de tensión puede ser realizada de diferentes formas: mediante divisores de tensión, transformador de tensión o con un transductor de tensión. El divisor de tensión posee el

problema de la seguridad hacia las personas y el propio dispositivo hardware, además de su disipación de calor en la resistencia eléctrica. La segunda opción, el transformador de tensión, tiene el inconveniente del desfase introducido en el secundario de dicho transformador al medir la señal de tensión. En este caso, se usa un transductor de tensión por ser la opción más segura debido aislamiento galvánico que proporciona.

Para el transductor utilizado se hace necesario que todos los ciclos de la señal de tensión sean positivos, debido a que el ADC de Arduino no puede leer valores negativos. Por esta razón, se introduce un amplificador operacional, tipo UA741CP. Este amplificador operacional se configura en modo sumador-inversor para obtener de esta forma una tensión offset de 1,7 V. Con esta tensión offset, la señal de tensión es positiva en todos sus ciclos. En la etapa de software, se corrige esta tensión de offset introducida mediante hardware y la ganancia del propio amplificador operacional.

Todos los elementos de los que está compuesto este acondicionador de señal necesitan una alimentación de corriente continua (DC) de $\pm 15V$. Para suministrar esta alimentación, la primera opción es una fuente de alimentación de 230 V AC/ 15 V DC simétrica, pero este elemento es muy caro para un dispositivo de bajo coste como el diseñado. Debido a que esta alimentación es solo para los componentes del circuito acondicionador, y no necesita un perfecto filtrado de esa alimentación, se usa un transformador tipo Block 230 V AC/ 2x15V AV, 2,3VA. A la salida de este transformador existirá una corriente alterna AC de 15 V, sin embargo, la alimentación necesaria es de $\pm 15 V$ de continua. Por esta razón, además de usar este transformador también se usa un puente rectificador de diodos, tipo W08G-04, 800V.

Las salidas de este puente rectificador son señales rectificadas con valor $\pm 15V$ RMS. A continuación, se hacen pasar por reguladores de tensión de +15 V y -15 V, tipo L7815CV y L7915CV respectivamente y finalmente por filtros capacitivos con lo que se obtiene una señal mucho más continua.

La salida del amplificador operacional debe ser la entrada del convertidor ADC del microcontrolador. Sin embargo, entre estos elementos existen otros elementos de protección, como es por ejemplo un fusible de 32 mA, para proteger este microcontrolador. Además, posee un diodo zener de 3.3 V para proteger el microcontrolador antes sobretensiones existentes y un filtro antialiasing.

Además de estas protecciones, este circuito acondicionador es protegido con un fusible de 2 A dispuesto antes del transductor de tensión, para de esta forma salvaguardar el elemento más importante del dispositivo diseñado.

Implementación software

Esta etapa de software tiene dos partes fundamentales, una para cada microcontrolador empleado.

El software del microcontrolador Arduino es muy simple (Figura 5). Se leen los datos de la señal a medir mediante el uso del ADC y se envían mediante la comunicación serie hacia el otro dispositivo. Para ello se definen parámetros como son la frecuencia de muestreo y la tasa de bit. Además, también es necesario configurar algunos registros de este microcontrolador para que esta adquisición de datos y comunicación se realice de forma totalmente adecuada.

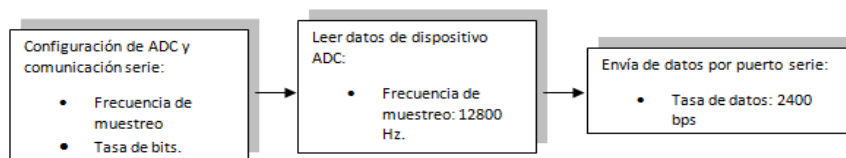


Figura 5: Etapas de implementación software de microcontrolador Arduino.

Respecto al software del ordenador de bajo coste que trata el procesamiento de los datos obtenidos, el cálculo de la transformada Wavelet y su índice ITD para poder detectar posibles perturbaciones eléctricas en la señal de tensión medida. En la figura 6 se puede observar el flujo de trabajo de dicho software en el dispositivo de Raspberry Pi 3:

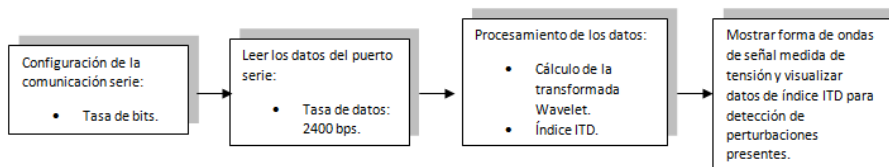


Figura 6: Etapas de implementación software de micro-PC Raspberry Pi 3.

En esta figura se puede observar el bloque principal del procesamiento de los datos. En este bloque, se calcula la transformada Wavelet con un análisis recursivo y se calcula el índice ITD para permitir detectar las posibles perturbaciones eléctricas presentes en las líneas eléctricas. Finalmente, se muestran los gráficos de las formas de ondas de la señal de tensión medida junto con su índice ITD. Estos gráficos son monitorizados mediante un escritorio virtual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder verificar el correcto funcionamiento del dispositivo diseñado se han realizado una serie de casos prácticos reales para su verificación. Estos casos prácticos se basan en la creación de señales eléctricas de tensión con ciertas perturbaciones, para poder visualizar que este dispositivo y el índice de calidad propuesto detectan dicha perturbación eléctrica.

Estas perturbaciones eléctricas utilizadas son de acuerdo a la norma UNE-EN 50160, donde se describen y definen las posibles perturbaciones eléctricas que pueden existir en las redes generales de distribución eléctrica, además de definir las características de dichas perturbaciones. Estas perturbaciones probadas y verificadas son:

- Transitorio oscilatorio.
- Huevo de tensión.
- Sobretensión temporal.
- Sobretensión transitoria.
- Interrupción de tensión.
- Notch.

Estas perturbaciones eléctricas son diseñadas mediante la fuente de tensión programable, modelo Pacific Power Source Model 320. A continuación se muestran los resultados obtenidos de las principales perturbaciones que pueden existir en la red eléctrica, como son el huevo de tensión, el transitorio oscilatorio, y el conjunto de estas dos perturbaciones. La primera de ellas, el huevo de tensión se puede observar en la siguiente figura, perturbación eléctrica muy presente en las redes eléctricas en situaciones como pueden ser el inicio y fin de cortocircuitos cortos o incluso ante situaciones de un aumento de corriente en instalaciones conectadas a esta red eléctrica:

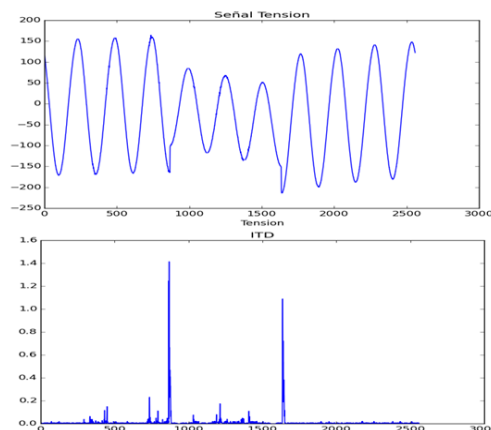


Figura 7: Señal medida con perturbación de huevo de tensión e índice de calidad ITD

Tal y como se puede observar en la anterior figura, la perturbación del huevo de tensión perfectamente visualizada. Además, el objetivo más importante de este proyecto de investigación, la

detección de las perturbaciones eléctricas, se puede observar que se detecta de forma totalmente correcta mediante este índice de calidad ITD.

Observando el índice de calidad de esta perturbación eléctrica, este índice se mantiene con valores muy próximos a cero cuando el armónico presente es el fundamental (50 Hz), es decir, la señal es totalmente sinusoidal. Sin embargo, antes la presencia del inicio y fin del hueco de tensión, se puede observar como el valor de este índice de calidad se dispara a valores mucho más superiores a 0. De esta forma, se puede determinar el instante de inicio y de fin de este hueco de tensión.

La segunda perturbación eléctrica a verificar se trata de la perturbación de un transitorio oscilatorio, muy presente en las redes eléctricas en situaciones como conexiones de bancos de condensadores, conexión de otras líneas eléctricas, etc. Los resultados obtenidos de este segundo caso de prueba se visualizan en la siguiente figura:

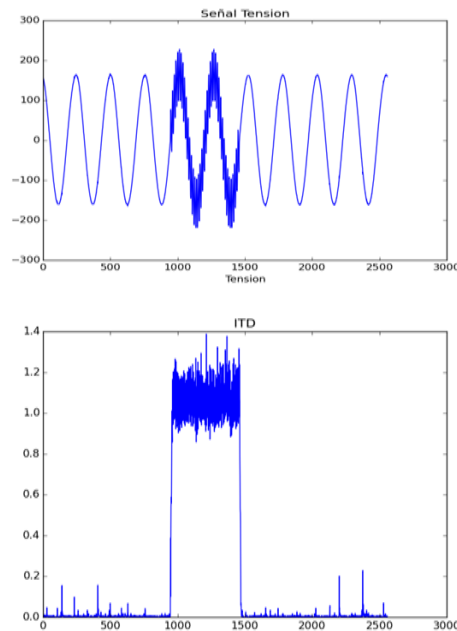


Figura 8: Señal medida con perturbación de transitorio oscilatorio e índice de calidad ITD

Al igual que sucedía en la anterior perturbación visualizada, la visualización de esta perturbación eléctrica es completa. Además, en su índice ITD sucede lo mismo que sucedía ante la perturbación eléctrica del hueco de tensión. De esta forma, ante una onda de señal sinusoidal, sin perturbaciones, este índice de calidad se comporta dando valores muy próximos a cero. Sin embargo, ante la presencia de la perturbación eléctrica, se observa como éste índice de calidad se dispara a valores superior a 0. Por lo que se detecta también, de forma totalmente clara, la presencia de una perturbación eléctrica como es el transitorio oscilatorio.

A pesar de que estas perturbaciones mostradas son muy usuales en las redes eléctricas. A menudo no solo aparece una perturbación eléctrica, sino que las perturbaciones se presentan de forma conjunta. Debido a esto, también es necesario comprobar que este dispositivo diseñado también funciona de forma totalmente perfecta ante la presencia de un conjunto de perturbaciones. En este caso, se ha escogido un conjunto de las perturbaciones anteriormente mostradas, como son el hueco de tensión y el transitorio oscilatorio. Los resultados de este tercer caso de prueba son:

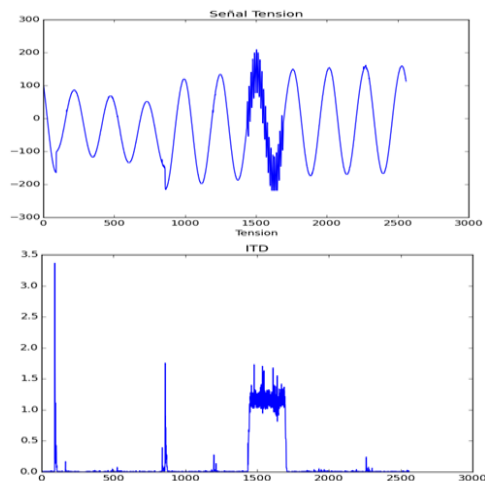


Figura 9: Señal medida con perturbación conjunta de hueco de tensión y transitorio oscilatorio, e índice de calidad ITD.

Tal y como se puede observar en esta figura, en la imagen superior se puede observar como la señal medida está formada por un hueco de tensión al principio y un transitorio oscilatorio. Además, se puede observar como dicha visualización de la señal es perfecta. Respecto a la detección de las perturbaciones, el principal objetivo de dicho proyecto de investigación, se puede observar como este índice de calidad actúa de igual forma con una y con dos perturbaciones eléctricas presentes en la señal a medir. De esta forma, sucede igual que lo sucedido con anterioridad, este índice proporciona valores muy próximos a cero cuando dicha señal es sinusoidal. Sin embargo, ante el inicio y fin del hueco de tensión, y ante el transitorio oscilatorio, se puede observar como dicho índice de calidad proporciona valores mucho mayores a 0, por lo que se puede detectar de forma totalmente correcta dichas perturbaciones eléctricas.

CONCLUSIONES

La calidad eléctrica se está convirtiendo en un asunto fundamental en las líneas de redes eléctricas. Este hecho es así debido al gran uso de dispositivos electrónicos en el día a día por las personas. Estos dispositivos generan numerosas ventajas en su uso individual, sin embargo generan numerosos problemas en las redes eléctricas. Es debido a estos problemas que ocasionan, por las perturbaciones eléctricas que generan en ellos, por la importancia que adquiere la calidad eléctrica actualmente.

Además, actualmente existen dispositivos para poder analizar dicha calidad eléctrica. Sin embargo, dichos dispositivos son muy caros y ante perturbaciones no estacionarias como las que están existiendo actualmente en las líneas eléctricas es necesario la utilización de una herramienta para el análisis de dichas perturbaciones.

Es por ello el diseño de un dispositivo que pueda analizar estas perturbaciones eléctricas no estacionarias, las cuales no pueden ser analizadas con herramientas tradicionales como es el análisis Fourier. Por ello, se ha tratado este tema y se analiza mediante el análisis Wavelet. Además, es necesario un índice de calidad para poder detectar estas perturbaciones eléctricas. Debido a la novedad de este tema, dicho índice no existe en bibliografías. Por ello, la creación de un índice de calidad (ITD), el cual es creado por nuestro grupo de investigación, mediante el cual se pueda detectar la presencia de estos eventos en las señales de tensión de forma rápida.

Además, otro hecho que hace el desarrollo de este proyecto de investigación es el precio de los actuales analizadores de red, los cuales son muy caros. Por ello, la necesidad de crear un dispositivo que sea capaz de analizar estas perturbaciones y además se trate de un dispositivo de bajo coste, capaz de ser adquirido por cualquier persona, tanto en uso doméstico como en uso industrial.

Con todo esto, en este proyecto de investigación se demuestra como es posible el análisis de estas perturbaciones eléctricas mediante la transformada Wavelet además de su detección, mediante el índice

de calidad propuesto. También se diseña el prototipo para poder detectar estas perturbaciones eléctricas, utilizando dicha transformada Wavelet.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión del Dr. D. Juan Carlos Bravo Rodríguez, responsable del Grupo de investigación en Ingeniería Eléctrica (INVEPOT), y de la Dra. D^a. María Dolores Borrás Talavera, a quienes me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además, de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que este proyecto saliera de manera exitosa.

También agradecer al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla, por todo el apoyo y ayuda mostrada para poder sacar adelante dicho proyecto de investigación.

Para finalizar no quiero perder la oportunidad sin agradecer a mis padres y hermano todo el apoyo que han depositado en mi desde el principio. Siempre apoyandome y aportando su incondicional y constante apoyo día tras día. Además de agradecerlo también a mi novia y amigos, los cuales me han aportado todo su cariño y apoyo constantemente durante la realización de este proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bezerra Costa, Flávio. (2010). "Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na Transformada Wavelet para uso em registradores Digitais de Perturbação". Universidade Federal de Campina Grande.
- [2] Bezerra Costa, Flavio. (2014). "Fault-induced transient detection base don real-time analysis of the wavelet coefficient energy". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 29, num 1, pag 140-153.
- [3] Eguíluz Morán, Luis Ignacio. (2001). "Potencia en régimen no-sinusoidal". Universidad de Cantabria. XVII Cursos de verano de Laredo.
- [4] Borrás, M.D., Bravo, J.C., Montañó, J.C. (2016). "Disturbance ratio for optimal multi-event classification in Power Distribution Networks". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 63, num 5, pag 3117-3124.
- [5] Borrás Talavera, María Dolores. (2016). "Contribuciones a la calidad de la señal eléctrica basadas en wavelets e inteligencia artificial". Sevilla, Universidad de Sevilla.
- [6] Meyer, Y. (1990). "Ondelettes et operateurs", Hermann, Paris.
- [7] Daubechies, I.(1992.). "Ten lectures on Wavelets". Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, Pensylvania.
- [8] Mallat, S.G. (1989). "A theory for multiresolution signal decomposition the wavelet representation", IEEE Transactions on Pattern Recog. And Machine Inteligence. Vol 11, Num 7, Pag 674-693.
- [9] Koley, Ebha, Kumar, Raunak., Ghosh, Subhojit. (2016). "Low cost microcontroller based fault detector, classifier, zone identifier and locator for transmission lines using wavelet transform and artificial neural network: A hardware co-simulation approach". International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Vol 81, Pag 346-360.
- [10] Albu, M., Sanduleac, M., Stanescu, C. (2016). "Syncretic use of smart meters of Power Quality monitoring in emerging networks". IEEE Transactions of Smart Grid. Vol 8, Num 1, Pag 485-492.
- [11] Aurilio, G., Gallo, D., Landi, C. (2014). "A low cost smart meter network for a smart utility". Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, IEEE International.
- [12] Janani, R., Jayasri, R.S., Deepa, G. (2015). "Low cost Power Quality analyzer for academic applications". Student Journal of Electrical and Electronics Engineering. Vol 1, Num 1.
- [13] Kabalci, E. (2016). "Emerging smart metering trends and integration at ML-LV level". 3^o International Smart Grid Workshop and Certificate Program.
- [14] Tomesc, L., Dobra, P. (2007). "Lox-cost Power Quality analyzer". IFAC Workshop'07.
- [15] Music, M., Hasanspahic, N., Bosovic, A. (2016). "Upgrading smart meters as key components of integrated Power Quality monitoring system". Environmental and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE 16th International Conference.

- [16] Montoya, F.G., Alcayde, A., Sánchez, P., Gómez, J. (2010). "zEnergy: An open source Project for Power Quality assessment and monitoring". Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG).
- [17] Yaemprayoon, S., Boonplian, V. (2016). "Developing an innovation smart meter based on CS5490". Electrical Engineering/ Electronics, Telecommunications and Information Technology (ECTICON).
- [18] Thongkhao, Y., Pora, W. (2016). "A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and energy metering functions". Electrical Engineering/ Electronics, Telecommunications and Information Technology (ECTICON).
- [19] Sun, Q., Li, H., Ma, Z. (2016). "A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks". IEEE Internet of Things Journal, Vol 3, Num 4.
- [20] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M., Hofmann P. (1996). "Power quality assessment via wavelet transform analysis". IEEE Trans. Power Delivery. Vol. 11, Num 2, Pag 924-930.
- [21] Pandey S.K., Satish L. (1998). "Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests". IEEE Trans. Power Delivery. Vol 13, Num 14, Pag 1194-1200.
- [22] Weon-Ki Y., Devaney M.J. (1998). "Power measurement using the wavelet transform", IEEE Trans. Inst and Meas. Vol. 47, Num 5, Pag 1205-1210.
- [23] Weon-Ki Y., Devaney M.J. (2000). "Reactive power measurement using the wavelet transform", IEEE Trans. Inst ans Meas. Vol 49, Num 2, Pag 246-252.
- [24] Heydt G.T. (1998). "Electric power quality: a tutorial introduction", IEEE Computer Applications in Power. Vol 11, Num 1, Pag 15-19.
- [25] Heydt G.T., Jewell W.T. (1998). "Pitfalls of electric power quality indices", IEEE Trans. Power Delivery. Vol 13, Num 12, Pag 570-578.
- [26] Kandil M.S., Farghal S.A., Elmitwally A. (2001). "Redefined power quality indices", IEEE Proc. Gen., Trans. And Distr. Vol 148, Num 6, Pag 590-596.
- [27] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M., Hofmann P. (1996). "Power quality assessment via wavelet transform analysis", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 11, Num 2, Pag 924-930.
- [28] Pandey S.K., Satish L. (1998). "Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 13, Num 14, Pag 1194-1200.
- [29] Heydt G.T. (1998). "Electric power quality: a tutorial introduction", IEEE Computer Applications in Power, Vol 11, Num 1, Pag 15-19.
- [30] Heydt G.T., Jewell W.T. (1998). "Pitfalls of electric power quality indices, IEEE Trans. Power Delivery, Vol 13, Num 12, Pag 570-578.