

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
ANALIZADOR DE REDES ELÉCTRICAS
TRIFÁSICAS**

JUAN HERREROS ELORZA

2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

Reunido el tribunal examinador en el da de la fecha, constituido por

Presidente: Dr D. CAROLINA SÁNCHEZ URDIAÍN

Vocal: Dr D. JESÚS FRAILE ARDANUY

Secretario: D. BENITO ARTALOYTIA ENCINAS

Suplente: Dr D. ESTEFANÍA CAAMAÑO

para juzgar el Trabajo Fin de Grado titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE
REDES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS

del alumno D. JUAN HERREROS ELORZA
dirigido por D. ÁLVARO GUTIÉRREZ MARTÍN

Acuerdan otorgar la calificación de: _____

Y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal, la presente diligencia

Madrid, a _____ de _____ de _____

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Fdo: _____ Fdo: _____ Fdo: _____

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
ANALIZADOR DE REDES ELÉCTRICAS
TRIFÁSICAS**

JUAN HERREROS ELORZA

2016

Resumen

A lo largo de esta memoria se detallan los cambios realizados en un dispositivo analizador de redes eléctricas trifásicas. Partiendo de un sistema desarrollado previamente, que ya realizaba medidas eléctricas de varios parámetros, se han realizado las siguientes tareas:

- Ampliar el rango de las medidas que se realizaban, permitiendo medir en los cuatro cuadrantes (anteriormente solo se podía medir en el primero).
- Introducir medidas en los armónicos.
- Mejorar la temporización del sistema para lograr una mayor precisión en las medidas.

Una vez realizadas todas esas mejoras, el sistema se ha probado para asegurar que mide de manera correcta.

Abstract in English

In this memory the changes performed in a three-phase electric networks analyser are detailed. Based on a previously developed system, which was already able to measure several electric parameters, the following tasks have been carried out:

- To enhance the range of the measures which were done, allowing to measure in the four quadrants (previously only the first quadrant was available for measuring)
- To introduce measures in the harmonics.
- To improve the temporization of the system to get a better precision in the measurements.

Once all those improvements are made, the system has been tested to ensure that it measures in a proper way.

Agradecimientos

Índice general

Resumen	IV
Agradecimientos	V
Índice General	VI
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	X
Lista de acrónimos	XII
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organización del documento	2
2. Estado del arte	5
2.1. Contadores y Analizadores de red comerciales	5
2.2. SDIN Meter 3PH	7
3. Implementación del Firmware	11
3.1. Introducción	11
3.2. Modificaciones a las medidas existentes	11
3.2.1. Funciones	12
3.3. Medidas de armónicos	13
3.4. Temporización	17
4. Experimentos y validación	21
4.1. Introducción	21
4.2. Primera prueba: Bombilla incandescente	22
4.3. Segunda prueba: Monitor de ordenador	24
4.4. Tercera prueba: Ordenador	26
4.5. Cuarta prueba: Motor trifásico	28
4.6. Conclusiones	31
4.6.1. Principales problemas encontrados durante las pruebas	32

5. Conclusiones y líneas futuras	35
5.1. Conclusiones	35
5.2. Líneas futuras de trabajo	35
A. Anexos	37
A.1. Listado de registros de 16 bits que almacenan las medidas	37
Bibliografía	42

Índice de figuras

2.1. Analizadores comerciales	5
2.2. Imágenes de las tarjetas y el equipo montado	7
2.3. Conexiones entre las tarjetas	8
3.1. Uso combinado del timer y el semáforo	17
4.1. Conexiones entre equipos para realizar las medidas	21
4.2. Consumo acumulado de energía	23
4.3. Consumo acumulado de energía	25
4.4. Consumo acumulado de energía	27
4.5. Consumo acumulado de energía	29
4.6. Contribución de los armónicos	30
4.7. Contribución de los armónicos y voltaje total	31

Índice de tablas

2.1. Medidas que hace cada dispositivo.	6
3.1. Listado de medidas.	17
4.1. Medidas sobre la señal total.	22
4.2. Distorsiones armónicas totales.	23
4.3. Distorsiones armónicas estimadas y medidas.	24
4.4. Medidas sobre la señal total.	24
4.5. Distorsiones armónicas totales.	25
4.6. Distorsiones armónicas estimadas y medidas.	26
4.7. Medidas sobre la señal total.	26
4.8. Distorsiones armónicas totales.	27
4.9. Distorsiones armónicas estimadas y medidas.	27
4.10. Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 64V.	28
4.11. Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 82V.	28
4.12. Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 123V.	28
4.13. Frecuencia y factor de potencia a distintas tensiones de alimentación.	29
A.1. Listado de registros que almacenan las medidas.	40

Lista de Acrónimos

TFG: Trabajo Fin de Grado.

THD: Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total)

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Motivación

La motivación de este Trabajo Fin de Grado surge de la necesidad de medir el consumo de energía, para a continuación poder analizarlo y estudiar formas de reducirlo y/o abaratarlo. Además de saber cuánta energía se consume, también es interesante saber cómo se consume esa energía, es decir, conocer a fondo los detalles del consumo mediante la obtención de medidas de varios parámetros - voltaje, corriente, potencia. También es importante medir en los armónicos, para saber cuánto pueden estar perjudicando a la componente fundamental.

Todo esto lo hace el software desarrollado, es decir, permite tomar varias y diversas medidas eléctricas, en las 3 fases de la red trifásica y en varios armónicos.

El dispositivo, que existía con anterioridad y sobre el que se han implementado las mejoras que se detallan en esta memoria, recibe el nombre de **SDIN Meter 3PH**.

Aunque anteriormente a la realización de este TFG ya se habían implementado el hardware y una primera versión del software del equipo, se han ampliado las funcionalidades del sistema, fundamentalmente con la incorporación de las medidas en los armónicos y también con correcciones sobre las medidas que ya estaban implementadas y ajustes sobre la temporización.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este TFG es diseñar e implementar el firmware de un dispositivo para obtener medidas energéticas precisas y de calidad.

Para ello se requiere un sistema robusto capaz de realizar medidas en tiempo real. Esto es posible gracias a que en la implementación se utiliza un sistema operativo en tiempo real, en este caso FreeRTOS (Real Time Engineers ltd., 2016). Las medidas relevantes son las siguientes:

- Voltajes de línea (1 medida por cada línea)
- Corrientes de línea (1 medida por cada línea y 1 para el neutro)
- Potencia activa (1 medida por cada línea)
- Potencia aparente (1 medida por cada línea)

- Factor de potencia (1 medida por cada línea)
- Frecuencia (1 medida por cada línea)
- Energía activa (1 medida por cada línea)
- Energía aparente (1 medida por cada línea)
- Voltaje del fundamental (1 medida por cada línea)
- Corriente del fundamental (1 medida por cada línea)
- Potencia activa del fundamental (1 medida por cada línea)
- Potencia reactiva del fundamental (1 medida por cada línea)
- Voltaje del armónico (1 medida por cada línea y cada armónico impar entre el 3° y el 15°)
- Corriente del armónico (1 medida por cada línea y cada armónico impar entre el 3° y el 15°)
- Potencia activa del armónico (1 medida por cada línea y cada armónico impar entre el 3° y el 15°)
- Potencia reactiva del armónico (1 medida por cada línea y cada armónico impar entre el 3° y el 15°)
- Distorsión armónica total del voltaje (1 medida por cada línea)
- Distorsión armónica total de la corriente (1 medida por cada línea)

Todas las medidas se guardan en registros de 16 bits, a excepción de las medidas de energía que se almacenan en registros de 64 bits.

Adicionalmente, se registran 8 medidas sobre los 56 primeros armónicos de cada línea (voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, distorsión armónica del voltaje y distorsión armónica de la corriente).

Todas las medidas se almacenan en una tabla que se transmite por MODBUS-RTU sobre un bus RS485, de manera que las primeras posiciones las ocupan las 127 medidas relevantes y a continuación se sitúan el resto de medidas de los armónicos.

1.3. Organización del documento

El presente documento está estructurado en 4 capítulos, además de esta introducción. Estos capítulos son:

- **Estado del arte** (Capítulo 2): Este capítulo detalla qué analizadores de red comerciales son comparables al dispositivo desarrollado en este trabajo, haciendo hincapié en las diferencias y similitudes existentes. Además expone en qué punto se encontraba el desarrollo del analizador antes del comienzo del Trabajo Fin de Grado.

- **Implementación del firmware** (Capítulo 3): En este capítulo se explican las modificaciones implementadas sobre las medidas que realizaba el dispositivo previamente, la introducción de las nuevas medidas en los armónicos y los ajustes necesarios para que la temporización sea correcta.
- **Experimentos y validación** (Capítulo 4): En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con distintos equipos eléctricos: Una bombilla incandescente, un monitor y un ordenador.
- **Conclusiones y líneas futuras** (Capítulo 5): Resumen de los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo y exposición de posibles futuras mejoras al dispositivo.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Contadores y Analizadores de red comerciales

Se han encontrado diversos equipos comerciales con funcionalidad similar a la ofrecida por el prototipo desarrollado en este Trabajo Fin de Grado. Los 3 más relevantes, con los que se comparará el desarrollo actual, son:

- QC-POWER-T-485 (QEED, 2014), de la empresa italiana QEED.
- ETIMETER ENA3/ENA3D (ETI, 2016), de la empresa eslovena ETI.
- ECSAN 80-5 (Herholdt Controls, 2013), de la empresa italiana Herholdt Controls.

En la Figura 2.1 se puede ver el aspecto externo de estos 3 dispositivos.

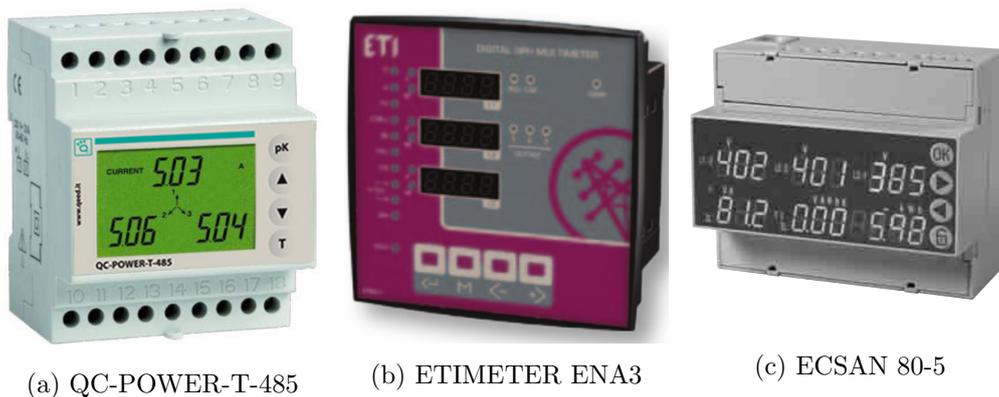


Figura 2.1: Analizadores comerciales

La Tabla 2.1 presenta una comparativa de las diferentes medidas que es capaz de realizar cada uno de estos equipos:

Medidas	QC- POWER- T-485	ENA3	ECSAN 80-5	SDIN Me- ter 3PH
Voltaje	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Corriente	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Frecuencia	SÍ	NO	SÍ	SÍ
Potencia Activa	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Potencia Reactiva	SÍ	SÍ	SÍ	NO
Potencia Aparente	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Factor de Potencia	SÍ	NO	SÍ	SÍ
Energía Activa	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Energía Reactiva	SÍ	SÍ	SÍ	NO
Energía Aparente	NO	NO	SÍ	SÍ
Distorsiones armónicas	NO	SÍ	NO	SÍ
Temperatura	NO	SÍ	NO	NO
Medidas en los armónicos	NO	NO	NO	SÍ

Tabla 2.1: Medidas que hace cada dispositivo.

Como se puede ver, las medidas que realizan los dispositivos analizados pero no el SDIN Meter 3PH son las potencia y energía reactivas. No se pierde ninguna información al no realizar estas medidas, pues pueden ser calculadas a partir de los valores de activa y aparente:

$$P^2 + R^2 = S^2$$

$$R = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Tampoco es capaz de realizar medidas de temperatura, siendo un parámetro que solo tiene en cuenta el ENA3/ENA3D.

La gran baza del presente desarrollo frente a estos tres dispositivos similares es la capacidad de realizar medidas en los armónicos. No únicamente medidas sobre las distorsiones armónicas de corriente o tensión, sino también las potencias activa y reactiva de cada armónico de cada línea. Por lo tanto la información y el nivel de detalle sobre los armónicos es mucho mayor en este dispositivo que en los demás.

Todos estos dispositivos pueden transmitir los datos que registran a través de un MODBUS sobre una interfaz RS485, a excepción del ENA3/ENA3D, que no dispone de esa interfaz aunque sí de un adaptador a la misma.

La principal característica que comparten los tres competidores analizados y que no tiene el dispositivo desarrollado en el TFG es el display. Aunque con distintas posibilidades, los 3 equipos tienen alguna manera de presentar la información que obtienen sin necesidad de transmitirlos a un equipo externo.

Así pues, se puede afirmar que el SDIN Meter 3PH es bastante similar a productos que se encuentran en el mercado y que las principales diferencias con los mismos son:

- **Principal ventaja:** Puede realizar múltiples medidas sobre los armónicos.

- **Principal desventaja:** No cuenta con un display para presentar los datos.

2.2. SDIN Meter 3PH

El hardware sobre el que se implementa el dispositivo son 2 tarjetas electrónicas, conectadas entre ellas. Ambas han sido desarrolladas con anterioridad al presente al TFG.

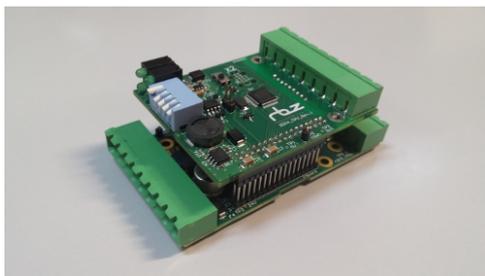
La Figura 2.2 muestra el aspecto de las tarjetas y del equipo una vez montado:



(a) Tarjeta que contiene el ADE7880



(b) Tarjeta que contiene el STM32F103



(c) Tarjetas montadas una sobre la otra



(d) Equipo montado

Figura 2.2: Imágenes de las tarjetas y el equipo montado

El componente más destacado de cada una de ellas es:

- La primera tarjeta (Figura 2.2a), la que recibe las corrientes y voltajes a medir, incorpora el medidor ADE7880 (Analog Devices, 2014), que es el encargado de realizar las medidas eléctricas y almacenarlas en unos registros internos, de acuerdo a la configuración instantánea.
- La segunda (Figura 2.2b) contiene el STM32F103 (ST Microelectronics, 2015), el procesador principal del sistema. Este se encarga de ejecutar el sistema operativo de tiempo real, FreeRTOS, y sobre él la aplicación principal del dispositivo. A través de ella configura el ADE7880 y lee los registros en los que se almacenan las medidas, para almacenarlas en sus propios registros en el orden adecuado. A continuación pone a disposición esos registros para ser transmitidos por MODBUS.

La Figura 2.3 sirve como explicación al funcionamiento del sistema: La tarjeta del ADE7880 registra las medidas y las almacena en sus registros, de donde la otra tarjeta, la que contiene el procesador principal, toma las medidas y les da un formato adecuado antes de guardarlas en sus propios registros. El procesador principal se encarga asimismo de ir cambiando la configuración del ADE7880 para que cambie el armónico y/o la línea en la que realiza las medidas.

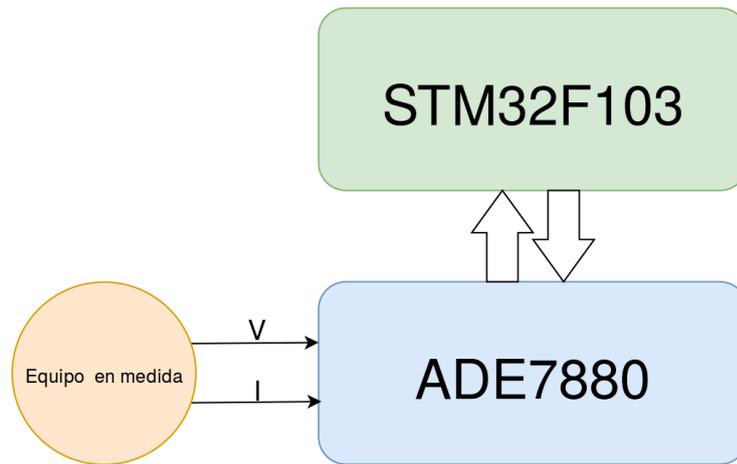


Figura 2.3: Conexiones entre las tarjetas

El desarrollo que existía con anterioridad a la realización de este TFG era un sistema capaz de realizar mediciones sobre distintos parámetros eléctricos, a saber: voltajes, corrientes, potencia activa, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia, energía activa, energía aparente.

Cabe destacar también que:

- La precisión de todas las medidas, entendida como el tamaño de registro en el que se almacenan, era de 16 bits, que en general es suficiente. Sin embargo, se queda corto para medidas de energía, así que estas medidas se almacenaban en registros de 32 bits.

No obstante, el registro del ADE7880 donde se guardan las medidas de energía es tan solo de 16 bits, así que existe una limitación independientemente del tamaño de registro elegido en el STM32F103.

Es por ello que se ha cambiado la manera en la que se realizan y almacenan las medidas de energía. La explicación extendida de esto puede encontrarse en la Sección 3.2.

- La temporización de las medidas no era del todo exacta debido a la implementación que se hacía de la misma. Más información sobre esto se detalla en la Sección 3.4.

El sistema realizaba esas mediciones y las almacenaba en la memoria interna, para mandarlas después a través de un MODBUS-RTU sobre un bus RS485. Como no eran demasiadas medidas, el orden de las mismas no era relevante y simplemente

se guardaban en el orden en el que se realizaban para después transmitir todas las medidas.

Ahora eso ha cambiado para dar prioridad a las medidas relevantes, que son las que se transmiten continuamente por el MODBUS. El orden actual puede consultarse en la Sección 3.3.

La temporización estaba implementada mediante la función *vTaskDelay()*, usándola al final del código de la tarea encargada de realizar las medidas.

Esta no es la manera óptima de hacerlo, pues al existir más usos de esta función *vTaskDelay()* a lo largo del código, la precisión no es la adecuada.

La solución que se ha tomado es usar un timer que controla un semáforo que permite que se ejecute el código encargado de realizar las medidas con el periodo deseado. Los detalles sobre la implementación de esta solución pueden encontrarse en el Capítulo 3, en la sección relativa a la temporización (Sección 3.4).

Capítulo 3

Implementación del Firmware

3.1. Introducción

El programa desarrollado realiza cada periodo de muestreo 127 medidas que se consideran relevantes. Para que el tiempo sea preciso se ha empleado un sistema operativo en tiempo real, en concreto FreeRTOS (Real Time Engineers Ltd., 2016), y una combinación de un timer y un semáforo (que se detalla en la Sección 3.4). Esta combinación impide que se ejecute el código encargado de medir hasta que haya pasado un periodo de muestreo desde el comienzo de la ejecución anterior.

La ejecución tarda aproximadamente unos 2 segundos, por lo que el periodo de muestreo elegido es de 3 segundos (manteniendo un margen de seguridad). Debido a la configuración que se ha venido usando hasta el momento de la realización de este TFG, la cual no se espera que cambie, las medidas van a ser solicitadas al MODBUS por un dispositivo externo cada minuto. Por tanto el periodo de muestro es más que suficiente y permite que las consultas se realicen con una frecuencia muy superior si fuera necesario.

Las principales mejoras introducidas en el sistema durante la realización del presente TFG son tres:

- Añadir nuevas medidas en los armónicos.
- Mejorar las medidas que ya había, en términos de precisión y temporización.
- Elegir qué medidas son las que se incluyen y en qué orden.

Todo esto implica cambiar configuraciones del medidor ADE7880, cambiar la manera en la que se almacenan algunas medidas en los registros del STM32F103, implementar nuevos mecanismos de control como un timer y un semáforo y cambiar también la configuración del MODBUS para que posicione más medidas de las que venía transmitiendo en la versión anterior del firmware.

3.2. Modificaciones a las medidas existentes

En primer lugar, en el momento de comenzar el TFG, las medidas solo podían realizarse en el primer cuadrante, ya que se consideraban solo los valores positivos medidos, descartándose los negativos.

Se ha actualizado el código para que ahora todas las medidas (dentro del rango que permiten los registros) puedan ser positivas y negativas y por tanto mida en los 4 cuadrantes.

El principal cambio que se ha realizado en estas medidas es el que se ha hecho sobre las medidas de energía: Antes se medían en Wh y en VAh, pero ahora se miden en mWh y en mVAh para aumentar la precisión.

Este cambio obedece a una decisión a la hora de leer el registro del ADE7880 en el que el mismo almacena las medidas de energía, que se puede configurar de 2 maneras:

- Registra las medidas en Wh y VAh y almacena la energía que se consume desde que se resetea el chip.
- Registra las medidas en mWh y mVAh y almacena la energía que se consume desde la última vez que se haya leído el chip.

Se tomó la decisión de emplear el segundo de estos modos porque, considerando que en su emplazamiento final el dispositivo podría funcionar durante varios meses o incluso años ininterrumpidamente, el propio registro del ADE7880, que también es de 16 bits, podría saturarse.

Configurar el registro en este modo plantea el problema de que los registros en los que se almacene posteriormente la energía deben ser más grandes, pues al medir con más precisión (en mWh), es necesario más espacio.

Se ha optado por guardar los datos en un registro de 64 bits, que garantiza que no habrá problemas de espacio durante el tiempo de vida del dispositivo (El tamaño escogido es este y no 32 bits porque, suponiendo una potencia media de 1 kW, el valor máximo almacenable en el registro se alcanzaría en aproximadamente 3 meses. Para la misma potencia media un registro de 64 bits tardaría más de mil millones de años en saturarse).

Otro cambio importante sobre las medidas de energía, tanto la activa como la aparente, se ha producido sobre el objetivo de dichas medidas. Anteriormente, las medidas se realizaban sobre la componente fundamental de la señal, es decir, sin considerar el consumo producido por los armónicos. En el sistema actual lo que se mide es el consumo total de energía, incluyendo todas las componentes. Asimismo, las potencias activa y reactiva del fundamental también se miden, pues en las medidas sobre armónicos el primero que se mide es el fundamental (ver Sección 3.3).

Y por tanto la lista final de medidas – sobre la señal total, incluyendo el fundamental y los armónicos – es la siguiente: Voltajes, corrientes, potencia activa, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia, energía activa, energía aparente.

3.2.1. Funciones

El programa tiene varias funciones que, si bien no se han desarrollado durante este TFG, sí se usan en la parte desarrollada.

- Las 2 más importantes son las que se encargan de leer y escribir en los registros del ADE7880, a través del bus SPI que incorporan ambas placas (la que contiene el STM32F103 actúa como maestro y la del ADE7880 como esclavo).

Una variación de la función encargada de leer ha sido desarrollada para poder hacer uso del “modo ráfaga” en la lectura de las medidas de los armónicos. Este proceso se detalla al final de la Sección 3.3.

- Las funciones encargadas de manejar la transmisión de datos a través del MODBUS también han sido desarrolladas con anterioridad al TFG y no han sido modificadas.

3.3. Medidas de armónicos

La mejora más significativa que se ha producido sobre el sistema que existía con anterioridad al desarrollo de este TFG es la introducción de medidas sobre los armónicos de la señal eléctrica.

El ADE7880 permite realizar medidas hasta en 63 armónicos por línea, pero también limita la frecuencia máxima a 2800 Hz, donde tiene la frecuencia de corte.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la frecuencia de la señal eléctrica en España es de 50Hz, solo se puede medir sin atenuación en 56 armónicos.

En las formas de onda simétricas, es decir, en aquellas en las que los semiciclos positivo y negativo tienen la misma forma y amplitud, todos los armónicos pares son cero. Tal es el caso de la señal eléctrica y es por esto que únicamente son de interés los armónicos impares.

Además, como – presumiblemente – la amplitud de los armónicos va disminuyendo con el número de los mismos, a partir de un armónico de alta frecuencia las medidas que se puedan obtener son despreciables. En el TFG se ha considerado que los armónicos hasta el 15º son suficientemente representativos.

Por otra parte, el ADE7880 es capaz de medir hasta 8 variables distintas en cada armónico, a saber: Voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, distorsión armónica del voltaje, distorsión armónica de la corriente.

Pero, al igual que no es necesario medir en todos los armónicos en los que se podría medir con el ADE7880, tampoco es necesario medir esos 8 parámetros en cada armónico.

En primer lugar, no es necesario medir la potencia aparente ni el factor de potencia, porque se pueden obtener a partir de las potencias activa y reactiva.

$$S = \sqrt{P^2 + R^2}$$

$$\cos \Phi = \frac{P}{|S|}$$

En segundo lugar, las distorsiones armónicas de cada componente son poco relevantes, pues lo que es de interés son las distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente. Así que tampoco es necesario incluir esas medidas entre las relevantes. Por tanto, se consideran relevantes únicamente los armónicos impares hasta el 15º y en cada uno de ellos se toman 4 medidas: Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva. Además, en cada línea se toman otras 2 medidas: Distorsiones armónicas totales del voltaje y de la corriente.

En resumen, en cada línea se toman 4 medidas sobre el fundamental y otros 7 armónicos, además de las 2 medidas sobre la distorsión armónica. Eso hace un total

de 34 medidas relevantes sobre armónicos por línea y en total 102 medidas, que sumadas a las 25 medidas anteriores hacen el total de 127 medidas relevantes.

A pesar de que esas son las medidas más relevantes, el ADE7880 ofrece la posibilidad de realizar muchas más. Teniendo en cuenta además que en el periodo de medida da tiempo de sobra a realizarlas, se ha decidido:

- Realizar todas las mediciones posibles sobre los armónicos.
- Estructurar las medidas en una tabla de manera que las medidas relevantes estén en las posiciones de arriba de la tabla y el resto de medidas después.
- Permitir el acceso por MODBUS únicamente a las medidas relevantes.

Por lo tanto se realizan 1344 medidas “no relevantes” y el número total de medidas es de 1471. La siguiente tabla muestra todas las medidas ordenadas:

Nombre	Unidad	Cantidad	¿Relevante?
Voltajes de línea	Voltios	3	SÍ
Corrientes de línea y del neutro	Amperios	4	SÍ
Potencia activa de cada línea	Vatios	3	SÍ
Potencia aparente de cada línea	Voltioamperios	3	SÍ
Factor de potencia de cada línea		3	SÍ
Frecuencia de cada línea	Hertzios	3	SÍ
Energía activa	Vatios hora	3	SÍ
Energía aparente	Voltioamperios hora	3	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del fundamental de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 3er armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 5º armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 7º armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 9º armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ

Nombre	Unidad	Cantidad	¿Relevante?
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 11° armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 13° armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 15° armónico de la primera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente de la primera línea		2	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del fundamental de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 3er armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 5° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 7° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 9° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 11° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 13° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ

Nombre	Unidad	Cantidad	¿Relevante?
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 15° armónico de la segunda línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente de la segunda línea		2	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del fundamental de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 3er armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 5° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 7° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 9° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 11° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 13° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del 15° armónico de la tercera línea	V,A, W, VAR	4	SÍ
Distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente de la tercera línea		2	SÍ
Medidas sobre los 56 primeros armónicos de la primera línea	Varias	448	NO
Medidas sobre los 56 primeros armónicos de la segunda línea	Varias	448	NO

Nombre	Unidad	Cantidad	¿Relevante?
Medidas sobre los 56 primeros armónicos de la tercera línea	Varias	448	NO

Tabla 3.1: Listado de medidas.

3.4. Temporización

Para lograr una temporización precisa y que las medidas se tomen exactamente con un periodo de muestreo que se especificase, siempre y cuando le dé tiempo al ADE7880 a realizar todas las mediciones y al STM32F103 a leerlas del ADE7880 (mínimo 2 segundos) – se emplean diferentes mecanismos.

En primer lugar, es crucial que el programa se ejecute sobre un sistema operativo de tiempo real, para poder tener el control de lo que tarda en ejecutar las diferentes tareas que debe realizar. En este caso el sistema elegido ha sido FreeRTOS (Real Time Engineers ltd., 2016), que tiene las siguientes características:

Opción de programación preventiva, transmisión de mensajes fácil de usar, opción de programación cooperativa, round robin con time slicing, notificaciones de tareas rápidas, mutexes con herencia de prioridad, huella de ROM de 6K a 12K, mutexes recursivos, configurable / escalable, semáforos binarios y de conteo, agnóstico de chip y compilador, temporizadores software muy eficientes, algunos puertos nunca desactivan completamente las interrupciones y API fácil de usar.

Una vez que se cuenta con un sistema operativo de tiempo real, se hace uso de las siguientes funciones del mismo: Un timer y un semáforo. El funcionamiento de los mismos se describe con la Figura 3.1:

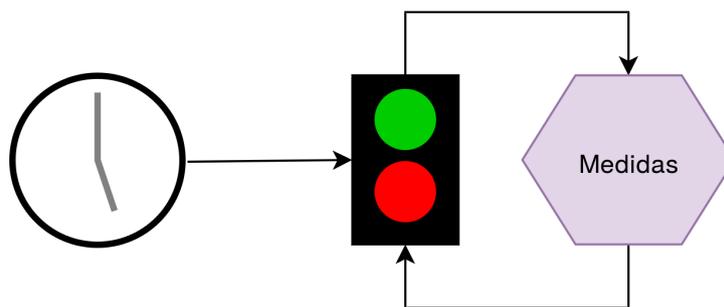


Figura 3.1: Uso combinado del timer y el semáforo

La idea básica de combinar estos 2 componentes es: El semáforo se mantiene cerrado hasta que el timer lo libera, y mientras tanto la función encargada de realizar las medidas “le pide paso continuamente”. Así, cada ejecución de la función se produce cada vez que el semáforo se libera o, lo que es lo mismo, cada vez que el timer cuenta un periodo de muestreo.

El timer libera el semáforo con el periodo de muestreo configurado y la función comienza a ejecutarse. Como además se está usando un sistema operativo de tiempo real, la función siempre tarda exactamente el mismo tiempo en ejecutarse y las medidas se registran también exactamente con ese periodo de muestreo definido.

En concreto, el timer se configura como una interrupción periódica que emplea el reloj TIM3. Este reloj funciona a 72 MHz. Para conseguir bajar la frecuencia hasta el inverso del periodo de muestreo se fija el periodo del timer en el valor máximo (65535) y se calcula el valor adecuado para el prescaler.

$$f = \frac{f_{CLK}}{period \times prescaler}$$

En el handler de esa interrupción (la función que se ejecuta cada vez que esta se produce) se emplea la función *xSemaphoreGive* para “liberar el semáforo” y en la tarea encargada de realizar las medidas se usa la función complementaria, *xSemaphoreTake*. De esta manera, las medidas solo se empiezan a realizar si el timer ha ejecutado *xSemaphoreGive* antes, y como por su configuración eso ocurre cada periodo de muestreo, las medidas también se ejecutan cada periodo de muestreo.

Para posibilitar esta temporización, teniendo en cuenta que en cada periodo se realizan cerca de 1.500 medidas, hay que cambiar la configuración del ADE7880. Por defecto el chip espera 750 ms después de realizar una medida. Por lo tanto el tiempo total de espera en cada ciclo de medidas sería casi de 20 minutos.

Sin embargo, se puede hacer que no espere ese tiempo, cambiando el valor del bit 0 (HRCFG) del registro HCONFIG del ADE7880 a ‘1’. Esta configuración se explica en el manual del ADE7880 (Analog Devices, 2014). Se ha comprobado empíricamente que las medidas (para un periodo superior a 2 segundos) son las mismas esperando ese tiempo de guarda después de realizarlas o sin esperarlo.

Lo ideal sería aprovechar la notificación que hace el ADE7880 cuando acaba de realizar las medidas. Esta notificación consiste en que cambia el valor de un registro, lo que puede emplearse como el disparador de una interrupción que sea la encargada de realizar las medidas. Así se podría asegurar que las medidas son correctas y a la vez reducir al mínimo el tiempo empleado en realizarlas. Esta implementación se sugiere como una línea futura de trabajo en el Capítulo 5.

Para aumentar la velocidad con la que se realizan las medidas se ha empleado asimismo el modo “ráfaga” del ADE7880, que consiste en emplear una función para la lectura de varios registros consecutivos simultáneamente, en vez de leerlos uno a uno. Esto se ha empleado en las lecturas de las medidas de los armónicos.

Como se explica en el manual del ADE7880 (Analog Devices, 2014), este tipo de lectura consta de 2 fases:

- En la primera el puntero se apunta hacia la dirección del primer registro de los que se deseen leer.
- En la segunda fase, encargada de leer el contenido de los registros, el master genera una condición de comienzo (un código conocido). Entonces el ADE7880 envía un ACK (acuse de recibo) y a continuación envía un el byte más significativo del primer registro. El master envía un ACK cada vez que recibe un byte. El proceso continúa así hasta que el master envía el ACK del último

byte del registro. Entonces el puntero se apunta al siguiente registro y continúa el proceso. El proceso se detiene cuando el master deja de enviar ACKs y en su lugar envía una condición de parada (un código conocido).

Capítulo 4

Experimentos y validación

4.1. Introducción

Se han realizado pruebas con el medidor conectando señales (el voltaje y la corriente) provenientes de diferentes dispositivos conectados a la red eléctrica: Una bombilla incandescente, un monitor, un ordenador y un motor trifásico. En cada una de las pruebas se han pedido las medidas al MODBUS cada minuto durante una hora. Además, se han probado de manera independiente todas las líneas del SDIN Meter 3PH (las 3 líneas se notan como A,B,C) a lo largo de las distintas pruebas para comprobar que todas funcionan adecuadamente.

La Figura 4.1 muestra de manera esquemática cómo se han conectado los diferentes dispositivos utilizados para realizar las medidas:

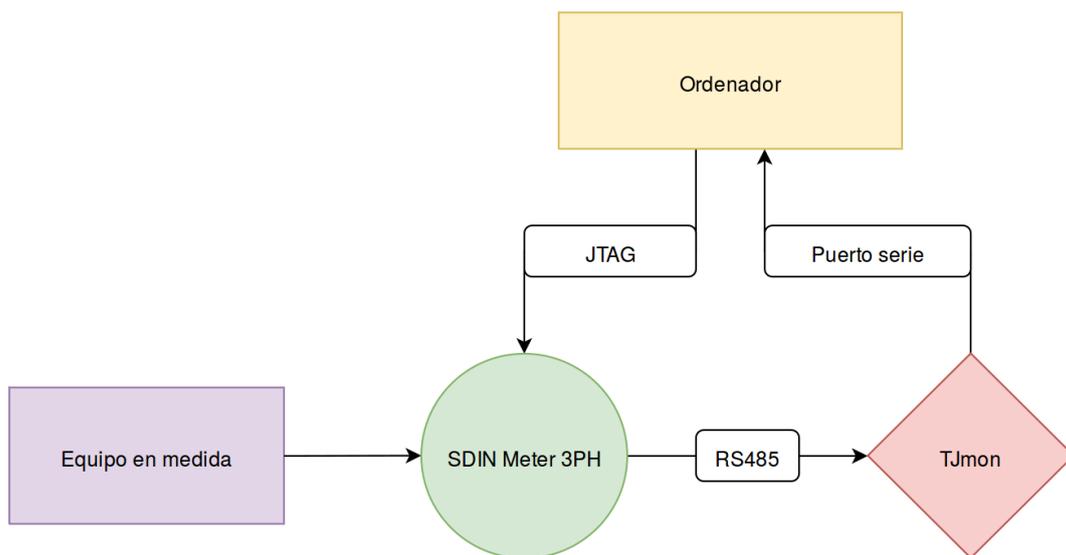


Figura 4.1: Conexiones entre equipos para realizar las medidas

Las conexiones entre los distintos dispositivos son las siguientes:

- En primer lugar, como es evidente, es necesario conectar las tensiones y corrientes que se quieran medir del o de los equipos a medir en el SDIN Meter

3PH. Solo con realizar esta conexión, siempre que el medidor esté alimentado, ya se realizan las medidas.

Las corrientes no se introducen directamente en el medidor por precaución, pasan primero por un transformador. Teniendo en cuenta que la relación del transformador empleado para medir las corrientes es de 10:5, los valores de las corrientes y potencias medidas son la mitad de los valores reales. Esto se ha tenido en cuenta y los valores que se expresan en las tablas son ya los valores reales.

- Para obtener las medidas a través del MODBUS RS-485, se ha conectado el medidor a un sistema empotrado con sistema operativo linux que ejecuta cada minuto la solicitud de las medidas. A continuación las almacena en un fichero de texto, indicando la fecha en la que las ha solicitado. Este equipo recibe el nombre de TJmon.
- El acceso a esos ficheros de texto que almacenan las medidas se hace a través de un puerto serie desde un ordenador personal.
- La programación del SDIN Meter 3PH se ha realizado a través de un JTAG desde el mismo ordenador personal, y ésta ha sido utilizada en conjunto con todo el resto del montaje para depurar el código del programa, si bien no es necesaria para recoger las medidas.

4.2. Primera prueba: Bombilla incandescente

En esta prueba, el voltaje y la corriente se han conectado en las entradas correspondientes a la línea A del medidor. La tabla 4.1 muestra los valores medio, máximo y mínimo para los parámetros de voltaje, corriente y potencia, medidos sobre el total de la señal:

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	225.83V	227.49V	222.43V
Corriente	0.82A	0.82A	0.8A
Potencia activa	186.59W	188.8W	182.2W
Potencia aparente	186.67W	188.8W	182.2W

Tabla 4.1: Medidas sobre la señal total.

La Figura 4.2 muestra la evolución del consumo total de energía. Aunque la energía activa y aparente se miden de forma independiente y ambas están representadas en la gráfica, solo se puede apreciar una línea. Esto se debe a que el factor de potencia es del 99.9%, por lo que los consumos de ambas energías son prácticamente idénticos. La potencia es prácticamente constante así que la gráfica es prácticamente una línea recta. Además, como se ha medido durante una hora y el consumo de energía se expresa en Wh, los valores finales de la gráfica para ambas energías coinciden (aproximadamente) con los valores de potencia medidos en W.

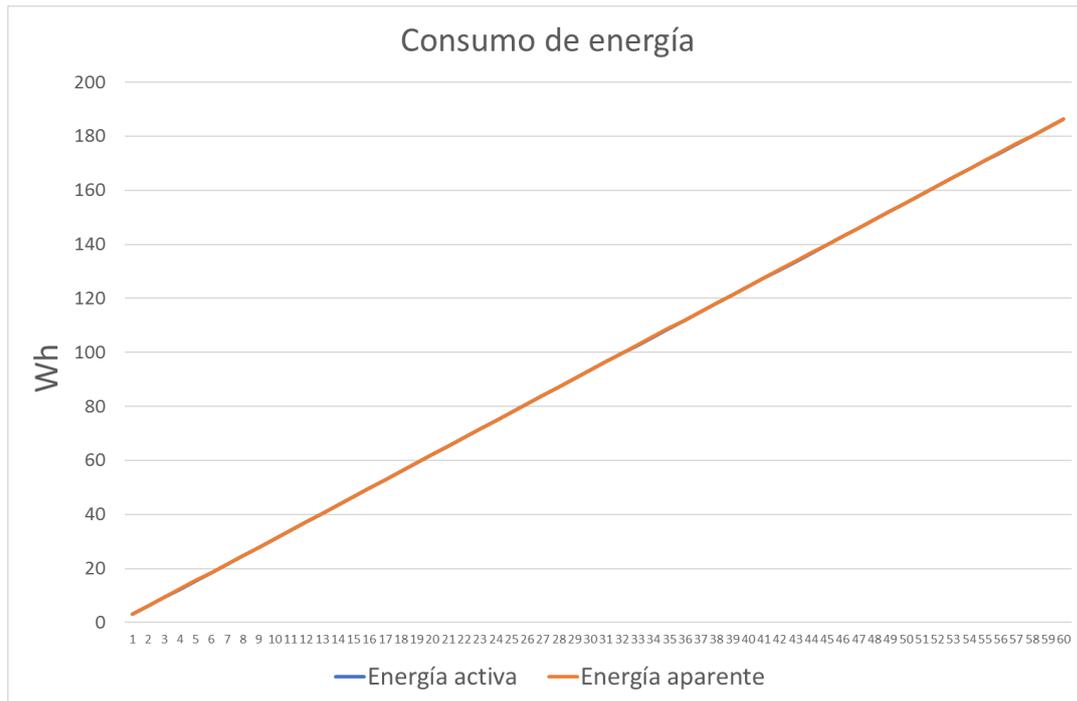


Figura 4.2: Consumo acumulado de energía

En cuanto a las medidas en los armónicos, la contribución de los mismos a la señal total es casi despreciable y está por debajo del umbral de medida, así que se muestran en la Tabla 4.2 únicamente los valores medio, mínimo y máximo obtenidos en las medidas para las distorsiones totales de voltaje y corriente:

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Distorsión armónica de voltaje	2.87 %	3.4 %	2.3 %
Distorsión armónica de corriente	2.78 %	3.5 %	2.4 %

Tabla 4.2: Distorsiones armónicas totales.

Como no hay valores individuales para cada armónico, se ha comprobado la razonabilidad de las medidas de THD comparando el valor medio medido con el estimado mediante la siguiente fórmula:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V^2 - V_F^2}}{V_F}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_F^2}}{I_F}$$

Donde V es el voltaje total de la señal, V_F el voltaje de la componente fundamental, I es la corriente total de la señal e I_F la corriente de la componente fundamental; siendo los valores medios medidos en todos los casos. El resultado de la comparativa se muestra en la Tabla 4.3

Distorsión armónica	Valor estimado	Valor medio medido
Voltaje	3.77 %	2.87 %
Corriente	0 %	2.78 %

Tabla 4.3: Distorsiones armónicas estimadas y medidas.

En este caso el valor de distorsión armónica de corriente no puede estimarse ya que con la resolución disponible la corriente media en el fundamental es exactamente igual a la corriente media total. La distorsión estimada para el voltaje es mayor aunque similar a la medida. Con una mayor resolución en las medidas el valor estimado se acercaría más al medido.

4.3. Segunda prueba: Monitor de ordenador

En esta prueba, el voltaje y la corriente se han conectado en las entradas correspondientes a la línea B del medidor. La Tabla 4.4 muestra los valores medio, máximo y mínimo para los parámetros de voltaje, corriente y potencia, medidos sobre el total de la señal:

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	228.62V	230.15V	226.79V
Corriente	0.15A	0.16A	0.14A
Potencia activa	17.51	17.8W	17.2W
Potencia aparente	36.44W	38.4W	35W

Tabla 4.4: Medidas sobre la señal total.

La Figura 4.3 muestra la evolución del consumo total de energía. En este caso, la energía activa y aparente se diferencian claramente ya que, como se puede ver en la Tabla 4.4, las potencias activa y aparente también son bien distintas. La energía aumenta de forma prácticamente lineal, al igual que en la Figura 4.2, porque las potencias del monitor son también prácticamente constantes.

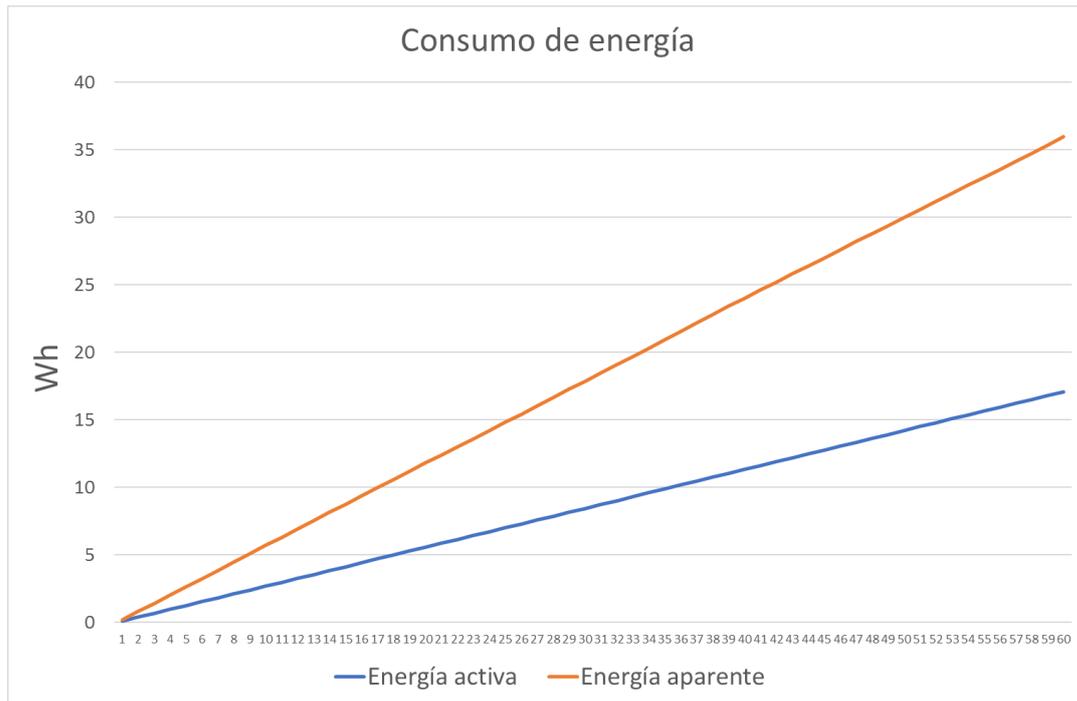


Figura 4.3: Consumo acumulado de energía

La contribución individual de cada armónico está por debajo del umbral de medida, por lo que son indetectables. Sin embargo, se puede apreciar el efecto de los armónicos en las distorsiones armónicas totales.

Como se puede ver en la Tabla 4.5, la distorsión en el voltaje es similar a la del ejemplo anterior, pero la de corriente se ha disparado. Esto se debe a que la corriente que absorbe el monitor de la red eléctrica es muy pequeña (en media, 150 mA) y por tanto es susceptible de verse afectada significativamente por perturbaciones pequeñas.

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Distorsión armónica de voltaje	2.68 %	3.4 %	2 %
Distorsión armónica de corriente	162.69 %	175.6 %	150.3 %

Tabla 4.5: Distorsiones armónicas totales.

Como los valores medidos en los armónicos están por debajo del umbral de medida, se ha realizado la misma comparativa que en la Sección 4.2 La Tabla 4.6 muestra el resultado:

Distorsión armónica	Valor estimado	Valor medio medido
Voltaje	3.84 %	2.68 %
Corriente	156.57 %	162.69 %

Tabla 4.6: Distorsiones armónicas estimadas y medidas.

Como se puede ver, ambas estimaciones se acercan bastante a los valores medidos. Como en todos los casos, aumentando la resolución se acercarían aún más.

4.4. Tercera prueba: Ordenador

En esta prueba, el voltaje y la corriente se han conectado en las entradas correspondientes a la línea C del medidor. La Tabla 4.7 muestra los valores medio, máximo y mínimo para los parámetros de voltaje, corriente y potencia, medidos sobre el total de la señal:

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	226.11V	227.03V	223.69V
Corriente	0.3A	0.44A	0.28A
Potencia activa	47.53W	70.6W	46W
Potencia aparente	69.63W	99.8W	66W

Tabla 4.7: Medidas sobre la señal total.

En este caso, además de que las potencias activa y aparente son también claramente distintas, ambas son menos constantes que en las otras pruebas. Esto se debe a que el ordenador necesita más o menos potencia en función de las operaciones que esté realizando.

La Figura 4.4 muestra la evolución del consumo total de energía. Los consumos de energía son los menos lineales de los 3 apartados, debido precisamente a los diferentes requerimientos de potencia por parte del ordenador. En cualquier caso este efecto no se aprecia mucho ya que durante la prueba el ordenador apenas ha sido utilizado.

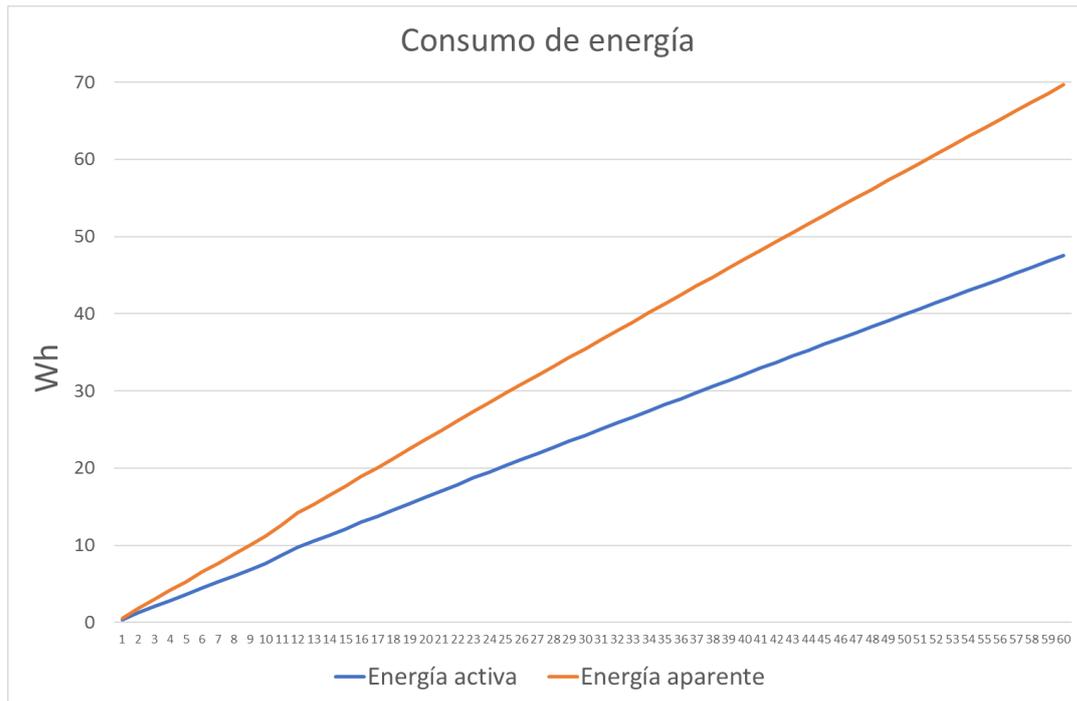


Figura 4.4: Consumo acumulado de energía

La distorsión armónica total de corriente es muy alta aunque algo menos que en la Sección 4.3. La explicación es la misma, simplemente que en este caso la corriente es pequeña pero algo mayor y por tanto la distorsión es grande pero algo menor.

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Distorsión armónica de voltaje	2.63 %	3.5 %	2.2 %
Distorsión armónica de corriente	108.44 %	110.9 %	99.5 %

Tabla 4.8: Distorsiones armónicas totales.

Como los valores medidos en los armónicos están por debajo del umbral de medida, se ha realizado la misma comparativa que en las Secciones 4.2 y 4.3. La Tabla 4.9 muestra el resultado:

Distorsión armónica	Valor estimado	Valor medio medido
Voltaje	3.79 %	2.63 %
Corriente	110.03 %	108.44 %

Tabla 4.9: Distorsiones armónicas estimadas y medidas.

Una vez más, las estimaciones se aproximan a los valores medidos y por tanto se puede afirmar que estos son correctos.

4.5. Cuarta prueba: Motor trifásico

En esta última prueba se ha empleado un motor trifásico. En lugar de alimentar el motor directamente desde la red eléctrica, se alimenta con una fuente, que se encarga de convertir el voltaje y la corriente monofásicos que recibe de la red eléctrica en señales trifásicas. Para aprovechar al máximo el analizador y medir los 3 pares de señales voltaje-corriente obtenidos, se han empleado 3 transformadores con relación 10:5, uno en cada línea. La conexión del motor se realiza en triángulo.

Además, en esta prueba se ha variado la tensión con la que se alimenta al motor. Durante los primeros 20 minutos se ha alimentado a 64V, durante los siguientes 20 a 82V y durante los últimos 20 a 123V.

Las medidas en las 3 líneas son similares, así que se presentan únicamente las de la línea B:

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	63.61V	63.74V	63.57V
Corriente	1.57A	1.58A	1.56A
Potencia activa	50.54W	51.6W	49.5W
Potencia aparente	100.74W	101.5W	99.8W

Tabla 4.10: Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 64V.

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	81.25V	81.77V	80.99V
Corriente	1.6A	1.62A	1.58A
Potencia activa	54.49W	56.1W	53.3W
Potencia aparente	130.58W	133W	129.2W

Tabla 4.11: Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 82V.

Parámetro	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
Voltaje	121.95V	122.54V	111.89V
Corriente	1.6A	1.6A	1.6A
Potencia activa	58.04W	58.9W	57.5W
Potencia aparente	195.67W	196.8W	180.1W

Tabla 4.12: Medidas sobre la señal total cuando la fuente alimenta a 123V.

Como se puede ver, aunque el aumento del voltaje provoca un aumento de la potencia aparente, la potencia activa crece de manera muy discreta. Esto provoca

que el factor de potencia disminuya con el aumento de voltaje. Además, debido al funcionamiento del equipo alimentador, la frecuencia medida varía en función del voltaje. Estos efectos se resumen en la Tabla 4.13, que muestra los valores medios de estos parámetros para las distintas tensiones de alimentación:

Parámetro	64V	82V	123V
Frecuencia	11.9Hz	15.96Hz	25.14Hz
$\cos \Phi$	54.1 %	43.3 %	29.6 %

Tabla 4.13: Frecuencia y factor de potencia a distintas tensiones de alimentación.

La Figura 4.5 muestra la evolución del consumo total de energía. Aquí también se aprecia cómo el crecimiento de la energía aparente es mucho más significativo que el de la activa debido al cambio de los factores de potencia.

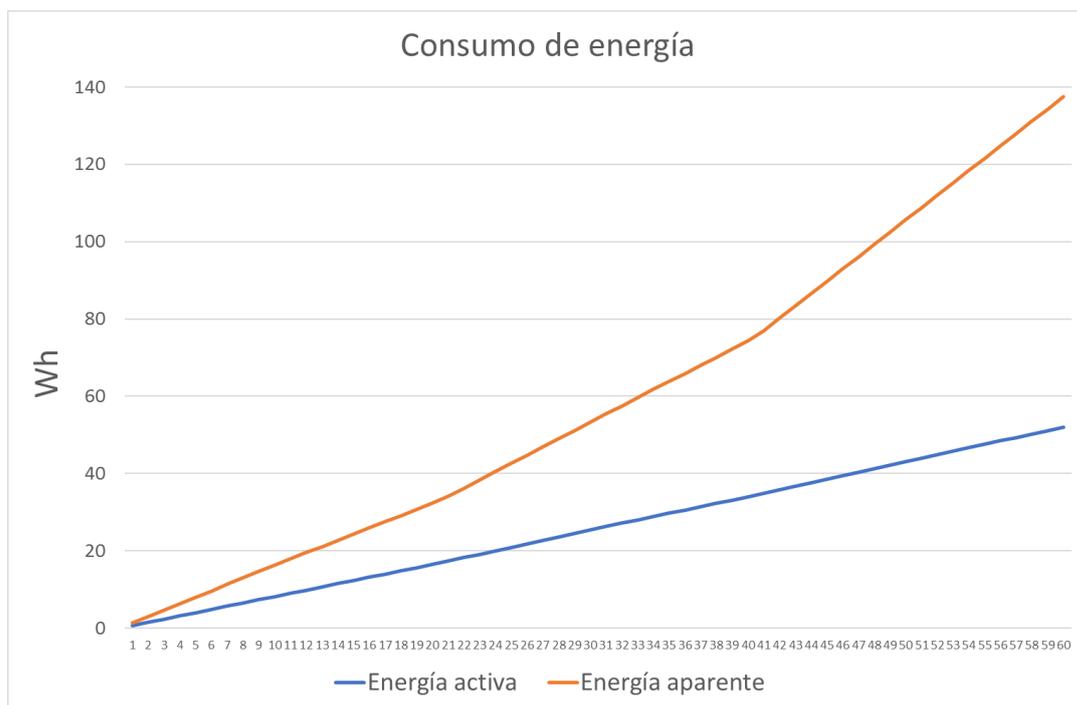


Figura 4.5: Consumo acumulado de energía

La evolución de la contribución en voltaje de los armónicos 3^o, 5^o y 7^o (en voltios) se muestra en la Figura 4.6.

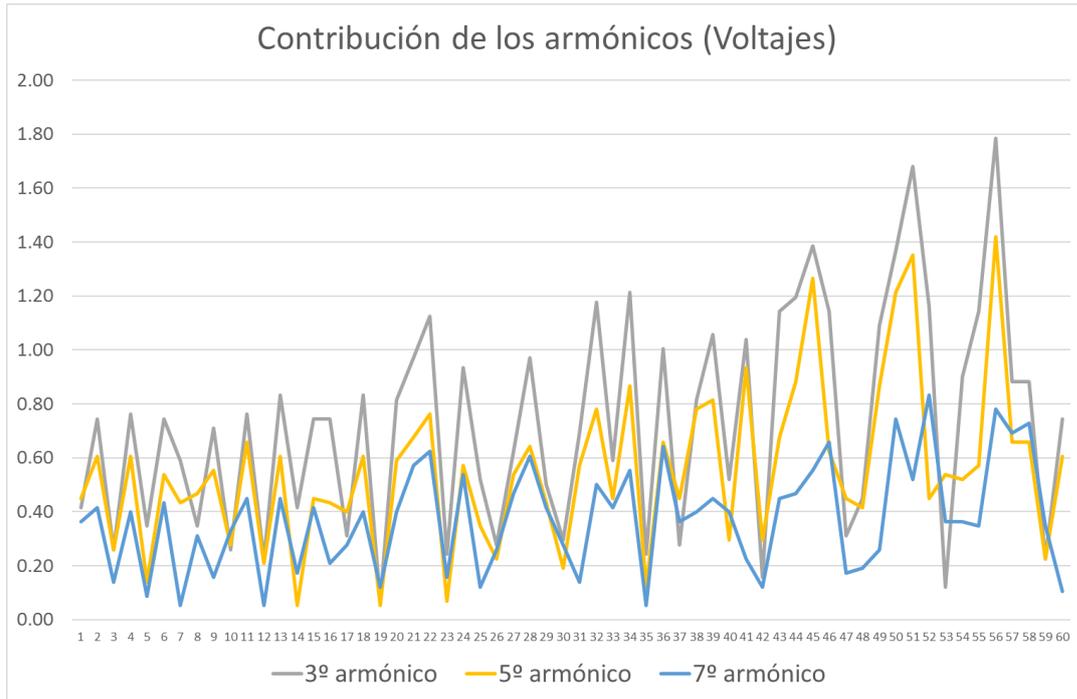


Figura 4.6: Contribución de los armónicos

Se puede ver que en general cada armónico es menos significativo que el anterior, aunque la contribución es bastante irregular, y que la contribución aumenta cuando aumenta el voltaje al que se alimenta el motor.

Para tener una idea más clara del impacto de los armónicos en la señal, la Figura 4.7 muestra el voltaje medido sobre el total de la señal además de los mismos 3 armónicos que la Figura 4.6:

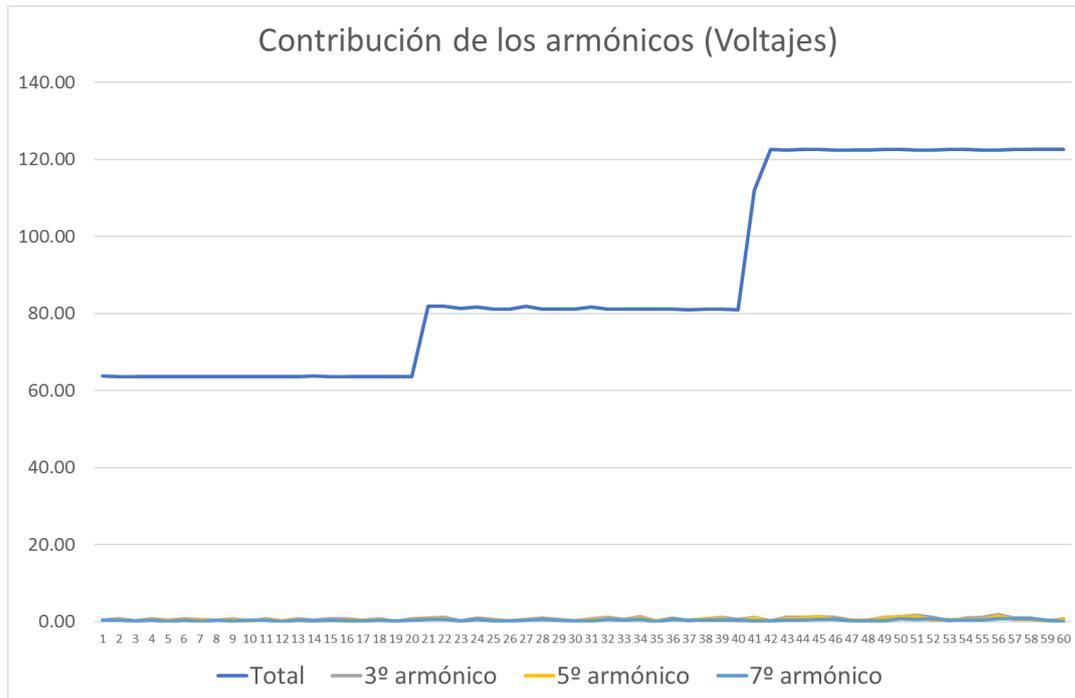


Figura 4.7: Contribución de los armónicos y voltaje total

Como se puede ver son bastante poco significativos en comparación con la señal total.

4.6. Conclusiones

Los valores de corriente, tensión y potencia se ajustan a lo esperado por las especificaciones de los equipos sobre los que se han realizado las mediciones y, a pesar de la falta de información sobre los armónicos por el problema de la resolución, los valores de distorsión armónica indican que lo que ocurre en los armónicos también es lo esperado.

Salvando las excepciones mencionadas en la Sección 4.6.1, en ninguna de las tramas enviadas se han detectado errores ni valores fuera de lo normal. Como además los motivos de esos problemas están identificados y subsanados, cabe pensar que las medidas se realizan de manera fiable.

El dispositivo no ha interrumpido su funcionamiento en ningún momento no solo a lo largo de cada prueba (todas de una hora de duración) sino tampoco durante los varios días que ha estado encendido en el laboratorio. Por lo tanto la robustez del mismo es la adecuada.

No se ha comentado nada sobre los valores de frecuencia en ninguna de las 3 primeras pruebas porque en todos los casos se mide la frecuencia extraída directamente de la red eléctrica que por supuesto mide 50 Hz, como cabría esperar, y la máxima desviación es de 0.01 Hz. Sin embargo esto también prueba que las medidas se realizan correctamente.

La temporización del sistema se ha comprobado depurando el código, para asegurar que las medidas se realizan en el tiempo que está previsto. Además, si

hubiera algún problema con ellas (se ha simulado este problema reduciendo a un segundo el periodo de muestreo de las medidas) fallaría la transmisión de los valores por el MODBUS y esto no ocurre, con lo que la temporización es también correcta.

En definitiva, aunque no se ha podido comprobar en su totalidad el correcto funcionamiento del dispositivo al trabajar con equipos con consumos muy inferiores a los que presumiblemente va a tener que manejar el SDIN Meter 3PH, todas las medidas que se han comprobado son correctas y el dispositivo funciona de manera robusta y fiable.

4.6.1. Principales problemas encontrados durante las pruebas

Como se ha descrito en la Sección 3.2.1, las funciones encargadas de permitir la transmisión de datos a través del MODBUS no se han modificado en este TFG. Esas funciones transmiten el valor de cada registro como un número con signo. Esto genera un problema de lectura en los valores situados entre $2^{15} - 1$ y $2^{16} - 1$ almacenados en registros sin signo (Se lee un número negativo que además es distinto en valor absoluto al número almacenado). Tal era el caso de las medidas de frecuencia en todas las pruebas en las que se han medido directamente el voltaje y la corriente extraídos de la red eléctrica, pues al medir con 3 decimales de resolución y teniendo en cuenta que la frecuencia es de 50 Hz, efectivamente el valor almacenado está entre $2^{15} - 1$ y $2^{16} - 1$ (50000 es mayor que 32767 y menor que 65535).

Ese problema se subsanó reduciendo la resolución de las medidas de frecuencia de 3 a 2 decimales, lo que generó otro problema que no fue detectado durante las pruebas y que ha generado algunas medidas erróneas: Las medidas del factor de potencia se calculan a partir de las medidas de frecuencia, y no se tuvo en cuenta el efecto del resolución hasta el último de los experimentos (Sección 4.5), lo que hace que las medidas del factor de potencia de los 3 primeros experimentos sean erróneas y que por ello no se comente nada sobre este parámetro en esas pruebas.

Aunque el problema está subsanado, si se vuelve a cambiar la resolución de la frecuencia habría que volverlo a considerar en el cálculo del factor de potencia. Otras opciones serían emplear el cálculo del factor de potencia que realiza el ADE7880, tomando este parámetro directamente del registro en el que lo almacena, o bien calcularlo como el cociente entre las potencias activa y reactiva:

$$\cos \Phi = \frac{P}{|S|}$$

En el caso de las 3 primeras pruebas, no se tienen datos individuales de cada armónico debido a la falta de resolución. En la última prueba ocurre algo similar para las corrientes (hay datos, pero son escasos como para tener un valor representativo). Se podría aumentar la resolución de las medidas, pero se ha tomado la decisión de no hacerlo. El motivo es que para aumentar la resolución se disminuiría el valor máximo de corriente medible, ya que el tamaño del registro es fijo (16 bits). Manteniendo la posibilidad de medir el máximo valor de corriente permitido por el ADE7880, la resolución no puede ser mayor de 0.01 A. Se ha tomado la decisión de mantener esta forma de medir ya que era la empleada en la versión del firmware anterior a la realización del TFG y también debido a que la ubicación prevista para el dispositivo es el centro de transformación del edificio C de la ETSIT, donde las corrientes medidas

serán muy superiores a las consumidas por cualquiera de los dispositivos con los que se ha experimentado. Por este motivo las medidas sobre armónicos se explican con la THD en las primeras pruebas pero en la última se detalla el voltaje de los primeros armónicos.

Por defecto, el analizador está configurado para realizar las medidas en conexión de estrella a 4 hilos. Como este no es el caso de la última prueba, la configuración ha tenido que ser cambiada manualmente en el código (escribiendo un registro concreto del ADE7880). Lo ideal para que el analizador pueda medir todo tipo de cargas sin que haga falta reescribir el código es que se le pueda transmitir la configuración adecuada por MODBUS. Esto se ha añadido en el Capítulo 5 como una línea futura de trabajo.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

El dispositivo desarrollado se encuentra, como se ha podido ver a lo largo del presente TFG, en un punto en el que es perfectamente utilizable para medir todos los parámetros eléctricos de interés de un sistema trifásico, tanto en la señal total de cada línea como en los armónicos.

Como se ha visto en la Sección 2.1, el dispositivo es comparable, e incluso supera en algunos aspectos (especialmente en las medidas sobre los armónicos) a los analizadores disponibles en el mercado.

En las pruebas realizadas (Capítulo 4) se ha comprobado que el funcionamiento del dispositivo es bueno y que las medidas son correctas y se adecúan a los valores esperados. Aunque no se ha podido medir con corrientes lo suficientemente altas como para tener medidas en cada armónico, los valores de distorsión armónica total sí corresponden con los esperados.

5.2. Líneas futuras de trabajo

Algunas de las mejoras que se podrían añadir al sistema son las siguientes:

- **Transmisión inalámbrica de los datos**, mediante una antena de corto alcance para permitir que el dispositivo no tenga que encontrarse físicamente cerca del equipo al que mande los datos ni sea necesario desplegar un cableado complejo.
- **Inclusión de una pantalla o display**, para situar al equipo a la altura de sus posibles competidores que se encuentran actualmente en el mercado.
- **Guardado de los datos en una memoria flash externa en caso de pérdida de alimentación**. Esto posibilita que no se pierdan los datos en caso de que se produzca un corte de alimentación en el lugar en el que esté conectado el dispositivo. En vez de guardarlos periódicamente, lo que implicaría una corta vida útil de la memoria externa, el dispositivo sería capaz de detectar que la tensión de alimentación está disminuyendo bruscamente y realizar un guardado de emergencia antes de que la alimentación desaparezca por completo.

- **Sustitución del timer por una interrupción externa**, que permita realizar las medidas mediante una señal proveniente de otro equipo que, por ejemplo, controle varios analizadores a la vez.

Esto también podría utilizarse aprovechando que el ADE7880 cambia el valor de un registro cuando acaba de realizar los cálculos de los armónicos, utilizando ese cambio como el disparador de la interrupción para leer los registros donde están las medidas en el momento exacto en el que se actualizan.

- **Configuración a través del MODBUS**. Gracias a esta mejora, el dispositivo podría funcionar de diferentes maneras y medir distintos tipos de cargas (Ver Sección 4.6.1) sin cambiar el código fuente del programa.

Apéndice A

Anexos

A.1. Listado de registros de 16 bits que almacenan las medidas

Todas las medidas se almacenan en registros de 16 bits salvo las de energía, que emplean 64 bits. Para crear un registro de 64 bits hacen falta 4 de 16 bits.

Las 3 líneas se denominarán línea A, línea B y línea C.

Número	Medida
1	Voltaje de la línea A
2	Voltaje de la línea B
3	Voltaje de la línea C
4	Corriente de la línea A
5	Corriente de la línea B
6	Corriente de la línea C
7	Corriente del neutro
8	Potencia activa de la línea A
9	Potencia activa de la línea B
10	Potencia activa de la línea C
11	Potencia aparente de la línea A
12	Potencia aparente de la línea B
13	Potencia aparente de la línea C
14	Factor de potencia de la línea A
15	Factor de potencia de la línea B
16	Factor de potencia de la línea C
17	Frecuencia de la línea A
18	Frecuencia de la línea B
19	Frecuencia de la línea C
20-23	Energía activa de la línea A
24-27	Energía activa de la línea B
28-31	Energía activa de la línea C
32-35	Energía aparente de la línea A
36-39	Energía aparente de la línea B

Número	Medida
40-43	Energía aparente de la línea C
44	Voltaje del armónico fundamental de la línea A
45	Corriente del armónico fundamental de la línea A
46	Potencia activa del armónico fundamental de la línea A
47	Potencia reactiva del armónico fundamental de la línea A
48	Voltaje del tercer armónico de la línea A
49	Corriente del tercer armónico de la línea A
50	Potencia activa del tercer armónico de la línea A
51	Potencia reactiva del tercer armónico de la línea A
52	Voltaje del quinto armónico de la línea A
53	Corriente del quinto armónico de la línea A
54	Potencia activa del quinto armónico de la línea A
55	Potencia reactiva del quinto armónico de la línea A
56	Voltaje del séptimo armónico de la línea A
57	Corriente del séptimo armónico de la línea A
58	Potencia activa del séptimo armónico de la línea A
59	Potencia reactiva del séptimo armónico de la línea A
60	Voltaje del noveno armónico de la línea A
61	Corriente del noveno armónico de la línea A
62	Potencia activa del noveno armónico de la línea A
63	Potencia reactiva del noveno armónico de la línea A
64	Voltaje del decimoprimer armónico de la línea A
65	Corriente del decimoprimer armónico de la línea A
66	Potencia activa del decimoprimer armónico de la línea A
67	Potencia reactiva del decimoprimer armónico de la línea A
68	Voltaje del decimotercer armónico de la línea A
69	Corriente del decimotercer armónico de la línea A
70	Potencia activa del decimotercer armónico de la línea A
71	Potencia reactiva del decimotercer armónico de la línea A
72	Voltaje del decimoquinto armónico de la línea A
73	Corriente del decimoquinto armónico de la línea A
74	Potencia activa del decimoquinto armónico de la línea A
75	Potencia reactiva del decimoquinto armónico de la línea A
76	Distorsión armónica total de voltaje de la línea A
77	Distorsión armónica total de corriente de la línea A
78	Voltaje del armónico fundamental de la línea B
79	Corriente del armónico fundamental de la línea B
80	Potencia activa del armónico fundamental de la línea B
81	Potencia reactiva del armónico fundamental de la línea B
82	Voltaje del tercer armónico de la línea B
83	Corriente del tercer armónico de la línea B
84	Potencia activa del tercer armónico de la línea B
85	Potencia reactiva del tercer armónico de la línea B

Número	Medida
86	Voltaje del quinto armónico de la línea B
87	Corriente del quinto armónico de la línea B
88	Potencia activa del quinto armónico de la línea B
89	Potencia reactiva del quinto armónico de la línea B
90	Voltaje del séptimo armónico de la línea B
91	Corriente del séptimo armónico de la línea B
92	Potencia activa del séptimo armónico de la línea B
93	Potencia reactiva del séptimo armónico de la línea B
94	Voltaje del noveno armónico de la línea B
95	Corriente del noveno armónico de la línea B
96	Potencia activa del noveno armónico de la línea B
97	Potencia reactiva del noveno armónico de la línea B
98	Voltaje del decimoprimer armónico de la línea B
99	Corriente del decimoprimer armónico de la línea B
100	Potencia activa del decimoprimer armónico de la línea B
101	Potencia reactiva del decimoprimer armónico de la línea B
102	Voltaje del decimotercer armónico de la línea B
103	Corriente del decimotercer armónico de la línea B
104	Potencia activa del decimotercer armónico de la línea B
105	Potencia reactiva del decimotercer armónico de la línea B
106	Voltaje del decimoquinto armónico de la línea B
107	Corriente del decimoquinto armónico de la línea B
108	Potencia activa del decimoquinto armónico de la línea B
109	Potencia reactiva del decimoquinto armónico de la línea B
110	Distorsión armónica total de voltaje de la línea B
111	Distorsión armónica total de corriente de la línea B
112	Voltaje del armónico fundamental de la línea C
113	Corriente del armónico fundamental de la línea C
114	Potencia activa del armónico fundamental de la línea C
115	Potencia reactiva del armónico fundamental de la línea C
116	Voltaje del tercer armónico de la línea C
117	Corriente del tercer armónico de la línea C
118	Potencia activa del tercer armónico de la línea C
119	Potencia reactiva del tercer armónico de la línea C
120	Voltaje del quinto armónico de la línea C
121	Corriente del quinto armónico de la línea C
122	Potencia activa del quinto armónico de la línea C
123	Potencia reactiva del quinto armónico de la línea C
124	Voltaje del séptimo armónico de la línea C
125	Corriente del séptimo armónico de la línea C
126	Potencia activa del séptimo armónico de la línea C
127	Potencia reactiva del séptimo armónico de la línea C
128	Voltaje del noveno armónico de la línea C

Número	Medida
129	Corriente del noveno armónico de la línea C
130	Potencia activa del noveno armónico de la línea C
131	Potencia reactiva del noveno armónico de la línea C
132	Voltaje del decimoprimer armónico de la línea C
133	Corriente del decimoprimer armónico de la línea C
134	Potencia activa del decimoprimer armónico de la línea C
135	Potencia reactiva del decimoprimer armónico de la línea C
136	Voltaje del decimotercer armónico de la línea C
137	Corriente del decimotercer armónico de la línea C
138	Potencia activa del decimotercer armónico de la línea C
139	Potencia reactiva del decimotercer armónico de la línea C
140	Voltaje del decimoquinto armónico de la línea C
141	Corriente del decimoquinto armónico de la línea C
142	Potencia activa del decimoquinto armónico de la línea C
143	Potencia reactiva del decimoquinto armónico de la línea C
144	Distorsión armónica total de voltaje de la línea C
145	Distorsión armónica total de corriente de la línea C

Tabla A.1: Listado de registros que almacenan las medidas.

Bibliografía

- Analog Devices (2014). Hoja de características y manual del ADE7880. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7880.pdf. [Online; accessed 18/11/2016].
- ETI (2016). Hoja de características del ENA3/ENA3D. www.etigroup.ro/images/userfiles/ro-R0/documents/media/news/03b%20ETIMETER%20ENG.pdf. [Online; accessed 18/11/2016].
- Herholdt Controls (2013). Hoja de características del ECSAN 80-5. www.hhcontrols.com/caricamenti/pdf_prod/uk/ECSAN08_Mnl_UK.pdf. [Online; accessed 18/11/2016].
- QEED (2014). Hoja de características del QC-POWER-T-485. www.qeed.it/wp-content/uploads/2014/01/QC-POWER-T-485-EN-01072014.pdf. [Online; accessed 18/11/2016].
- Real Time Engineers ltd. (2016). Web de FreeRTOS. www.freertos.org/RTOS.html. [Online; accessed 18/11/2016].
- ST Microelectronics (2015). Manual de referencia del STM32F103. www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf. [Online; accessed 18/11/2016].