

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y  
Automática

Monitorización y supervisión de redes de  
distribución con PQMs, uPMUs y Machine Learning

Autor: Victoria Arenas Ramos

Tutor: Federico Cuesta Rojo

**Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y automática

# **Monitorización y supervisión de redes de distribución con PQMs, uPMUs y Machine Learning**

Autor:

Victoria Arenas Ramos

Tutor: Federico Cuesta Rojo

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster: Monitorización y supervisión de redes de distribución con PQMs, uPMUs y Machine Learning

Autor: Victoria Arenas Ramos

Tutor: Federico Cuesta Rojo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal



El presente trabajo se centra en el estudio del papel que cumplen los analizadores de calidad de suministro en sus aplicaciones en redes eléctricas de distribución, así como en el desarrollo de una infraestructura software que permita la gestión conjunta de varios de estos dispositivos de forma remota a la vez que permita el acceso a las medidas de una forma cómoda para trabajos de análisis, predicción o control. La infraestructura debe cumplir con los requerimientos de sincronismo, precisión temporal y escalabilidad necesarios al trabajar con los analizadores de calidad, siempre teniendo en cuenta el gran volumen de datos que estos dispositivos generan.

Como analizadores de calidad de suministro se trabajará con dos analizadores de calidad PQube3, dispositivos comerciales de la empresa Powerside que cumplen con el estándar IEC 61000-4-30 clase A. Por otro lado, la infraestructura software consistirá en un agente que recoja los datos, un gestor de bases de datos especialmente dedicado a series temporales, y una herramienta de análisis que permita analizar la información almacenada. La elección de cada una de las herramientas será discutida a lo largo de este trabajo.

Como prueba de concepto se recurrirá a dicha infraestructura para distinguir mediante un modelo predictivo entre tres cargas distintas, simulando así que se trata de tres estados de la red diferentes. Para ello, se caracterizarán las tres cargas- en este caso, tres bombillas LED que distorsionan la forma de onda con armónicos de distinta frecuencia- y se entrenarán dos modelos clasificatorios con datos almacenados off-line, para posteriormente trabajar a tiempo real con los datos recogidos por los analizadores.

Junto con los analizadores de calidad de suministro, se añade tanto al estudio como a la infraestructura una unidad de medición fasorial o PMU, un dispositivo habitual en las redes de distribución con aplicaciones muy similares a los analizadores de calidad, pero con una filosofía diferente. Su incorporación al estudio permitirá realizar una comparativa entre ambos modelos, conociendo así con mayor amplitud el estado del arte en monitorización de redes de baja y media tensión. Su incorporación a la plataforma desarrollada permite asegurar la escalabilidad del sistema.

**Palabras clave:** analizador de calidad de suministro, sincrofasor, unidad de medición fasorial (PMU), red de distribución, monitorización, generación distribuida (DER), gemelo digital





# Abstract

---

This project is focused on the study of the role of power quality analyzers in their applications in electrical distribution networks, as well as on the development of a software infrastructure that allows the joint management of several of these devices remotely while allowing access to the measurements in a comfortable way for analysis, prediction, or control works. The infrastructure must meet the requirements of synchronism, temporal accuracy and scalability needed when working with quality analyzers, while considering the large volume of data that these devices generate.

We will work with two PQube3 power quality analyzers, commercial devices from Powerside that comply with the IEC 61000-4-30 class A standard. On the other hand, the software infrastructure will consist of an agent that collects the data, a database manager especially focused on time series, and an analysis tool that allows the analysis of the stored information. The choice of each of the tools will be discussed throughout this paper.

As a proof of concept, this infrastructure will be used to distinguish between three different loads by means of a predictive model, thus simulating three different network states. To this end, the three loads will be characterized - in this case, three LED bulbs that distort the waveform with harmonics of different frequency - and two classifying models will be trained with data stored off-line, to subsequently work in real time with the data collected by the analyzers.

Along with the power quality analyzers, a phasor measurement unit or PMU, a common device in distribution networks with very similar applications to the quality analyzers, but with a different philosophy, will be added to both the study and the infrastructure. Its incorporation into the study will allow a comparison between both approaches, thus gaining a better understanding of the state of the art in monitoring low and medium voltage networks. Its incorporation to the developed platform will ensure the scalability of the system.

**Keywords:** power quality analyzer, synchrophasor, phasor measurement unit (PMU), distribution network, monitoring, distributed energy resource (DER), digital twin.



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Introducción</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	2
<b>2 Estudio de los analizadores de calidad</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Redes de distribución</i>	3
2.2. <i>Analizadores de calidad de suministro</i>	4
2.2.1. <i>Definición</i>	4
2.2.2. <i>Aplicaciones</i>	4
2.2.3. <i>Estructura</i>	6
2.2.4. <i>Medidas</i>	6
2.3. <i>PMUs / <math>\mu</math>PMUs</i>	8
2.3.1. <i>Definición</i>	8
2.3.2. <i>Estructura</i>	8
2.3.3. <i>Medidas</i>	8
2.3.4. <i>Micro PMU (<math>\mu</math>PMU)</i>	9
2.3.5. <i>Aplicaciones</i>	9
2.4. <i>Comparativa entre ambos equipos</i>	10
2.5. <i>Otros equipos de medida</i>	11
2.6. <i>PQube3</i>	12
2.7. <i><math>\mu</math>PMU de Powerside</i>	14
<b>3 Estudio de las comunicaciones y almacenamiento</b>	<b>17</b>
3.1. <i>Características de las comunicaciones en una Microred</i>	17
3.2. <i>Software y hardware de comunicaciones (Diseño del sistema)</i>	18
3.3. <i>Solución propuesta</i>	20
3.3.1. <i>Estándares de comunicaciones</i>	20
3.3.2. <i>Concentrador de datos fasoriales</i>	21
3.3.3. <i>Gestor de base de datos</i>	22
3.3.4. <i>Herramientas de análisis</i>	24
3.3.5. <i>Herramienta de monitorización</i>	25
<b>4 Materiales y configuración experimental</b>	<b>27</b>
4.1. <i>Recursos utilizados</i>	27
4.1.1. <i>IntelNuc</i>	27
4.1.2. <i>Sondas de corriente</i>	27
4.1.3. <i>Cargas resistivas</i>	28

---

4.1.4.	Bombillas	28
4.1.5.	Fuente monofásica Agilet & LabVIEW	28
4.2.	<i>Metodología</i>	29
4.2.1.	Montaje de la red	30
4.2.2.	Montaje con la fuente programable	31
<b>5</b>	<b>Estudio del comportamiento de los equipos</b>	<b>33</b>
5.1.	<i>Ensayos con dos PQube3</i>	33
5.1.1	Forma de onda	33
5.1.2	Medida de la frecuencia	34
5.1.3	Medidas de tensión y corriente	36
5.2.	<i>Medida de formas de onda con dos PQube3</i>	40
5.2.1.	Formas de onda Flat-top y Pointed-top	40
5.2.2.	Otras formas de onda artificiales	41
5.2.3.	Medida de una carga trifásica de tres LED en la red local	43
5.3.	<i>Ensayos comparativos entre PQube3 y <math>\mu</math>PMU</i>	45
5.3.1.	Frecuencia	45
5.3.2.	Tensiones y corrientes	48
<b>6.</b>	<b>Identificación del estado de la red con Machine Learning</b>	<b>53</b>
6.1.	<i>Objetivo y metodología</i>	53
6.2.	<i>Recolección y preprocesado de los datos</i>	54
6.3.	<i>Entrenamiento del modelo</i>	55
6.4.1.	Árbol de decisión	55
6.4.2.	Red Neuronal	57
6.4.	<i>Clasificación a tiempo real.</i>	59
6.4.1.	Python API	59
6.4.2.	Resultados	60
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>65</b>
	<b>Referencias</b>	<b>67</b>
	<b>Glosario</b>	<b>71</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Relación de medidas potencialmente disponibles en un analizador de calidad de suministro. Basado en [15]	7
Tabla 2. Tabla resumen comparativa de las aplicaciones para PQM y $\mu$ PMU	10
Tabla 3. Tabla resumen de las características de una $\mu$ PMU y una PQ	10
Tabla 4. Características del analizador de calidad PQube3 de Powerside [33]	14
Tabla 5. Características de la $\mu$ PMU de Powerside [34]	16
Tabla 6. Comparativa de las comunicaciones	17
Tabla 7. Estructura de los datos almacenados	24
Tabla 8. Ensayos con dos PQube3	33
Tabla 9. Valores estadísticos por ambos dispositivos	36
Tabla 10. Ensayos con armónicos	40
Tabla 11. Valores de tensión para cada armónico para las señales de onda Flat top y Pointed top [46]	40
Tabla 12. Relación de armónicos para el ensayo 5	42
Tabla 13. Ensayos comparativos entre PQube3 y $\mu$ PMU	45
Tabla 14. Comparación de valores estadísticos en las medidas de frecuencia entre una PQube3 y una $\mu$ PMU	46
Tabla 15. Comparación de valores estadísticos en las medidas de tensión entre una PQube3 y una $\mu$ PMU	49
Tabla 16. Precisión alcanzada por varios árboles de decisión	56
Tabla 17. Precisión alcanzada por varios clasificadores multicapa	58

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de distribución monitorizada por diversos equipos [3]	4
Figura 2. Estructura interna de un PQM. Basado en [4]	6
Figura 3. Estructura interna de una PMU. Basado en [20]	8
Figura 4. De izquierda a derecha, medidor inteligente en uso en Europa, sensores inalámbricos de línea y un registrador de eventos	12
Figura 5. PQube3 de Powerside	12
Figura 6. Captura de la interfaz facilitada por PQube3	13
Figura 7. Caída de voltaje registrada por un PQube3	13
Figura 8. Micro-sincrofasor de Powerside	14
Figura 9. Interfaz Web de la $\mu$ PMU de PowerSide.	15
Figura 10. Infraestructura propuesta	19
Figura 11. Posible infraestructura para varias PMUs [4]	19
Figura 12. Infraestructura diseñada con los programas que realizan cada función	20
Figura 13. Pestaña dedicada a la monitorización del OpenPDC Manager	21
Figura 14. Librerías de clientes disponibles en InfluxDB	22
Figura 15. Algunos de los plugin disponibles para telegraf	23
Figura 16. Ejemplo de Query en InfluxDB Data Explorer	23
Figura 17. Herramienta para Dashboard integrada en InfluxDB	24
Figura 18. Ejemplo de consulta	24
Figura 19. Ejemplo de código donde se realiza la consulta a la base de datos	25
Figura 20. Ejemplo de cuadro de mando en Grafana	26
Figura 21. IntelNuc	27
Figura 22. Sonda de corriente de Powerside	27
Figura 23. Carga resistiva variable	28
Figura 24. Distintos modelos de bombillas Led	28
Figura 25. Fuente monofásica Agilet 6811B	28
Figura 26. Plataforma en LabVIEW para programar la fuente monofásica Agilet 6811B	29
Figura 27. PQube3 (izq.) y $\mu$ PMU (dcha.) sobre un carril DIN	30
Figura 28. Montaje con una PQube3 y una $\mu$ PMU midiendo la señal de la red	30
Figura 29. Montaje con señal proveniente de la red con tres Leds como carga	31
Figura 30. Montaje con una PQube3 y una $\mu$ PMU midiendo la señal de la red	31
Figura 31. Cuadro disponible en el laboratorio con la conexión a la fuente monofásica	32
Figura 32. Montaje de una $\mu$ PMU y una PQube3 con la fuente monofásica	32

Figura 33. De izq. a dcha. y de arriba hacia abajo, red local con carga 200 $\Omega$ , red local con carga 100 $\Omega$ , red local con carga 500 $\Omega$ y señal proveniente de la fuente monofásica.	34
Figura 34. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la fuente monofásica	34
Figura 35. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200 $\Omega$	35
Figura 36. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100 $\Omega$	35
Figura 37. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 $\Omega$	35
Figura 38. Comparación de tensiones con señal proveniente de la fuente monofásica	36
Figura 39. Comparación de corrientes con señal proveniente de la fuente monofásica	36
Figura 40. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200 $\Omega$	37
Figura 41. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100 $\Omega$	37
Figura 42. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 $\Omega$	38
Figura 43. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200 $\Omega$	38
Figura 44. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100 $\Omega$	39
Figura 45. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 $\Omega$	39
Figura 46. Formas de onda Flat-top (izq.) y Pointed-top(dcha.)	41
Figura 47. Armónicos de tensión de la señal Flat-top (arriba) y pointed-top (abajo)	41
Figura 48. Forma de onda distorsionada. Imagen creada en LabVIEW (izq.) y medida con los PQube3 (dcha.)	42
Figura 49. Armónicos de tensión de una señal distorsionada según la tabla 12	43
Figura 50. Forma de onda distorsionada con un THD inferior al 5%	43
Figura 51. Armónicos de tensión de una señal fuertemente distorsionada	43
Figura 52. Forma de onda de las tres fases de la red cada una conectada a una carga Led distinta	44
Figura 53. Armónicos causados por tres tipos distintos de bombillas LED	44
Figura 54. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de 200 $\Omega$ , medidos por PQube3 (izq.) y $\mu$ PMU (dcha.)	45
Figura 55. Comparación de las medidas de PQube3 y $\mu$ PMU de la señal de la red local con una carga resistiva de 200 $\Omega$	46
Figura 56. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de 100 $\Omega$ , medidos por PQube3 (izq.) y $\mu$ PMU (dcha.)	47
Figura 57. Comparación de las medidas de PQube3 y $\mu$ PMU de la señal de la red local con una carga resistiva de 100 $\Omega$	47
Figura 58. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de 500 $\Omega$ , medidos por PQube3 (izq.) y $\mu$ PMU (dcha.)	48
Figura 59. Comparación de las medidas de PQube3 y $\mu$ PMU de la señal de la red local con una carga resistiva de 500 $\Omega$	48
Figura 60. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 200 $\Omega$	49
Figura 61. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 100 $\Omega$	50
Figura 62. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 500 $\Omega$	50
Figura 63. Comparación de las medidas de corriente de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 200 $\Omega$	51
Figura 64. Comparación de las medidas de corriente de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva	

---

de 100 $\Omega$	51
Figura 65. Comparación de las medidas de corriente de PQube3 y $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 500 $\Omega$	52
Figura 66. Predicción de la bombilla correcta	53
Figura 67. Media de los armónicos registrados para cada bombilla	54
Figura 68. Valor del armónico 3 durante los primeros 40 min. Azul: bombilla 1, Rosa: bombilla 2, Naranja: bombilla 3	55
Figura 69. Valor del armónico 45 durante los primeros 40 min. Azul: bombilla 1, Rosa: bombilla 2, Naranja: bombilla 3	55
Figura 70. Matriz de confusión de los modelos con una capa de profundidad (izq.) y el elegido con dos capas (dcha.)	57
Figura 71. Estructura del Perceptrón	57
Figura 72. Predicción errónea(izq.), predicción adecuada (centro) y predicción con un 100% de precisión (dcha.)	59
Figura 73. Guardado de uno de los modelos preentrenados	60
Figura 74. Correcta clasificación a tiempo real de las tres bombillas	61
Figura 75. Clasificación de las tres bombillas, cambiadas de fase	61
Figura 76. Clasificación errónea de la red sin cargas	62
Figura 77. Matrices de confusión a lo largo de un ensayo	62
Figura 78. Matrices de confusión al pasar de estar las bombillas frías a calientes	63
Figura 79. Armónicos registrados con las bombillas frías	63
Figura 80. Armónicos registrados al cabo de 10 minutos de funcionamiento	64







# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Introducción

En la actualidad los pequeños sistemas fotovoltaicos ubicados en cubiertas de edificios, bien residenciales, industriales o de servicios, suponen una parte importante de la generación de energía. La integración de los sistemas de recarga de vehículos eléctricos es inminente y, por tanto, es necesario supervisarlos para adaptar su consumo al resto de la demanda. Las instalaciones Fotovoltaicas (FV) de pequeño tamaño suelen ser instalaciones con una menor supervisión sobre su producción, tienen gran variabilidad en su configuración, diseño, distribución y mantenimiento, que hace que no sea posible la aplicación de los modelos de predicción aplicados a las grandes centrales FV. En muchas ocasiones son sistemas en los que la producción y por tanto su rentabilidad económica no están optimizados, presentando un potencial de mejora de su funcionamiento. Sin embargo, la transición hacia un sistema de generación de energía más sostenible requiere de un contexto tecnológico y normativo que atraiga no solo a los grandes inversores de grandes plantas, sino que favorezca también la presencia de estas pequeñas instalaciones distribuidas, para que los pequeños consumidores-productores (prosumers) puedan contribuir a los esfuerzos de inversión necesarios y jueguen también un papel importante en la transición energética.

En este contexto, es fundamental analizar la calidad de la energía de la red para detectar las posibles perturbaciones y actuar en consonancia. El creciente despliegue de las instalaciones FV en la red de distribución, y el impacto que producen la electrónica de potencia de los inversores en la calidad de la energía de la red es una preocupación importante para los fabricantes, productores de energía solar y operadores de red. Su presencia en las redes de distribución de baja tensión lleva asociados problemas como la existencia de armónicos o fluctuaciones y desequilibrios en la tensión, que pueden llegar a ser significativos si crece el nivel de penetración, así como la necesidad de abordar estudios acerca de la capacidad de alojamiento (HC), en la red de este tipo de instalaciones.

Con el fin de medir y analizar dichas perturbaciones, se recurre al uso de analizadores de calidad de suministro. Un analizador de calidad de suministro cuenta con varias ventajas frente a un medidor clásico (contador eléctrico, o vatímetro), al ser capaz de analizar por sí mismo todos los fenómenos eléctricos no deseados que pudiesen afectar a la carga o a la fuente suministradora de la energía eléctrica. Es decir, debe ser capaz de recoger, examinar e interpretar las medidas de energía de la red y transformarlas en eventos que representen lo ocurrido en la red de una forma entendible para una persona. Todo ello, a tiempo real, lo que requiere un nivel de precisión más que exigente.

El analizador de calidad de la red que se utilizará en este TFM es el PQube3 que mide, identifica y registra todas las alteraciones de la calidad de la energía. Pueden medir una variedad de parámetros asociados al consumo y la generación de energía, como tensiones, corrientes, potencias, parámetros pico y RMS, armónicos y una gran variedad de eventos, como sobretensiones, huecos, etc.

Este analizador es uno de los más avanzados. Cuenta con comunicaciones Modbus TCP/IP y USB, así como con una aplicación para capturar los datos de forma remota, "PQube Modbus client", la cual tiene la posibilidad de registrar una secuencia en un fichero .CSV, pero no permite el almacenamiento y gestión de los datos de forma sincronizada para la generación de series temporales. Para ello, sería necesario enlazar las comunicaciones Modbus con una base de datos. Este mecanismo permitiría analizar los eventos y su propagación en línea, de forma simultánea con varios equipos, y no solo con los datos acumulados en el fichero CSV.

Por tanto, en este proyecto se propone la gestión conjunta de varias PQM con acceso simultáneo a los datos en

tiempo real. De esta forma, varias PQM puede estar situada en diferentes puntos de una Microred para analizar el comportamiento de la red de distribución cuando se produce un hueco de tensión, una interrupción o la inyección de armónicos procedentes de una carga activa. Su aplicación se verá ejemplificada a través de la creación de un modelo predictivo capaz de distinguir a tiempo real entre tres cargas distintas- en concreto, tres bombillas LED – leyendo las medidas de los analizadores y comparando con estados anteriores de la red.

Por otro lado, otro tipo de equipos, ya sean de calidad de suministro u con otras funcionalidades pueden almacenar la información dentro de la misma infraestructura. Por ello, junto con los equipos de calidad de suministro se incorporará a la estructura una unidad de medida fasorial, o sincrofasor, o PMU. Se trata de un equipo con aplicaciones similares, pero con una filosofía muy diferente. La incorporación de este al trabajo garantiza la universalidad de la infraestructura diseñada, y permite a su vez realizar una comparativa entre los datos medidos por uno y otro dispositivo. En concreto, se ha elegido un dispositivo del mismo fabricante que el analizador de suministro, contando con un hardware muy parecido y apareciendo las principales diferencias en el software.

## 1.2. Objetivos

Partiendo de lo descrito en el apartado anterior, se marca como principal objetivo para este TFM el desarrollo de una infraestructura software de almacenamiento de datos adaptada a los analizadores de calidad, pero no cerrada a ellos. Su rango de aplicación se centrará en redes de distribución donde los pequeños generadores son habituales, y por tanto precisan con mayor asiduidad de un sistema de monitorización eficiente.

Con el fin de completar este objetivo principal, existen una serie de objetivos parciales que marcan la línea de trabajo a seguir:

- Estudio del estado del arte de las redes eléctricas de distribución, microrredes, *Smart grid* y en general de todas aquellas redes eléctricas de baja tensión que tienen una mayor complejidad y por tanto merecen ser analizadas con equipos de medición.
- Estudio del estado del arte de los diferentes dispositivos dedicados a la monitorización de redes de distribución, especialmente de equipos de alta calidad como son los analizadores de calidad de suministro y las unidades de medición fasorial, y en concreto, el estudio de dos equipos comerciales, PQube3 y la PMU de Powerside.
- Estudio del estado del arte de las plataformas software dedicadas a recoger y/o almacenar los datos medidos por dichos equipos, así como del acceso a los datos medidos, especialmente en aplicaciones dirigidas al análisis y al estudio, y no tanto a la actuación o protección.
- Diseño y puesta en marcha de una infraestructura hardware y software que permita recoger las medidas de ambos equipos y acceder a los datos con posterioridad con comodidad para su posterior aplicación en diversos ámbitos.
- Mediante una serie de ensayos de laboratorio, comprobar el correcto funcionamiento de la infraestructura software, así como la calidad de las medidas tomadas por los distintos dispositivos y su comportamiento.
- Identificación del estado de la red mediante dos modelos clasificadores predictivos basados en Machine Learning capaces de distinguir entre tres cargas distintas, simulando tres estados diferentes de la red, y su ejecución a tiempo real gracias a la estructura diseñada.

El trabajo realizado cubriendo estos objetivos se resume en esta memoria, siguiendo la siguiente estructura: en la sección 2, se realiza el estudio de los equipos de medición y las redes de distribución. Además, se presentan los equipos con los que se va a trabajar. En la sección 3, se estudian diversos modelos software de monitorización en las redes eléctricas objetivo. Asimismo, se presenta la infraestructura diseñada. En el apartado 4 se describen los materiales y el montaje empleados en los ensayos de laboratorio, y los resultados son mostrados en el apartado siguiente. Finalmente, el apartado 6 muestra el proceso seguido para diseñar los modelos clasificadores, y los resultados obtenidos. En el último apartado se extraen las conclusiones del trabajo realizado, y se abren vías hacia el empleo futuro del ecosistema aquí estudiado.

# 2 ESTUDIO DE LOS ANALIZADORES DE CALIDAD

---

## 2.1. Redes de distribución

Las redes eléctricas de distribución están dentro de una era de transición, y cada día crecen en complejidad. La integración de pequeños generadores distribuidos (DER, Distributed Energy Resources), que inyectan a la red desde donde antiguamente solo se encontraban consumidores están forzando a convertir las antiguas redes eléctricas de distribución pasiva con transporte de electricidad unidireccional a redes de distribución activa con transporte bidireccional [1]. Los componentes activos proveen de mayor flexibilidad a la red, dándole la posibilidad de trabajar como productor o como consumidor, o incluso de forma aislada (el llamado “modo isla”), pero también necesitan de un mayor control y conocimiento de la red. Una alta tasa de inyección de estos equipos puede afectar negativamente a la calidad de la señal y tener un impacto negativo en la red de transmisión. Se crea por ello la necesidad de monitorizar las redes distribuidas y de estudiarlas con el fin de crear modelos para la gestión de la demanda de mayor calidad. Las redes de distribución activa altamente monitorizadas suelen recibir el calificativo de *Smart grid*. En una *Smart grid* se encuentran elementos como:

- **Consumidores.** Los cuáles serán de carácter industrial o urbano. Aunque se trata de un elemento pasivo, los tipos de consumidores se están modernizando. Nuevos consumidores aparecen en las redes de distribución, provocando efectos secundarios en la línea, y es necesario estudiar las características de estos nuevos elementos. Algunos ejemplos pueden ser la introducción de armónicos, como es el caso de las luces Led, o patrones de consumo diferentes, como en el caso de las estaciones de carga para vehículos y es necesario estudiar sus características.
- **Generadores distribuidos (DER).** Puesto que se trata de equipos de pequeño tamaño (microgeneración) situados a pequeña distancia del centro urbano o incluso dentro de él, se recurre a las diversas fuentes de energías renovables. Los más comunes son los pequeños sistemas fotovoltaicos, aunque también se pueden encontrar aerogeneradores u otros generadores distribuidos [2].
- **Energy Storage System.** Dado el carácter de energías no gestionable de las renovables, si se quiere tener algún tipo de control sobre flujo de energía será necesario recurrir a sistemas de almacenamiento de energía. Los más habitual es el uso de baterías, aunque existen otros métodos como el uso de pequeñas centrales eléctricas reversibles [2]

En la figura 1 se muestra un ejemplo de lo que podría ser una *Smart Grid*, o red de distribución activa monitorizada. Aparecen, con una topología en árbol, distintos tipos de consumidores, generadores y consumidores-generadores (prosumers).

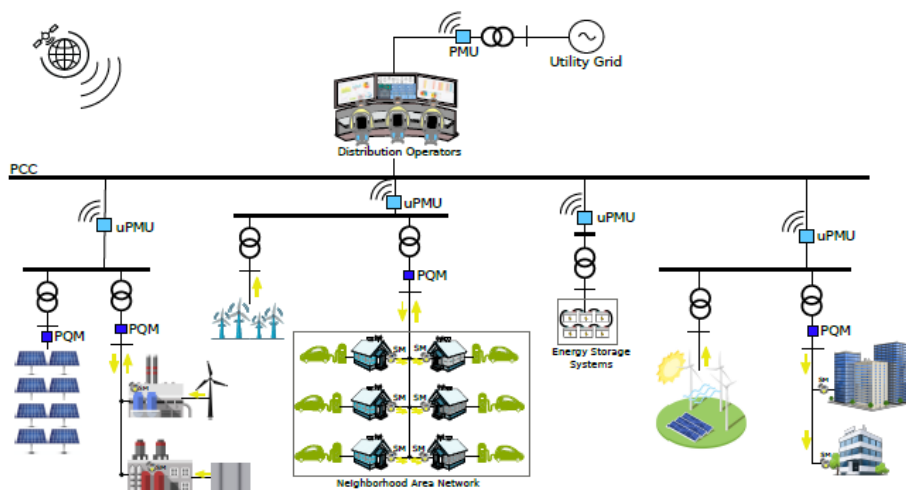


Figura 1. Red de distribución monitorizada por diversos equipos [3]

Además de los elementos de la red en sí también se encuentran los equipos de monitorización. Con un buen sistema de monitorización se puede llegar a crear un modelo completo de la red, el cual servirá para gestionar la demanda de forma óptima, tanto a corto plazo como a largo plazo. También puede ayudar a detectar fallos en la red, lo que evita accidentes.

La calidad del sistema de monitorización dependerá tanto de los equipos de los que se compone como de la distribución de estos sobre la red. Unos equipos de alta calidad devolverán una información más exacta y completa que otros de baja gama. Además, según la naturaleza de cada dispositivo será recomendable colocarlo más cerca o más lejos de los consumidores o productores.

En el ejemplo de la figura 1 se han colocado analizadores de calidad de suministro (PQM o PQ) cerca de los consumidores, micro - unidades de medición fasorial ( $\mu$ PMU) al principio de cada línea y una unidad de medición fasorial (PMU) en la conexión con la red de transmisión. Qué son estos equipos y por qué están colocados de esta forma se verá en los próximos apartados.

## 2.2. Analizadores de calidad de suministro

### 2.2.1. Definición

La norma IEEE Std C37.2 [4] define analizador de calidad de suministro (PQM, Power Quality Monitor) como un dispositivo capaz de monitorizar aquellos parámetros eléctricos utilizados en calidad de suministro. Es decir, aquellos parámetros que permitan asegurar el cumplimiento o no de las normativas de calidad de suministro. Entre esos parámetros se encuentran los valores de tensión y corriente en RMS, el valor de la frecuencia, potencias, desequilibrios, armónicos e inter armónicos. Junto con estos, también pueden aparecer parámetros de otra naturaleza. En general, los parámetros en concreto que mida y la forma en la que los trate dependerá fuertemente de los objetivos al instalar un medidor en un lugar concreto.

### 2.2.2. Aplicaciones

Por definición, un analizador de calidad resulta más complejo que un medidor eléctrico, ya que debe ser capaz de analizar por sí mismo todos los fenómenos eléctricos no deseados que pudieran afectar a la carga o a la fuente suministradora de la energía eléctrica. Los analizadores de calidad de suministro tienen tasas de muestreo muy altas, algunos permiten hasta 100.000 muestras por segundo, y una precisión que ronda el  $\pm 0.1\%$  de la medida [3]. Esto les permite medir tanto eventos a escalas de tiempo muy pequeñas – incluso de milisegundos- como valores agregados de alta calidad a lo largo de periodos de tiempo más extensos. Cada vertiente abre las puertas a diversas aplicaciones más allá de cumplir con la normativa, desde un estudio de la red de largo recorrido donde se utilizan los datos recogidos para modelar, realizar predicción, controlar la red,

etc., hasta el uso de la alta precisión temporal con la que cuentan para detectar transitorios y fallos en la red de los que se desconoce la causa. En resumen, algunas de las aplicaciones que se le pueden dar son:

- **Análisis de la calidad de suministro.** Es el principal objetivo con el que están diseñados. En Europa deben de comprobar que se cumple con las normas EN50160, y en países anglosajones, con las IEEE 1159. Estas normas definen los valores estándar que debe tener la red en todas sus medidas, y clasifican como fallos y perturbaciones cada situación anómala. Los equipos PQM funcionan aquí como un sistema de monitorización a tiempo real. A veces, como en [5], se incluye un equipo de control en el sistema. El uso de analizadores será fundamental en aquellos lugares donde la carga debe estar bien protegida por ser sensible a fallos o por tratarse de una estructura crítica, como pueden ser hospitales, centros de datos, equipos de telecomunicaciones como torres, torres de control de vehículos a control remoto (UAV), aeropuertos, estaciones de trenes, u otro tipo de industrias [6].
- **Análisis de armónicos.** Se trata de un caso particular al descrito en el punto anterior. Ciertas cargas, por ejemplo, motores eléctricos, fuentes conmutadas o luces LEDs introducen armónicos en la red de manera continua. Otro tipo de cargas pueden introducir armónicos cuando su funcionamiento no es el deseado. En ambos casos, sea un problema de diseño o de un equipo defectuoso es necesario corregirlo, para evitar dañar otros equipos y para disminuir las pérdidas en potencia. Puesto que para detectar armónicos es necesario una altísima tasa de muestreo, se debe recurrir a equipos especializados como los analizadores de suministro.
- **Localización de fallos.** A partir de las medidas recogidas por los analizadores de calidad se pueden localizar con ayuda de diversos algoritmos las zonas de la red que están funcionando de manera errática, y con ello detectar fallos de diseño (por ejemplo, siguiendo el punto anterior, demasiadas cargas que introduzcan armónicos en un punto concreto), equipos defectuosos o cualquier otro inconveniente antes de que estos provoquen daños en el resto de la red. Multitud de trabajos exponen algoritmos que necesitan de datos procedentes de PQM [7], [8]
- **Calibrar otros equipos.** Dada la alta precisión de los analizadores de calidad, se pueden usar en redes distribuidas para calibrar y corregir errores de medida de equipos de menor calidad. Es habitual el uso de un analizador de calidad que compute una carga global dividida entre varios medidores inteligentes.
- **Modelado de la carga.** Conociendo el comportamiento de una carga ante la variación de tensión y frecuencia, se puede crear un modelo matemático que represente mediante ecuaciones el comportamiento de esta. Para conocer con precisión la carga tanto en su comportamiento estático como dinámico se recurre a PQM. Algunos ejemplos donde se trabaja de esta forma son: [9], [10]
- **Predicción.** En redes de distribución que cuentan con generadores distribuidos, especialmente en el caso de las energías renovables, resulta esencial contar con un sistema de gestión de la demanda. Para una mayor planificación de esta se recurre a herramientas de *forecasting*, como redes neuronales o modelos de la red. En cualquiera de los casos, tener datos disponibles de la calidad que devuelve un PQM resulta fundamental [11].

Debido a la cada vez más extendida aparición de equipamiento electrónico en todo tipo de redes que provocan perturbaciones electromagnéticas, o que pueden ser sensibles a estas, el interés en analizar la calidad de suministro va en aumento. Para recoger buenos datos es necesario no solo colocar buenos equipos, si no también distribuirlos de forma correcta sobre la red a estudiar. Existen multitud de algoritmos y propuestas de estructura para colocar de forma óptima los analizadores [12]–[14]. La solución final dependerá de lo que se considere prioritario en cada sistema y el presupuesto disponible. Sin embargo, dos puntos son constantes en cualquier red:

- Los equipos deben cubrir la totalidad de la red, sin dejar ninguna carga sin monitorizar.
- Se deben colocar de la forma más próxima a la carga posible, ya que es el lugar donde será más evidente las deformaciones que esta introduce en la red.

### 2.2.3. Estructura

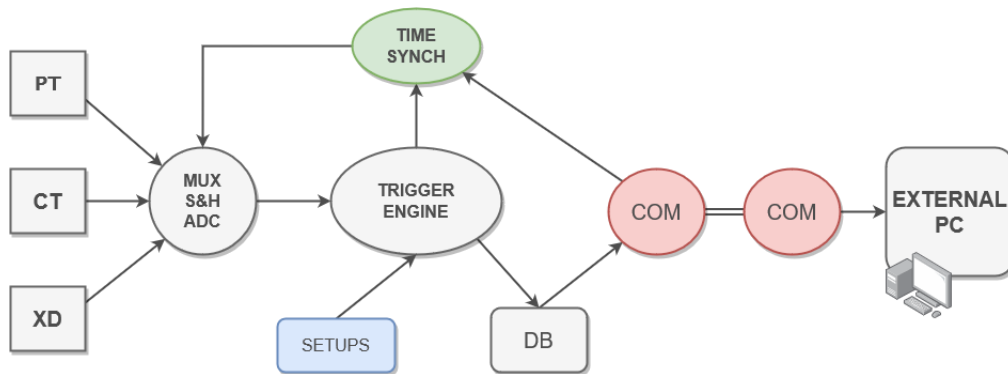


Figura 2. Estructura interna de un PQM. Basado en [4]

Los analizadores de calidad cuentan con una estructura interna común, representada en la figura 2. El primer paso es adquirir los datos, a través de transductores o transformadores, como transformadores de corriente (CT) o de potencia (PT). Algunos equipos cuentan también con otro tipo de transductores para medir parámetros de otra naturaleza, como presión, temperatura...

El siguiente paso es la conversión analógico-digital (ADC). Es destacable añadir aquí que una gran parte de los PQM utilizan una serie de técnicas para ajustar las muestras a la frecuencia, de forma que los puntos medidos se correspondan siempre al mismo punto del ciclo.

A continuación, multitud de parámetros son calculados partiendo de los datos recogidos. Entre todas las medidas que debe proporcionar un PQM, las principales son las correspondientes a la forma de onda de tensión y corriente, ya que a partir de estas se calculan la mayor parte del resto de medidas, siendo además que la calidad de todas ellas vendrá definida por la precisión de los CT y PT, y del ADC. Las medidas se calculan cada ciclo, o cada ventana de  $x$  tiempo. El tamaño de la ventana dependerá del parámetro y del equipo en concreto, aunque existen una serie de estándares que definen para cada parámetro la agregación recomendada. Son habituales agregaciones cada 3s y cada 10 min.

A continuación, se almacenan los datos internamente en una memoria local (DB). Los PQM son equipos diseñados para funcionar de manera continua, y para medir una gran cantidad de valores. Puesto que no es viable almacenarlos todos de forma continua, los PQM detectan eventos en los valores medidos, como por ejemplo variaciones de potencia. Almacenan únicamente los datos correspondientes a eventos y una vez finalizado estos lo clasifiquen según su duración y la magnitud afectada. El resto de los valores que se corresponden a un funcionamiento habitual de la red se almacena en registros que se sobrescriben cada nueva medida, de forma que el espacio que ocupan es reducido.

Por último, las medidas calculadas son transmitidas a otros dispositivos, ya sean PCs, servidores, etc. Dependiendo de la finalidad buscada, se debe priorizar un envío inmediato de los datos (si se quiere actuar ante eventos, por ejemplo), o se debe priorizar la calidad de estos (evitando que se pierdan datos, por ejemplo). Es por ello por lo que existen varios protocolos, algunos propios, como son el definido en la norma IEEE Std 1159.3 [15], o en [16] Pero también es habitual usar otro tipo de protocolos más genéricos como son TCP/IP, HTML o USB 3.0... No existe un consenso sobre este tema, y cada fabricante elige aquel que considere más conveniente.

Las medidas pueden estar además estampadas temporalmente, relacionándolas con un instante del tiempo dado, aunque no es un requisito. Existen diversos protocolos para este fin, como GPS o NTP. La estampación ayuda a correlacionar los datos de varios equipos en lugares alejados.

### 2.2.4. Medidas

Como ya se ha dicho en el apartado anterior, todas las medidas recogidas por un analizador de calidad vienen derivadas de las recogidas por los CT y PT. Es decir, están disponibles medidas de tensión, corriente,



potencias, pero también otras que necesitan un mayor procesamiento como pueden ser el cálculo del THD o la medida de armónicos. Al ser equipos que monitorean sistemas trifásicos, gran parte de las medidas se presentan 3 veces, a lo que hay que añadir que parte de las medidas son habitualmente presentadas con distintas agregaciones, lo que aumenta el número de datos disponibles. En conjunto, el volumen de variables disponible en un equipo de calidad de suministro puede ser muy alto.

No existe una normativa o un estándar que indique qué parámetros se deben elegir, aunque sí existen ciertas recomendaciones. En la tabla 1 se muestra las medidas que la norma IEEE Std 1159-2019 indica como posibles. En la norma UNE-EN 50160 sobre calidad de suministro se detallan las posibles perturbaciones que pueden aparecer en la red, indicando únicamente que las medidas tomadas deben ser las necesarias para poder detectar todas y cada una de las perturbaciones.

Tabla 1. Relación de medidas potencialmente disponibles en un analizador de calidad de suministro. Basado en [15]

ANSI transformer derating factor	Interharmonic rms current	True power factor
Arithmetic sum power factor	Interharmonic rms voltaje	Unsigned harmonic power
Arithmetic sum displacement power factor	Current-time product	Vector sum displacement factor
Arithmetic sum volt-amperes	Negative sequence current	Vector sum power factor
Current crest factor	Negative sequence voltage	Vector sum volt-amperes
Current THD	Net current	Voltage crest factor
Current THD (rms)	Positive sequence current	Voltage THD
Current total interharmonic distorsion (TID)	Positive sequence voltage	Voltage THD (rms)
Current TID (rms)	Residual current	Voltage TID
Current imbalance	RMS current	Voltage TID (rms)
Displacement power factor	RMS current individual harmonic	Voltage Telephone interference factor (TIF)
Frequency	RMS harmonic current (total)	Voltage TIF (rms)
Fund frequency arithmetic sum volt-amperes	RMS voltage	Voltage imbalance
Fund frequency vector sum volt-amperes	RMS voltage individual harmonic	Watt hours
Harmonic power (sum)	Total fund frequency reactiva power	Zero sequence current
IEEE 519 current TDD	Transformer K factor	Zero sequence voltage

## 2.3. PMUs / $\mu$ PMUs

### 2.3.1. Definición

Una unidad de medición fasorial, o por sus siglas en inglés PMU (Phasor Measurements Units), es un dispositivo desarrollado con la finalidad de medir fasores de tensión y corriente, frecuencia y tasa de variación de frecuencia (ROCOF, Rate Of Change Of Frequency) cada breves intervalos de tiempo -en el orden de los milisegundos- de forma sincronizada con una referencia absoluta de tiempo, a través del sistema de Posicionamiento Global (GPS) [17]. De esta forma, a los fasores medidos asociados a un instante de tiempo se les llama sincrofasores. Al dispositivo que lo mide, es decir, PMU, también se le suele llamar por este nombre.

La sincronización temporal posibilita la alineación exacta de los datos, de forma que permite comparar de forma efectiva las medidas obtenidas en distintos puntos de un mismo sistema eléctrico. Así, se abre la opción de realizar una gestión más eficiente, mejorando la detección de problemas y aumentando la capacidad de respuesta a los mismos [18]. Su uso se encuentra extendido tanto en etapas de transmisión como de distribución [19]

### 2.3.2. Estructura

La estructura por bloques de una PMU no difiere en gran medida de la vista para los PQM, aunque como se puede ver en la figura 3 en este caso toma mayor protagonismo la sincronización. En primer lugar, se leen las medidas analógicas a través de CT y PT, como en el caso anterior. Estas medidas pasan por un filtro anti-aliasing, y un convertidor analógico-digital. De forma paralela, un GPS busca una referencia horaria con la cual se sincroniza el ADC. Las medidas estampadas son recibidas, ordenadas y tratadas por un sincrofasor, que las envía fuera del dispositivo de inmediato. Dado el alto volumen de datos tratados, no tiene sentido aquí contar con una memoria interna.

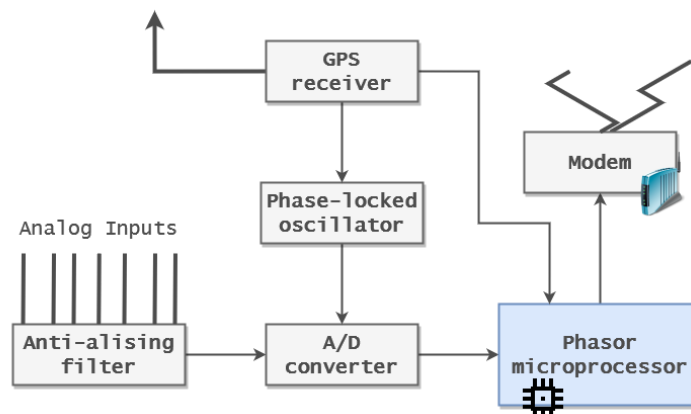


Figura 3. Estructura interna de una PMU. Basado en [20]

Debido a la alta frecuencia de envío, existen estándares desarrollados explícitamente para las comunicaciones de este tipo de dispositivos. El más conocido es el IEEE C37.118.2, segunda parte del estándar que define la forma de tomar las medidas. Fue desarrollado por primera vez en 2005 y ampliado a una nueva versión en 2011 [4].

### 2.3.3. Medidas

En concreto, las PMU miden los siguientes parámetros, definidos en el estándar IEEE C7.118.1:

- Fasores de corriente y de tensión. Cada fasor es un número complejo el cual representa la forma de onda a través de un ángulo y una magnitud.
- Tasa de variación de frecuencia, ROCOF.
- Frecuencia instantánea

Aunque es posible integrar en un solo dispositivo una PMU junto con otras medidas, normalmente de carácter genérico, de forma que se devuelvan más parámetros. Una de las características principales de las PMU es la alta frecuencia de muestreo y precisión temporal con la que se miden. Para una frecuencia de red de 50Hz, se contemplan frecuencias de 10,25 o 50 FPS (Frames per Second). Esto son 100ms, 50ms o 20ms. La correcta estampación de los datos y la rapidez con la que se realizan los cálculos son fundamentales, al tratarse de medidas de carácter instantáneo, diferentes en todo momento a las obtenidas con un medidor de calidad de suministro.

Tampoco es despreciable la precisión que alcanzan, de  $\pm 1\%$  en la amplitud de las magnitudes, y de tan solo  $\pm 1\%$  en la precisión de la fase.

#### 2.3.4. Micro PMU ( $\mu$ PMU)

En los últimos años se ha producido un gran crecimiento en el empleo de recursos energéticos distribuidos, como por ejemplo el creciente uso de energía solar fotovoltaica distribuida, microturbinas, pilas de combustible... lo que combinado con consumidores dan lugar a microrredes. Estos sistemas introducen grandes complejidades y efectos en la red eléctrica que necesitan ser estudiados con profundidad. Aunque las PMUs se han utilizado con éxito, en la actualidad la complejidad de las microrredes y su uso en conjunto con DERs, hacen fundamental el recurrir a una tecnología que detecte el comportamiento transitorio de un sistema y sus irregularidades de forma aún más precisa y con mayor resolución que las PMUs convencionales. Es por ello por lo que se han desarrollado las llamadas  $\mu$ PMUs [21], dispositivos que llegan a tasas de 100 FPS para frecuencias de red de 50Hz, y a 120FPS para frecuencias de 60Hz, es decir, que devuelven valores instantáneos de la red cada medio ciclo. También superan la precisión en la medida dada por las PMU, alcanzando una precisión angular de hasta  $\pm 0.010^\circ$ , y una precisión en la amplitud de hasta  $\pm 0.05\%$ . Se trata por lo demás de equipos similares.

#### 2.3.5. Aplicaciones

Las altas tasas de muestreo y su velocidad de comunicación les permite a las PMU y  $\mu$ PMU cumplir con una serie de aplicaciones:

- **Detección de eventos.** La mayor parte de las aplicaciones se centran en este aspecto. Las  $\mu$ PMU resultan el equipo ideal para que las empresas distribuidoras detecten situaciones anómalas en la red de distribución, antes de que estos eventos transitorios traspasen a la red de reparto. Existen además una gran cantidad de algoritmos y trabajos que ayudan a clasificar los eventos detectados. Algunos ejemplos son [22]–[24]
- **Localización de fallos.** Existen algoritmos que ayudan a encontrar el origen de determinados fallos a partir de los datos de  $\mu$ PMU. Un ejemplo es [25]
- **Modelado del sistema (*State estimation*).** Consiste en describir el estado estacionario de cada nodo de la red, de forma equivalente a como se recurre a los PQM para describir el funcionamiento de las cargas. La red de distribución se define a partir de 3 fasores trifásicos al no ser balanceada – al contrario de la red de transporte-, y la sincronización entre datos de distintos nodos ayuda a definir correctamente el sistema. Algunos ejemplos donde se realiza este trabajo son [26], [27]
- **Verificación de la topología de la red.** Aún con la existencia de un modelo de la red, puede haber diferencias físicas con respecto a este, ya sean indeseadas – errores en el modelo, modelo desfasado – o inevitables – como con la presencia de equipos que se conectan y desconectan de esta. A partir de los datos de  $\mu$ PMU, se pueden crear algoritmos que ayuden a detectar estas incongruencias. Algunos ejemplos son [28], [29]
- **Monitorización de calidad de suministro.** Se puede recurrir a estos equipos para comprobar que los valores en la red siguen siendo los deseados, de forma similar al uso que se les da a los PQM.
- **Protección y control.** Dada su grandísima velocidad de transmisión resulta el equipo ideal para llevar labores de control y protección. Algunos ejemplos son [30], [31]

Como se puede ver, algunas aplicaciones son únicas de este tipo de equipos. Otras, es preferible realizarlas con uno de los dos tipos de equipo, y otras se pueden realizar con  $\mu$ PMUs o con PQM indistintamente. El lugar en

el que se colocan las  $\mu$ PMUs también depende de sus objetivos, aunque de forma general se puede decir que deben ser colocados en los nodos, especialmente en aquellos que estén cerca de los generadores, y sobre todo en la conexión con la red de transporte.

## 2.4. Comparativa entre ambos equipos

Con todo lo visto, se muestra a continuación una tabla resumen comparativa con las aplicaciones en las que se utiliza los equipos que se van a emplear.

Tabla 2. Tabla resumen comparativa de las aplicaciones para PQM y  $\mu$ PMU

	<b>PQM</b>	<b><math>\mu</math>PMU</b>
<b>Monitorización y análisis</b>	Sí, diseñado para este uso	Sí
<b>Análisis de armónicos</b>	Sí	No
<b>Detección de eventos en tiempo real</b>	No	Sí
<b>Protección y control</b>	Menos recomendado	Sí, diseñado para este uso
<b>Localización de fallos</b>	Sí	Sí
<b>Modelado</b>	Modelado de la carga	Modelado de la red
<b>Verificación de la topología</b>	No	Sí
<b>Calibrar otros equipos</b>	Sí	Menos recomendado
<b>Predicción y gestión de la demanda</b>	Sí	Menos recomendado

Tabla 3. Tabla resumen de las características de una  $\mu$ PMU y una PQ

	<b>PQM</b>	<b><math>\mu</math>PMU</b>
<b>Medidas</b>	Tensiones, Voltajes, frecuencia, potencias, THD, armónicos, etc.	Fasores de tensión y corriente, frecuencia, ROCOF
<b>Observa el sistema</b>	Estado estacionario y eventos transitorios	Eventos transitorios y dinámicos
<b>Tipo de red</b>	Media y baja tensión	Media y baja tensión
<b>Localización</b>	Cerca de las cargas	En los nodos de la red. Cerca de las DER
<b>Accuracy (precisión)</b>	Entre $\pm 0.2\%$ y $\pm 0.1\%$	$\pm 0.05\%$ para la amplitud $\pm 0.01\%$ para el ángulo

<b>Sincronización</b>	Recomendable. NTP, GPS...	Sí, GPS (gran calidad)
<b>Coste</b>	Varía entre 200 y 3500 €	Varía entre 4000 y 15,000 €

En las tablas 2 y 3 se puede ver que tanto la  $\mu$ PMU como los analizadores de calidad son equipos con unas grandes prestaciones y que resultan complementarios entre sí, ya que dadas sus particularidades (p.e., mayor precisión temporal en uno, mayor número de parámetros en otro) tienen diferentes aplicaciones. Puesto que su uso en ambos casos es para redes de media y baja tensión -como son las redes de distribución, *Smart grid* o microrredes- resulta más que interesante el diseño de una infraestructura que permita comunicar y trabajar con ambos dispositivos de forma similar. El estudio de esta infraestructura se verá en la sección siguiente.

## 2.5. Otros equipos de medida

Aunque este trabajo se centra en los equipos PQM y  $\mu$ PMU, existen de forma habitual otra serie de equipos que monitorean las microrredes que merece la pena mencionar.

- **Medidores inteligentes.** Un medidor inteligente o contador inteligente es un tipo de contador avanzado de electricidad que calcula el consumo o producción de una forma más detallada que los contadores convencionales. Son habituales los medidores domésticos en las redes de baja tensión urbanas. Permiten a las compañías que dan servicio local conocer el consumo de cada usuario, y también controlar este. Cuentan con una precisión en la medida entre el  $\pm 1\%$  y el  $\pm 2\%$ , y una tasa de envío ajustable entre 1 y 60 minutos. En la figura 4, izquierda, se muestra un modelo habitual en Europa.
- **Medidores de subestación.** Son medidores inalámbricos diseñados para reportar datos desde las subestaciones de distribución. Miden potencia activa y reactiva, corrientes y tensiones en forma compleja. Cuentan con una gran precisión en la medida, de alrededor del  $\pm 0.5\%$ , y una tasa de envío de 1 minuto.
- **Registadores de eventos** (DFR, por sus siglas en inglés, Digital Fault Recorder). Son equipos especialmente diseñados para registrar los eventos que ocurran en la red (figura 4, derecha). Cuentan con una alta tasa de muestreo y una alta precisión, que ronda el  $\pm 0.1\%$  de la medida. No registran sin embargo ninguna información del estado estacionario de la red.
- **Sensores inalámbricos de línea.** Son sensores que se colocan colgando de las líneas eléctricas aéreas (figura 4, centro). Al estar conectados únicamente a una de las líneas, no necesitan aislamiento, lo que reduce mucho su coste. Su principal objetivo es detectar eventos en la línea y transmitirlos a un centro de datos. Cuentan con una alta precisión de alrededor del  $\pm 0.5\%$ , y una tasa de muestreo también alta. Más allá de detectar caídas en la corriente, la gama de medidas disponibles es limitada.

Cada uno de estos equipos tiene un uso habitual en al menos una aplicación concreta. Sin embargo, dadas sus prestaciones, se puede concluir que tanto la  $\mu$ PMU como el PQM son los equipos de mayor calidad y complejidad de todos los estudiados. En los apartados siguientes se pasará a describir el modelo concreto de PQM y  $\mu$ PMU con el que se ha trabajado.



Figura 4. De izquierda a derecha, medidor inteligente en uso en Europa, sensores inalámbricos de línea y un registrador de eventos

## 2.6. PQube3

PQube3 es un analizador de calidad de suministro de tres fases vendido por la empresa canadiense Powerside [32]. Mide, analiza y transmite las perturbaciones detectadas en la red, así como los indicadores ambientales, todo ello a tiempo real. Permite medir voltajes de hasta 690V, y detecta automáticamente la frecuencia de trabajo, así como la conexión del cableado. En la figura 5 se muestra una imagen del equipo. Sus dimensiones son aproximadamente 20 x 9 x 10 mm, y su diseño está pensado para fijarse en un carril DIN. En la parte superior cuenta con 4 canales de tensión + shield (3 fases más neutro y tierra) y hasta 8 canales de corriente. En la parte inferior cuenta con 4 entradas analógicas. A la derecha aparece un módulo de alimentación que mantendrá esta por unos instantes en caso de que haya una caída de la red. Para caídas de mayor duración, existe un módulo adicional UPS.



Figura 5. PQube3 de Powerside

Cuenta con una pantalla táctil, una memoria MicroSD y un puerto USB, además de con un servidor web integrado a través del cual se pueden visualizar algunos de los datos en tiempo real, así como descargar históricos o informes de eventos. Una captura de dicho servidor se muestra en la figura 6.



Figura 6. Captura de la interfaz facilitada por PQube3

Como se muestra en la parte izquierda de la figura 6, el analizador recoge datos de distintas naturalezas. En primer lugar, en el apartado medidores aparecen medidas ambientales (directas) de la red, como son voltajes y corrientes de las tres fases, pero también otras medidas calculadas, como son datos de potencia, energía consumida, THD, TDD, valores en crudo de armónicos, etc. En total, el analizador cuenta con más de 3000 medidas, las cuales no todas se muestran en esta interfaz, pero se pueden consultar vía peticiones Modbus.

En el apartado de eventos se almacena un histórico con los eventos ocurridos, y un informe de cada uno de ellos (un ejemplo se muestra en la figura 7). De igual forma, en el apartado Tendencias/Estadísticas se muestran informes diarios del estado de la red en cada momento. Estos informes resultan muy útiles, pero resulta tediosos abrir cada uno de ellos por separado si se quiere tener una mayor perspectiva. Un resumen mensual se añade con el resto de las gráficas.

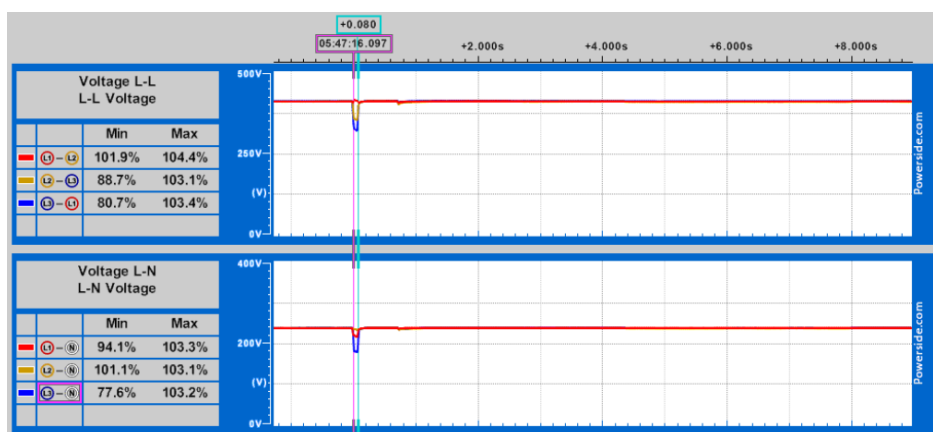


Figura 7. Caída de voltaje registrada por un PQube3

En la Tabla 4 se muestra un resumen de las características más destacables de este dispositivo.

Tabla 4. Características del analizador de calidad PQube3 de Powerside [33]

Características PQube3 Powerside	
Frecuencia de muestreo	512 muestras por ciclo (25600m/s a 50Hz)
Secuencia balanceada	Métodos IEC, GB y ANSI
Flicker	IEC 61000-4-15
Total Harmonic Distortion (THD)	%, IEC 61000-4-7
Corriente de pico	RMS cada 1 segundo, 1 min o a elección del usuario
Potencia pico	Calculada por intervalos: 1 segundo, 1 min o a elección del usuario
Factor de potencia	Métodos TPF o DPF

## 2.7. $\mu$ PMU de Powerside

Como sincrofasor se ha utilizado el modelo MicroPMU de Powerside. Al estar desarrollados por la misma empresa, resulta físicamente muy similar al analizador de calidad PQube3, siendo la diferencia más destacable la incorporación en este caso de un módulo MS1 para la sincronización GPS. El resto del cableado y su instalación resulta idéntico al modelo PQube3, como se puede ver en la figura 8.

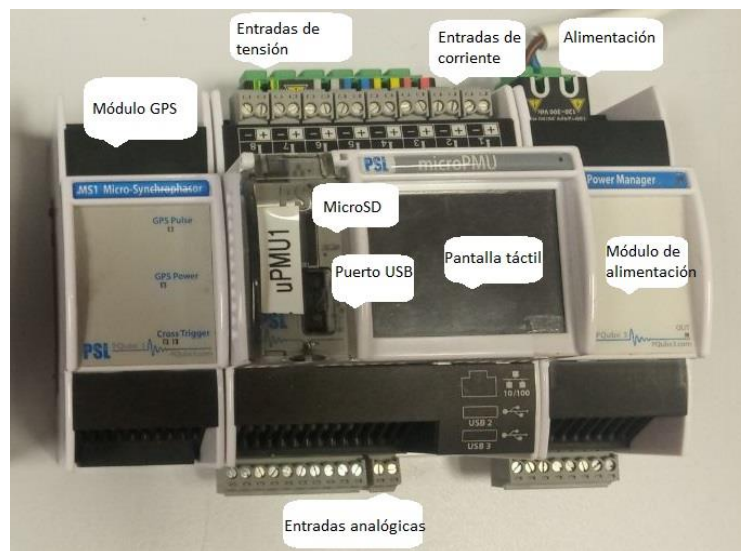


Figura 8. Micro-sincrofasor de Powerside



Al igual que el dispositivo anterior, cuenta con un servidor web desde el cual se puede configurar, y donde se muestran las medidas (figura 9). En este caso, puesto que el número de parámetros medido es mucho menor, sí que se representan todos ellos, aunque la tasa de refresco de los valores es mucho menor a la tasa de muestreo, por lo que resulta un buen indicativo, pero no se podría recurrir a esta configuración para realizar monitorización sobre la red.



Figura 9. Interfaz Web de la  $\mu$ PMU de PowerSide.

Junto con los fasores, frecuencia y ROCOF se representan valores de potencia calculados a partir de estos. Sin embargo, estos valores de potencia no son transmitidos, por lo que solo son orientativos. El resto de las medidas se transmiten según el estándar IEEE C37.118.2-2011. Según el modo de operación escogido, entre “Low latency” y “High accuracy”, las medidas serán almacenadas de forma local en una tarjeta MicroSD. En el modo “Low latency” se permitirá además la lectura y el envío según el estándar c37 de 7 fasores adicionales correspondientes a 7 canales extra de corriente, y 4 canales analógicos más. En modo “Low latency”, además, se enviará un fasor para el neutro de la instalación.

El dispositivo es compatible en todos los aspectos con el estándar IEEE C37.118.1-2011 para comunicaciones, y también con el estándar IEEE C37.118.2-2011 que define la manera en la que se deben recoger las medidas. Es por tanto que incluye dos modos, “*m-class*” y “*p-class*” que definen dos filtros distintos, siendo el *p filter* indicado para protección (mayor velocidad, menor precisión) y el *m filter* para mayor precisión.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de las características más destacables de este dispositivo.

Tabla 5. Características de la  $\mu$ PMU de Powerside [34]

<b>Características MicroPMU Powerside</b>	
<b>Frecuencia de muestreo</b>	512 muestras por ciclo (25600m/s a 50Hz)
<b>TVE (Total Vector Error)</b>	+/-0.01%
<b>Precisión en la amplitud</b>	+/-0.050%
<b>Precisión en el ángulo</b>	+/-0.010°
<b>Resolución en la amplitud</b>	0.0002%
<b>Resolución en el ángulo</b>	0.001°

# 3 ESTUDIO DE LAS COMUNICACIONES Y ALMACENAMIENTO

## 3.1. Características de las comunicaciones en una Microred

Las  $\mu$ PMU y los analizadores de calidad son dispositivos con filosofías diferentes. Ambos necesitan de un sistema que permita recoger, almacenar y recuperar los datos de una forma sencilla y cómoda, a la vez que presente unas garantías de robustez y fiabilidad adecuadas. Sin embargo, sus características difieren y por tanto se suelen abordar soluciones diferentes. En la tabla 6 se muestra un resumen de estas características referidas a las comunicaciones para ambos dispositivos.

Tabla 6. Comparativa de las comunicaciones

	$\mu$ PMU	PQM
<b>Tasa de muestreo</b>	25600m/s a 50Hz	25600m/s a 50Hz
<b>Tasa de envío</b>	Desde 10ms hasta 100ms	Desde 1s hasta 10min
<b>Velocidad de transmisión</b>	Crítica Utiliza el estándar IEEE C37.118.2	No crítica Diferentes fabricantes utilizan distintos estándares. p.e. Modbus
<b>Variables medidas</b>	Fasores de tensión y corriente Frecuencia ROCOF	Depende del fabricante. Frecuencia, tensiones, corrientes, potencias, THD, TDD, armónicos...
<b>Volumen de datos</b>	Muy alto	Alto
<b>Sincronización</b>	Muy Importante GPS	Menos importante NTP (usualmente)
<b>¿Permite su uso como equipos de protección y control?</b>	Sí [35]	Es una función habitual

En el caso de las  $\mu$ PMU, resulta fundamental la sincronización de las muestras, un almacenamiento eficaz y una alta velocidad de transmisión. Puesto que las  $\mu$ PMUs son capaces de enviar hasta 100FPS, se pueden llegar a volúmenes de datos muy altos en un periodo corto de tiempo. Esto hace necesario contar con una infraestructura que permita no solo almacenar un gran volumen de datos, si no también acceder a ellos de forma eficaz. En cuanto a la sincronización, resulta fundamental si se cuenta con varios dispositivos dentro de la misma red. Los datos provenientes de una  $\mu$ PMU están estampados en origen, siguiendo el pulso que manda la señal GPS y que asegura que todas las medidas se correspondan al mismo instante. La infraestructura debe por tanto ser capaz de respetar estas estampaciones y almacenar los datos temporalmente. Finalmente, una alta

velocidad de transmisión será necesaria sobre todo en aquellos casos donde se pretenda actuar frente a eventos. La velocidad de transmisión en estos casos dependerá de la red de comunicaciones disponible: el material físico de transmisión -idealmente se usa fibra óptica, aunque su uso no es siempre posible-, la intermediación de dispositivos como routers o switch, etc.

Existen infraestructuras desarrolladas especialmente con el fin de almacenar datos provenientes de  $\mu$ PMUs, como las descritas en los artículos [36]. No obstante, también es posible utilizar cualquier otro software que cumpla con las características dadas, como puede ser una base de datos para series temporales. Sí que es recomendable el uso de un concentrador de datos fasoriales (PDC, por sus siglas en inglés Phasor Data Concentrator), para gestionar y procesar los datos de varias  $\mu$ PMUs.

En el caso de los analizadores de calidad o PQM, su funcionamiento es menos exigente. Aunque la tasa de muestreo de la señal es parecida, son equipos que realizan una serie de cálculos a partir de la forma de onda y de la corriente, y devuelven el resultado cada cierto tiempo, que puede variar entre cada segundo o diez minutos. Depende del fabricante se devolverán unas medidas u otras, y en algunos casos pueden ser muy numerosas, pero el volumen de datos total seguirá siendo inferior al producido por una  $\mu$ PMU. De nuevo, una buena sincronización es importante, pero al tratarse de medidas agregadas no resulta tan crítica como en el caso de una  $\mu$ PMU. Puesto que algunos analizadores de calidad tienen incorporados funciones que permiten detectar huecos y eventos, en los casos en los que se quiere utilizar esta detección para actuar se debe hacer por un camino alternativo, distinto a aquel utilizado para estudiar el estado estacionario de la red, ya que este resultaría demasiado lento. Los analizadores de calidad se tratan desde el punto de vista de las comunicaciones como dos dispositivos en uno. Por una parte, un analizador de calidad del estado estacionario y dinámico de la red, y por el otro, de un registrador de eventos.

A pesar del enfoque normalmente dividido, resulta útil almacenar de forma conjunta datos de distintos dispositivos, de forma que estos se puedan comparar, especialmente cuando se pretende hacer un estudio conjunto de una microrred, como ocurre en [37]. Como se puede ver, el dispositivo que marcará los requisitos es la  $\mu$ PMU, teniendo en ese caso los analizadores de calidad unas prestaciones más que necesarias.

Una serie ya no de requisitos si no de recomendaciones u objetivos que debería tener un sistema conjunto como el que se busca son:

- **Escalabilidad.** Puesto que la principal ventaja de almacenar datos de  $\mu$ PMU y de PQM de forma conjunta es su comparación, el sistema debería permitir añadir una diversidad de equipos de ambos tipos sin importar el fabricante o el protocolo utilizado, así como abrir a la posibilidad de permitir otro tipo de mediciones, como pueden ser los medidores inteligentes
- **Fácil acceso al usuario.** El sistema debe permitir realizar consultas de forma cómoda y sin que esto conlleve un gran tiempo de respuesta. Los datos deben ser accesibles tanto para análisis como para monitorización en tiempo real.
- **Posibilidad de integración con equipos de control.** Puesto que se colocan equipos de altísima calidad en una microrred, capaces de detectar eventos, es deseable tener la opción de utilizarlos como equipos de protección.

### 3.2. Software y hardware de comunicaciones (Diseño del sistema)

En la figura 10 se muestra la infraestructura del sistema que se pretende utilizar en este trabajo. Consta de una base de datos, un panel de monitorización, una herramienta de análisis, un concentrador de datos fasoriales y los equipos de medición.

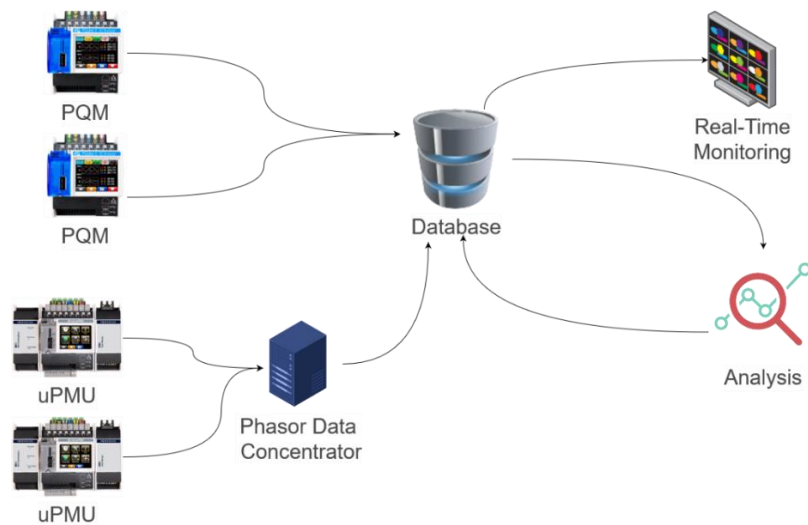


Figura 10. Infraestructura propuesta

El concentrador de datos fasoriales es un elemento que recibe, organiza y distribuye las medidas procedentes de varias PMUs y  $\mu$ PMUs [38]. Para cada medida, la  $\mu$ PMU asigna una etiqueta temporal según el instante en el que se haya realizado y el PDC, de manera continua, organiza las medidas a partir de dichas etiquetas. La información puede ser intercambiada con otros PDC en diferentes áreas de control o con otras [18]. También puede ser mostrada por pantalla desde el mismo PDC, lo cual es habitual en infraestructuras donde sólo se cuenta con este tipo de dispositivos (Figura 11).

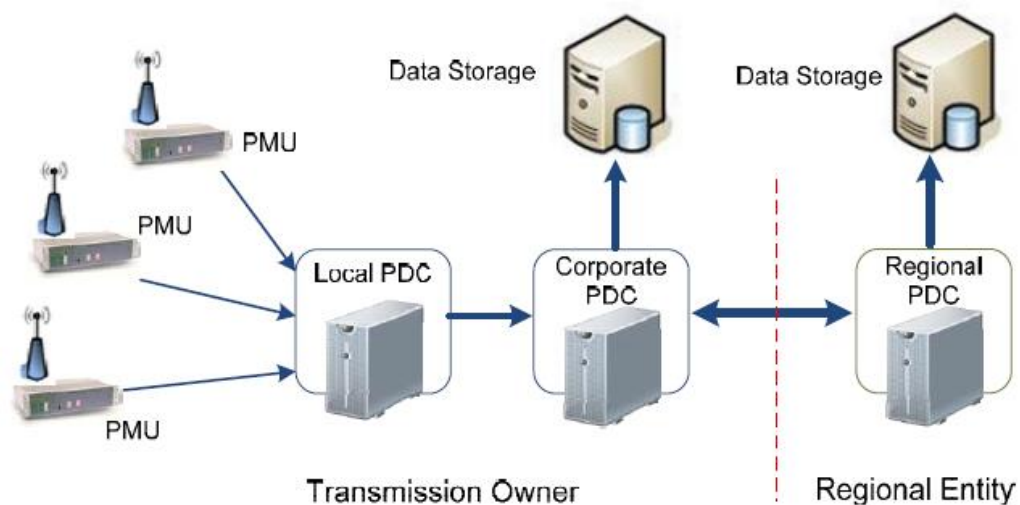


Figura 11. Posible infraestructura para varias PMUs [4]

El siguiente elemento de izquierda a derecha es la base de datos. Es un elemento central y fundamental, ya que de él depende que se cumplan los objetivos descritos en el apartado anterior. Existen hoy en día multitud de tipos de gestores de base de datos, de donde habrá que elegir el óptimo para este caso.

Por un lado, se encuentran las bases de datos relacionales (SQL), centradas en almacenar datos estructurados que mantienen relación unos con otros. Los datos se guardan en tablas y se puede acceder a ellos con distintas consignas. Son muy útiles para evitar duplicidad de datos, pero resultan demasiado lentas en aplicaciones con grandes cantidades de datos.

Frente a las clásicas SQL aparecen las bases de datos no relacionales (NoSQL), específicamente orientadas a trabajar con un gran volumen de datos, lo cual hace que su manejo, velocidad de escritura y lectura sea muy superior a las clásicas SQL. Dentro de las NoSQL, aparece de nuevo una gran variedad de tipos de gestores, cada uno con una filosofía y objetivos distintos. Su popularidad, en conjunto, va en aumento.

De todos los tipos de bases de datos NoSQL que se encuentran (Graph-oriented, Document-oriented, Timeseries, Key-value-oriented...), son los gestores de bases para series temporales [39] aquellos que están más directamente relacionados con tipo de datos con el que se trabaja. En estos gestores, los datos se almacenan como un par formado por el valor enviado y una marca de tiempo (Timestamp). De esta forma, resulta sencillo analizar las series temporales como una secuencia de puntos almacenada a lo largo del tiempo. Una base de datos TimeSeries (TSDB, por sus siglas en inglés) almacenará series temporales de una manera más eficiente, y responderá a las lecturas de una forma más rápida que cualquier otro tipo de base. De la base de datos también dependerá ser accesible desde distintas herramientas y con distintos protocolos.

Otro elemento de la infraestructura será aquel con el que se realiza el análisis. El análisis puede ser tanto a tiempo real como un estudio posterior de los datos recogidos. En caso de que sea a tiempo real, resulta recomendable que se pueda volver a almacenar los datos calculados junto con los datos anteriores, de forma que haya una retroalimentación. Para un estudio a largo plazo, no es necesaria dicha función, aunque sí que sigue siendo necesario el poder acceder a los datos de la forma lo más automática posible, para evitar trabajos tediosos.

Por último, en todo sistema de medición es necesario la posibilidad de monitorizar a tiempo real los resultados que se están obteniendo, pudiendo comprobar así el correcto funcionamiento del sistema de medición, desde su medición hasta su almacenamiento y recogida, y también comprobar el funcionamiento de la planta. También es recomendable que la monitorización incluya funciones de alarma.

### 3.3. Solución propuesta

Partiendo de lo visto en el apartado anterior, se han seleccionado una serie de programas y aplicaciones que se detallarán a continuación, explicando el motivo de su elección. Su lugar en la infraestructura se puede ver en la figura 12.

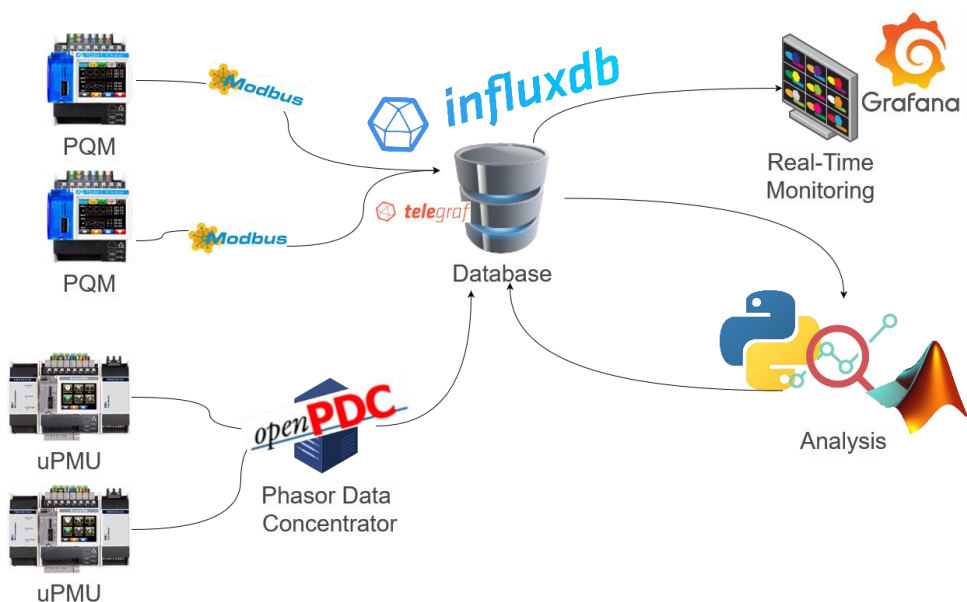


Figura 12. Infraestructura diseñada con los programas que realizan cada función

#### 3.3.1. Estándares de comunicaciones

Los equipos elegidos cuentan con unos estándares predeterminados. No es esta una elección sino un requisito que presentan los equipos, ya que será necesario buscar herramientas compatibles con estos.

##### 3.3.1.1. Modbus

El analizador de calidad de energía PQube 3 cuenta únicamente con una comunicación Modbus para transmitir todos aquellos datos que mide.

Modbus TCP/IP es un protocolo basado en la arquitectura cliente/servidor muy habitual en la industria. Sus principales ventajas vienen por su facilidad de implementación, y por ser público y gratuito. Sin embargo, presenta algunos problemas con respecto a la latencia y a la sincronización.

### 3.3.1.2. IEEE C37.118.2

Las  $\mu$ PMU utilizadas siguen el protocolo IEEE C37.118.2 en su versión de 2011. La normativa define 4 tipos de mensajes: datos, configuración, cabecera y comando.

- Los mensajes de comando se utilizan para control y configuración
- La configuración es un mensaje donde se describe la  $\mu$ PMU, las medidas que se van a enviar, los tipos, datos de calibración, nombre del equipo que lo envía, y una serie de metadatos
- La cabecera es un mensaje identificativo definido por el usuario
- Los mensajes de datos son las medidas hechas por la  $\mu$ PMU

En un funcionamiento habitual del protocolo, el concentrador de datos fasoriales manda un comando preguntando por la configuración. La  $\mu$ PMU devuelve un mensaje de configuración. El PDC vuelve a mandar un mensaje de inicio y a partir de ese momento la  $\mu$ PMU manda los datos de manera continua a dicho PDC. Las tramas de datos se envían en paquetes con una referencia temporal, y todos los datos medidos asociados a ella.

Resulta un protocolo muy eficaz al minimizar la información añadidas en los mensajes de datos. Por otro lado, hace necesario el uso de un concentrador de datos capaz de enviar mensajes de control y de ordenar los paquetes recibidos según su estampación temporal, ya que es habitual que el retardo en los mensajes no sea siempre el mismo – especialmente cuando se compara entre varios equipos.

### 3.3.2. Concentrador de datos fasoriales

Como concentrador de datos fasoriales se ha elegido la aplicación OpenPDC, desarrollada por la *Grid Protection Alliance (GPA)* [40]. Se trata de un programa open source y de gran calidad, utilizado con éxito en gran cantidad de proyectos tanto industriales como académicos [41]. De hecho, aparece como software recomendado y especificado en el manual de instalación del dispositivo  $\mu$ PMU escogido.

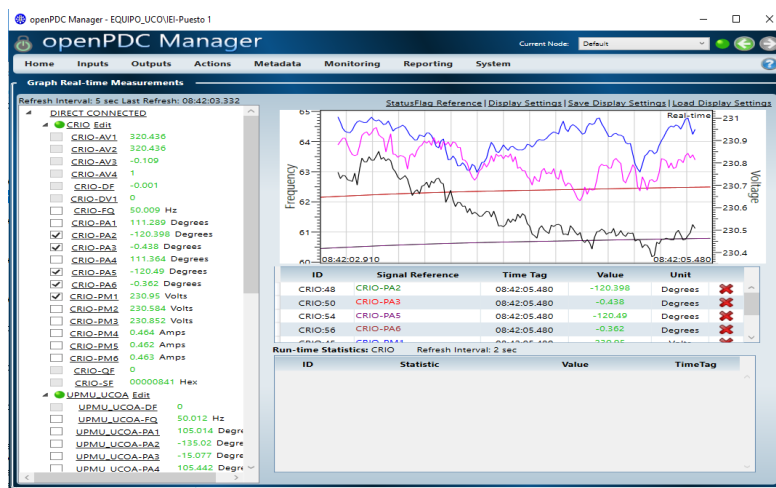


Figura 13. Pestaña dedicada a la monitorización del OpenPDC Manager

Es un software muy completo. Permite realizar prácticamente todas las funciones necesarias en sistemas con  $\mu$ PMU. Permite la implementación de gran variedad de estándares, entre ellos el estándar IEEE C37.118.2, que es al que se recurre en este proyecto. Incluye un panel de monitorización (figura 13), la posibilidad de configurar alarmas y la posibilidad de reenviar los datos a otros PDCs. Otra versión de este software desarrollada por la GPA, el OpenHistorian, incluye opciones para almacenamiento. Se barajó su uso, pero al tratarse de un software especialmente desarrollado para  $\mu$ PMUs resulta poco adecuado para almacenar datos de otro tipo, como pueden ser los de un equipo de calidad de suministro. Además, el acceso a los datos está restringido a los estándares disponibles, STTP y GSF, lo cual limita enormemente el acceso por terceras aplicaciones a estos. Se decidió entonces utilizar OpenPDC para los datos de  $\mu$ PMU por su capacidad de

procedimiento y distribución, pero almacenar en una base genérica las medidas.

### 3.3.3. Gestor de base de datos

Como gestor de base de datos se ha elegido InfluxDB, una TSDB Open Source desarrollada por la empresa InfluxData, que cuenta con gran popularidad [42], gracias a su enfoque directo a trabajar con timeseries, la facilidad de su implementación, así como su interfaz gráfica la cual permite al usuario visualizar los datos almacenados. Tiene la ventaja además de contar con un ecosistema muy completo, dentro del cual se encuentran una serie de componentes y plugin de gran interés.

En concreto se utilizará InfluxDB 2.0. como gestor de bases de datos. A partir de la versión 2.0. deja de estar basado en SQL y utiliza un lenguaje propio, Flux, para las peticiones de lectura (también llamadas *Query*). La programación es sencilla y de fácil aprendizaje, y se incluyen numerosas y útiles opciones para filtrar los datos deseados. InfluxDB es capaz de ingerir millones de datos por segundo, y permite estamparlos -si no lo están ya- con una precisión de nanosegundos. Las peticiones de lectura cuentan también con una gran velocidad de respuesta. Los datos se almacenan en distintos *buckets* (equivalente al concepto de base de datos en SQL), siempre con una estampación temporal y las etiquetas que se consideren necesarias. En cualquier momento se pueden incorporar nuevos datos sin tener que definirlos previamente.

Puesto que se trata de una herramienta tan completa se detalla a continuación por separado algunas de las características/ herramientas más importantes que la componen.

#### 3.3.3.1. Telegraf

El uso de un gestor de datos resultaría infructuoso si los datos no pudieran ser almacenados. Para ello, InfluxDB debe reconocer y ser capaz de recoger datos de distintas fuentes. El gestor cuenta con una serie de librerías que permiten conectar directamente con el cliente (figura 14), pero la gran fuente para inyectar datos con facilidad a InfluxDB es Telegraf, culpable de la gran popularidad de esta base de datos en proyectos IoT.

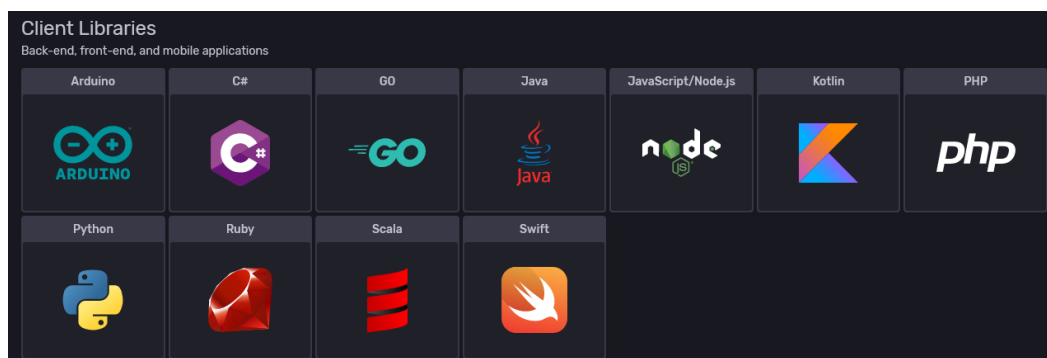


Figura 14. Librerías de clientes disponibles en InfluxDB

Telegraf es un agente que se basa en el uso de plugin especializados para cada tipo de entrada y/o salida. Cuenta con más de un centenar de ellos (en la figura 15 se muestran algunos), y en concreto, cuenta con un plugin para trabajar con el protocolo Modbus [43]. Para realizar la conexión con el analizador, solo es necesario configurar los parámetros de ID, la dirección IP donde se encuentra el analizador, la lista de registros que se pretende consultar y la frecuencia con la que se consultará.

Por lo general, no se consultarán los más de 3000 registros con los que cuenta el analizador, si no que se consultarán únicamente aquellos que sean de interés. Para ello, es posible preparar varios archivos de configuración del agente con el fin de utilizar en cada momento el más conveniente. Incluso, es posible trabajar con varios de forma independiente y simultánea, leyendo de diversos dispositivos y/o enviando a diversos gestores de bases de datos cada vez.



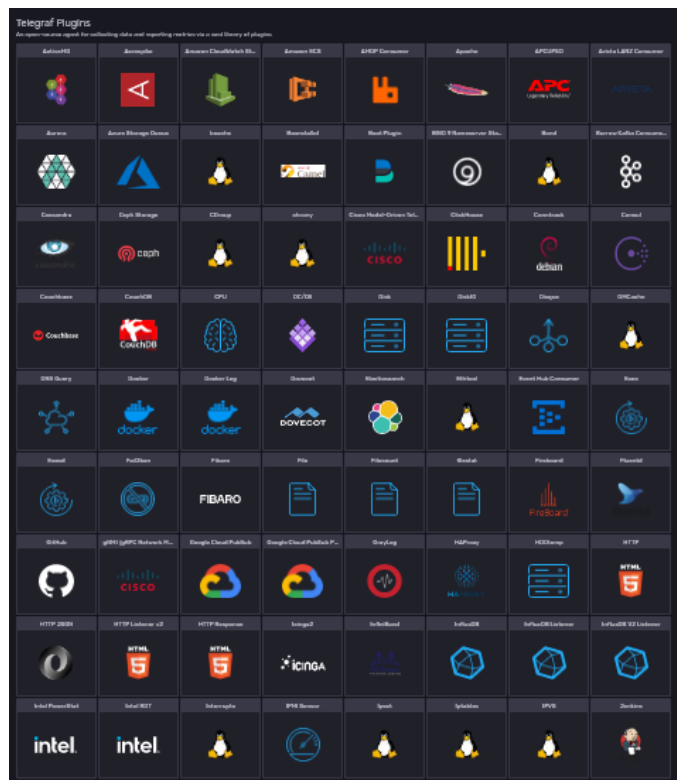


Figura 15. Algunos de los plugin disponibles para telegraf

### 3.3.3.2. InfluxDB DataExplorer

InfluxDB Data explorer es la parte de la interfaz de usuario dedicada a las consultas. Se tiene aquí una base de datos que al contrario de la mayoría no es opaca, si no que permite de forma sencilla representar con respecto a un eje temporal los datos almacenados. Las consultas se pueden hacer con el lenguaje propio flux o eligiendo a mano el bucket, la etiqueta y el rango de tiempo. En la figura 16 se muestra una consulta hecha por código donde se devuelve la frecuencia medida por dos equipos de calidad de suministro en un rango de 5 min.

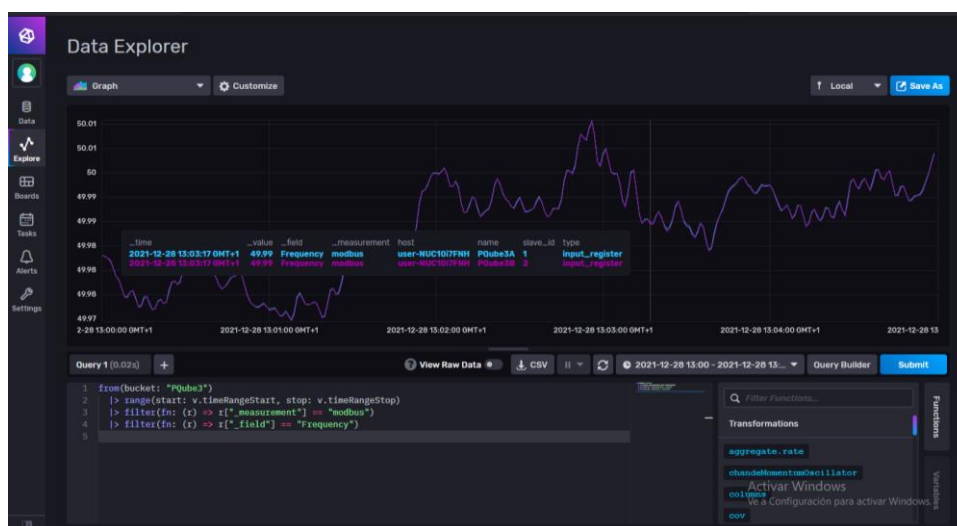


Figura 16. Ejemplo de Query en InfluxDB Data Explorer

### 3.3.3.3. Otras características del gestor

InfluxDB es en todos los aspectos una base de datos dedicada a series temporales, por lo que incluye multitud de funciones que pueden resultar útiles. Por nombrar algunas de las que se han trabajado, se encuentra un sistema de alertas para señalar cuando ciertas magnitudes se salgan de un rango, o cuando la comunicación falle, por ejemplo. Un gestor de tareas que se ejecutan periódicamente, donde por ejemplo se pueden agregar

automáticamente datos antiguos cada cierto tiempo. O un panel para monitorización que muestre diversas gráficas. En la figura 17 se muestra un panel con datos de dos  $\mu$ PMUs en un rango de 3s.

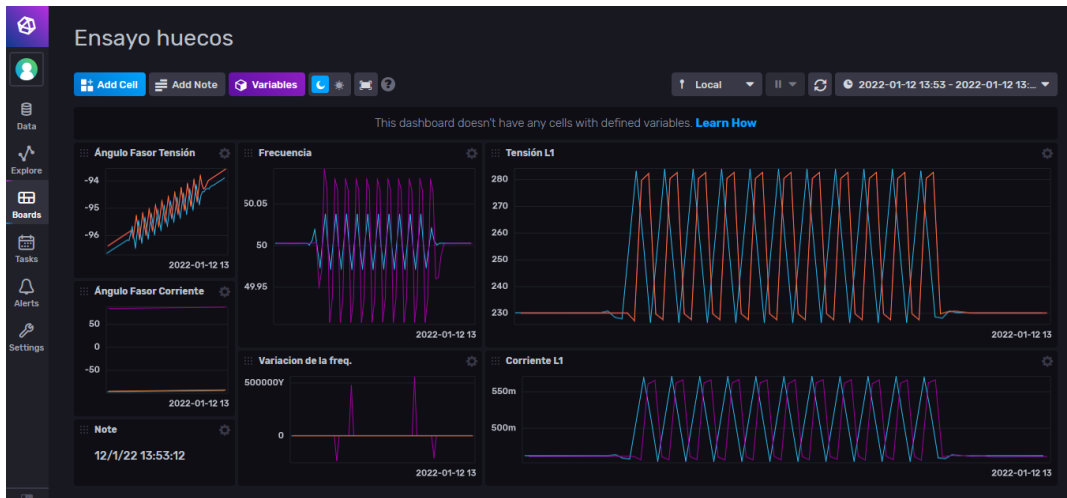


Figura 17. Herramienta para Dashboard integrada en InfluxDB

### 3.3.3.4. Estructura de los datos almacenados

Para mantener una estructura en los datos de distinta naturaleza se han almacenado en dos buckets distintos- como dos depósitos de datos independientes. Por un lado, los datos de PQube3, que pueden ser filtrados con las etiquetas de Slave\_ID – para seleccionar el equipo de procedencia- o según la etiqueta field, que se refiere a las medidas. Por otro, los datos de  $\mu$ PMU, que sólo pueden ser filtrados según la etiqueta tag, equivalente a la etiqueta field, y que indica la medida deseada. En la tabla 7 se muestra lo explicado.

Tabla 7. Estructura de los datos almacenados

Gestor de bases de datos	Base de datos (Bucket)	Etiqueta
InfluxDB Time Series Data Platform	PQube3	Slave_ID
		Field
	$\mu$ PMU	Tag

Un ejemplo de consulta se muestra en la figura 18, donde se elige la PQube3 con ID dos, la medida frecuencia y se escoge que se agreguen los datos ajustándose al rango de tiempo elegido.

```

1 from(bucket: "PQube3")
2   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
3   |> filter(fn: (r) => r["slave_id"] == "2")
4   |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "Frequency")
5   |> aggregateWindow(every: v.windowPeriod, fn: mean, createEmpty: false)
6   |> yield(name: "mean")

```

Figura 18. Ejemplo de consulta

### 3.3.4. Herramientas de análisis

Una vez almacenada la información en la base de datos, es necesario recurrir a herramientas externas que procesen los datos. Existen multitud de opciones, y para demostrar la versatilidad de la infraestructura se han recurrido a dos herramientas muy similares, pero con objetivos distintos. En primer lugar, Matlab se ha utilizado como herramienta off-line, mientras que se ha recurrido a Python para trabajar a tiempo real.

### 3.3.4.1. Matlab

Matlab es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. En este trabajo se ha recurrido a Matlab como herramienta de cómputo numérico off-line, para realizar tanto las gráficas como los cálculos mostrados en la sección 4. Los datos almacenados se extraen de la base de datos mediante peticiones y se almacenan en ficheros .CSV, los cuales son legibles por Matlab. El proceso resulta sencillo para cálculos puntuales, pero no permite trabajar de forma continua, a tiempo real.

### 3.3.4.2. Python API

Dentro del ecosistema de InfluxDB existe para Python una API desarrollada por InfluxData [44] que permite realizar consultas de manera periódica a la base de datos, así como volver a almacenar nueva información en esta. De esta forma, se puede trabajar a tiempo real con los datos capturados por los equipos. La API se importa como cualquier otra librería, e incluye funciones de lectura y escritura. Las consultas a la base se hacen con el lenguaje flux propio de InfluxDB, y los datos quedan almacenados en un dataframe. En la figura 19 se puede ver como se realiza una consulta a la base. Incorporando un bucle a la consulta, se consigue que esta se haga de manera periódica.

```
113 #QUERY API
114 with InfluxDBClient(url=url, token=token, org=org) as _client:
115
116     with _client.write_api(write_options=WriteOptions(batch_size=500,
117                                                         flush_interval=10_000,
118                                                         jitter_interval=2_000,
119                                                         retry_interval=5_000,
120                                                         max_retries=5,
121                                                         max_retry_delay=30_000,
122                                                         exponential_base=2)) as _write_client:
123
124     #Bucle principal (void loop)
125     def timer():
126         while True:
127
128
129             datos1 = query_api.query_data_frame('from(bucket: "PQube3") \
130 |> range(start: -30s, stop: now()) \
131 |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "modbus") \
132 |> filter(fn: (r) => r["_field"] =~ /L1_Voltage_Harmonic_H/) \
133 |> aggregateWindow(every: 1m, fn: mean, createEmpty: false) \
134 |> yield(name: "mean")')
```

Figura 19. Ejemplo de código donde se realiza la consulta a la base de datos

### 3.3.5. Herramienta de monitorización

Grafana es un software libre que permite la visualización y el formato de datos métricos. Permite crear cuadros de mando y gráficos a partir de múltiples fuentes, incluidas bases de datos de series temporales como Graphite, InfluxDB y OpenTSDB. Tiene una interfaz parecida a la de InfluxDB Dashborad, pero cuenta con una mayor capacidad de configuración. Su uso se ha escogido sobre el de InfluxDB pensando en tener por separado el almacenamiento de los datos y su monitorización, de forma que se puedan manejar los accesos a uno y otro de forma independiente. En la figura 20 se muestra un ejemplo de panel que presenta los datos de un analizar de suministro PQube3. Con el uso de variables (esquina superior Izq.) se puede escoger un equipo distinto, o incluso ambos a la vez, y mostrarlos por pantalla.

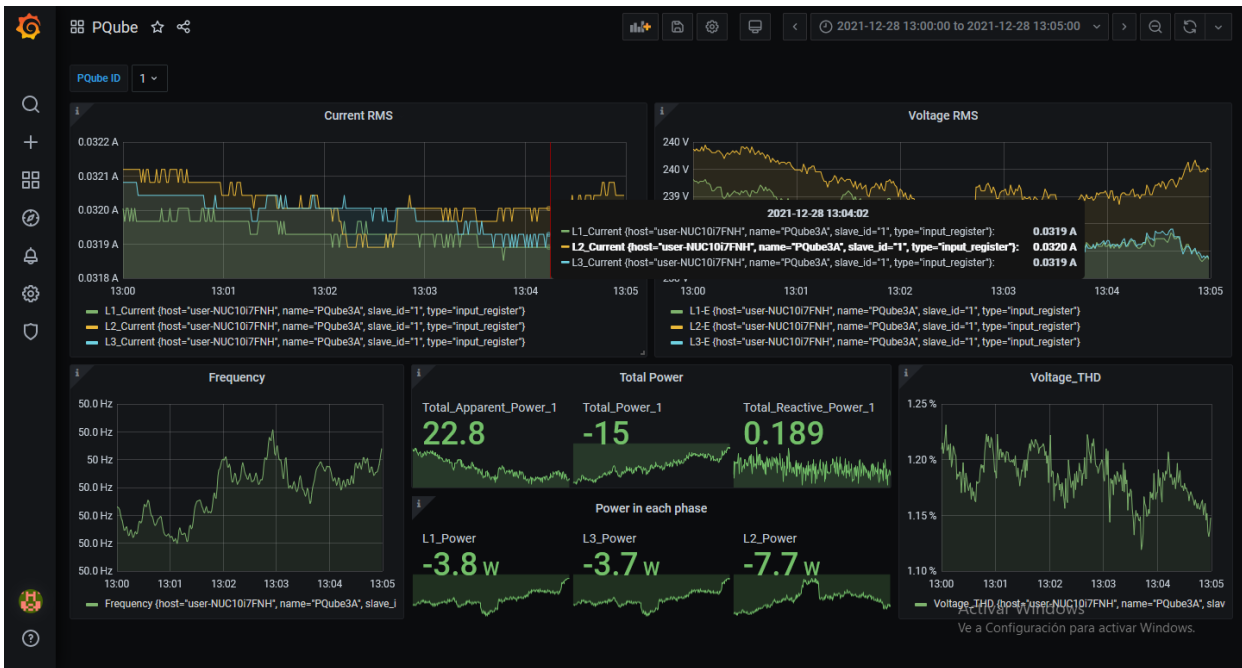


Figura 20. Ejemplo de cuadro de mando en Grafana

# 4 MATERIALES Y CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

---

## 4.1. Recursos utilizados

Además de los equipos de medición, PQube3 y  $\mu$ PMU, se han utilizado una serie de material auxiliar para realizar los ensayos, y simular que se trabaja con una red de distribución.

### 4.1.1. IntelNuc

Como PC se ha utilizado un IntelNuc, un ordenador de pequeñas dimensiones expresamente diseñado para trabajar en remoto. En este equipo se encuentra el concentrador de datos fasoriales y se almacenan los datos recogidos.



Figura 21. IntelNuc

### 4.1.2. Sondas de corriente

Para las medidas de corriente, tanto las realizada por PQube3 como por la  $\mu$ PMU se ha recurrido las sondas de corriente de la marca Powerside (Figura 22), en dos relaciones de transformación diferentes, con 50A/333mV y de 5A/333mV, de forma que se pueda estudiar la precisión de uno u otro modelo al medir. En cada ensayo se indicará cuál de las dos variantes se está utilizando.



Figura 22. Sonda de corriente de Powerside

Ambos modelos tienen las mismas dimensiones y permiten trabajar hasta 600A, con una precisión de  $\pm 0.2\%$ .

### 4.1.3. Cargas resistivas

Como carga se han utilizado tres cargas resistivas de marca Medelec, con resistencia variable entre los 20  $\Omega$  y los 500  $\Omega$ , y una potencia máxima de 1000W por carga.



Figura 23. Carga resistiva variable

### 4.1.4. Bombillas

Para el estudio de los armónicos de tensión se han utilizado como cargas tres bombillas Leds de diferentes modelos. En la figura 24 se muestran los tres modelos utilizados, que se referenciarán en los ensayos con los nombres, de izquierda a derecha, de bombilla 2, bombilla 1 y bombilla 3. Estas serán también las bombillas que se pretende detectar con los algoritmos predictivos en el apartado 6.

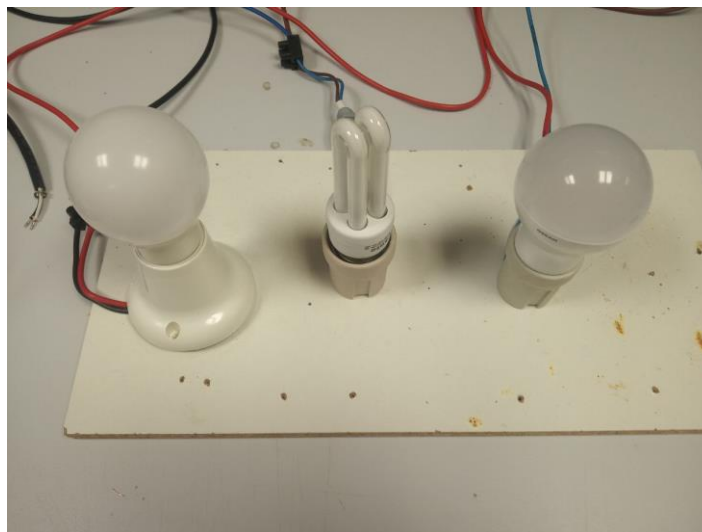


Figura 24. Distintos modelos de bombillas Led

### 4.1.5. Fuente monofásica Agilet & LabVIEW

Se ha utilizado también una fuente monofásica programable de la marca Agilet, en concreto el modelo 6811B.



Figura 25. Fuente monofásica Agilet 6811B

Esta fuente programable permite generar señales sinusoidales con diferentes valores de tensión y frecuencia, así como otras formas de ondas habituales, como son formas de onda cuadradas, rampas... Permite indicar la forma de onda que se quiere introducir a partir de una serie de armónicos. Incluye además la posibilidad de

introducir eventos en la señal, como puede ser un hueco en la tensión, una sobretensión, una variación breve de frecuencia, etc. Sin embargo, debido a que se trata de una fuente monofásica, los ensayos solo se pueden reproducir en una de las fases, lo que limita la capacidad de los equipos PQM y  $\mu$ PMU para detectar estos eventos. Se ha prescindido por tanto de esta característica, y se han realizado el resto de los ensayos con solo una de las líneas, suponiendo un sistema equilibrado.

#### 4.1.5.1. LabVIEW

Es posible programar la fuente Agilet a través de los botones que presenta en su parte delantera. Sin embargo, para los ensayos donde se introducen armónicos resulta más cómodo recurrir a una interfaz web. Para ello se ha recurrido a una plataforma en LabVIEW disponible en el laboratorio que fue diseñada en el trabajo fin de grado [45]

A través de esta interfaz se pueden introducir uno a uno los armónicos de tensión y la amplitud en cada uno de ellos deseados. En otras partes del programa permite introducir secuencias de tensión y frecuencia para simular caídas de tensión o variaciones de frecuencia, y muestra las medidas que genera la fuente en cada momento.

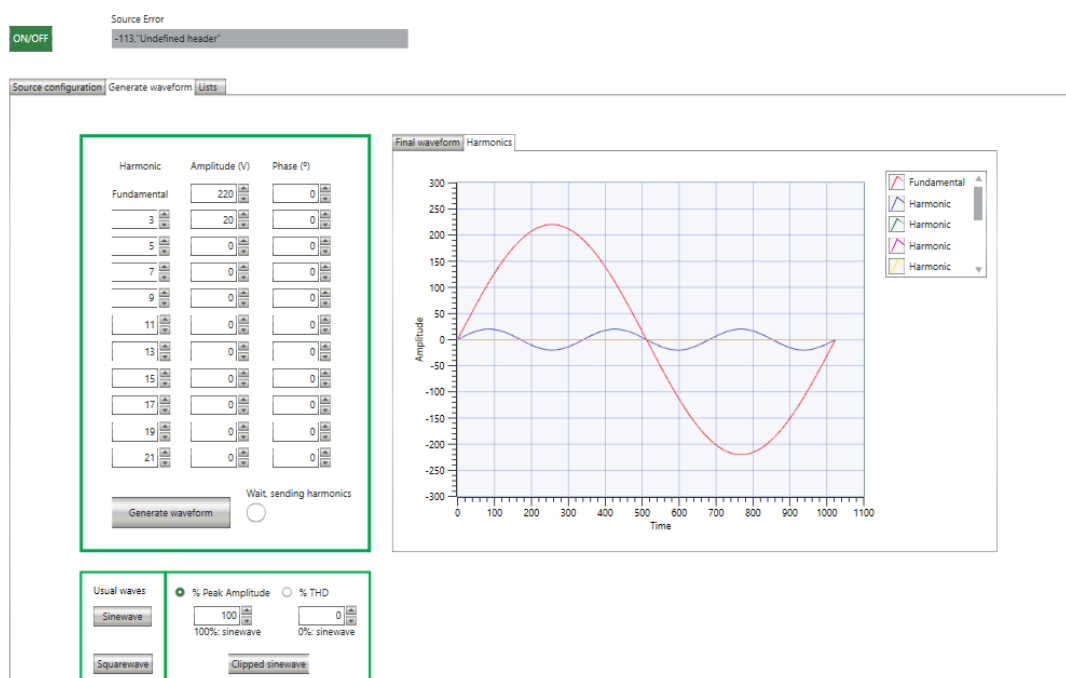


Figura 26. Plataforma en LabVIEW para programar la fuente monofásica Agilet 6811B

## 4.2. Metodología

Se cuenta en total con tres equipos, dos analizadores de calidad y una  $\mu$ PMU. Los ensayos, sin embargo, se ha realizado por parejas debido a las limitaciones de espacio, cables y sondas disponibles en el laboratorio. Gracias a las similitudes en el diseño de PQM y  $\mu$ PMU, resulta sencillo hacer el cambio. En la figura 27 se muestra como quedan colocados sobre un carril DIN.



Figura 27. PQube3 (izq.) y  $\mu$ PMU (dcha.) sobre un carril DIN

En cada ensayo, los datos son recogidos por la infraestructura software diseñada. Los datos son leídos de la base de datos y descargados en un fichero .CSV, el cual se abre con Matlab para realizar las gráficas. Los ensayos se realizan con datos recogidos durante 5 minutos. Los equipos PQube3 recogen datos cada segundo, mientras que para el equipo  $\mu$ PMU se ha elegido una tasa de envío de 100ms, por ser la más cercana al segundo, y dado que calidad de las mediciones para  $\mu$ PMU no varía sustancialmente según la tasa aplicada [46]. Esta metodología se considera más que suficiente para estudiar el carácter estático de la red, y realizar la comparación entre equipos.

A lo largo de los ensayos de este trabajo se han realizado dos montajes distintos, según de donde proviene la señal a medir. En el primero, los equipos se conectan a la red a través de los puestos preparados en las mesas del laboratorio. En el segundo, la señal proviene de una fuente monofásica controlable.

#### 4.2.1. Montaje de la red

Para los ensayos con formas de onda reales, se han conectado los dispositivos a la mesa de pruebas del laboratorio, como se puede ver en la esquina inferior izquierda de la figura 28. Se ha realizado un montaje en estrella con dos tipos de carga distintas. En primer lugar, con tres cargas resistivas Medelec, y, en segundo lugar, con tres bombillas LED de diversas características (figura 29)

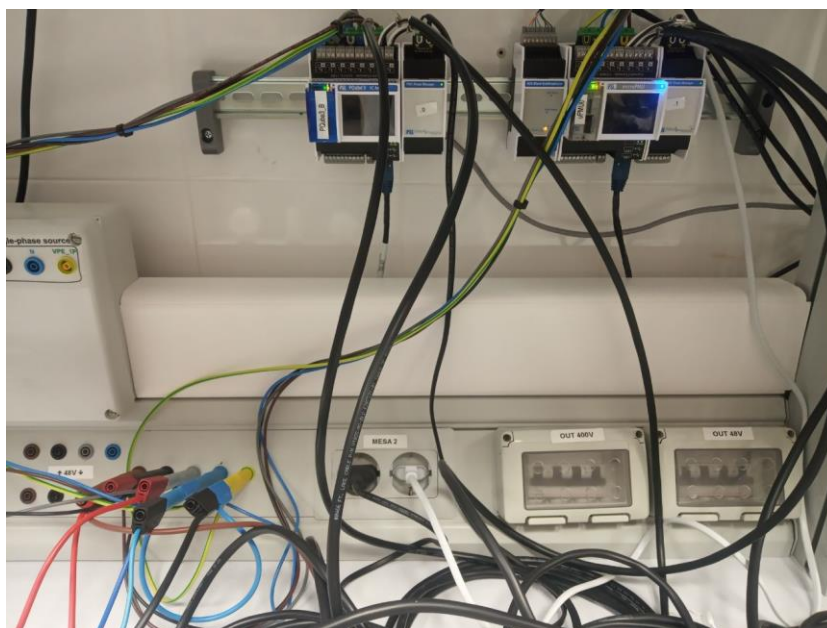


Figura 28. Montaje con una PQube3 y una  $\mu$ PMU midiendo la señal de la red



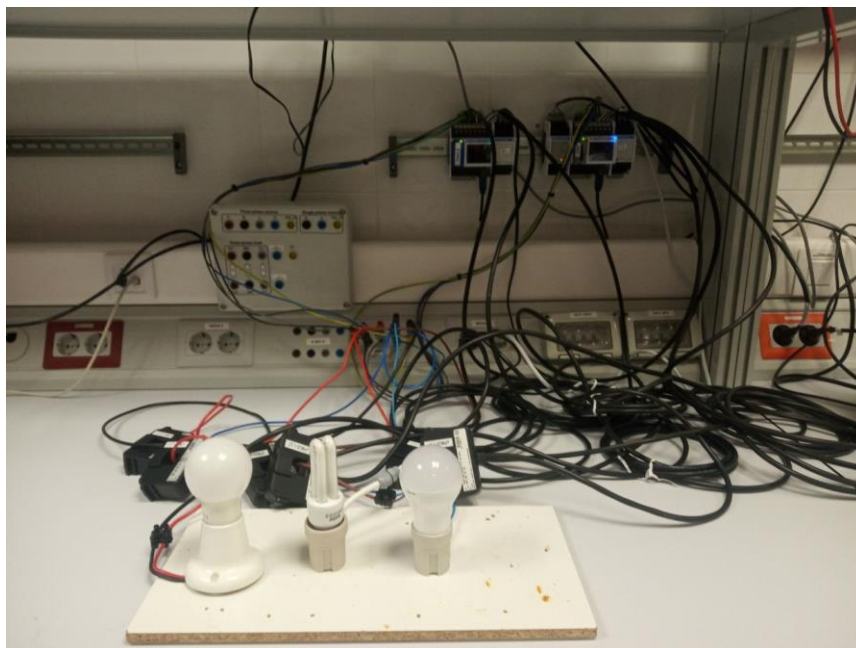


Figura 29. Montaje con señal proveniente de la red con tres Leds como carga

Un punto a tener en cuenta es que en todos los ensayos realizados se han cortocircuitado los puntos neutro y cable a tierra. Esto es así ya que es una práctica recomendable al trabajar con  $\mu$ PMU, y se ha mantenido para los ensayos con los analizadores de calidad. Las  $\mu$ PMU miden la tensión de forma flotante, con respecto al neutro, por lo que, si existe una tensión en el neutro, estas no medirán correctamente el fasor. En la figura 30 se muestra el esquema correspondiente a este ensayo, en concreto al montaje con tres cargas resistivas. Para el montaje con las bombillas leds se sustituye cada una de las cargas resistivas por un led.

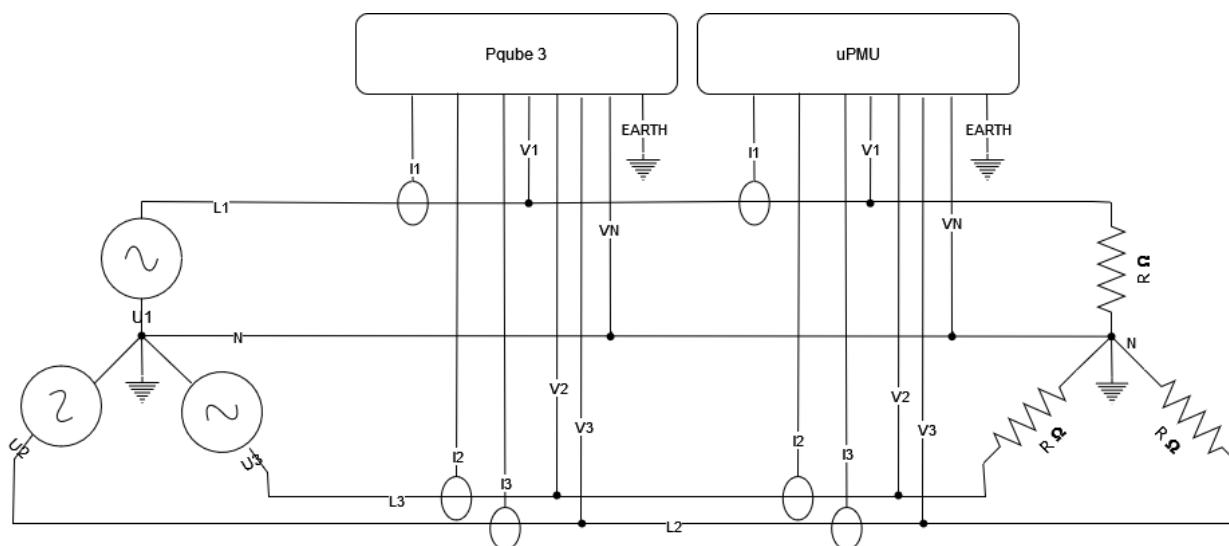


Figura 30. Montaje con una PQube3 y una  $\mu$ PMU midiendo la señal de la red

#### 4.2.2. Montaje con la fuente programable

Los montajes donde la señal proviene de la fuente monofásica resultan muy similares, puesto que las mesas del laboratorio están preparadas para este caso. La señal se coge de un cuadro colocado sobre la mesa como el de la figura 31. Se deben escoger las entradas correspondientes a la fuente monofásica (single-phase source).

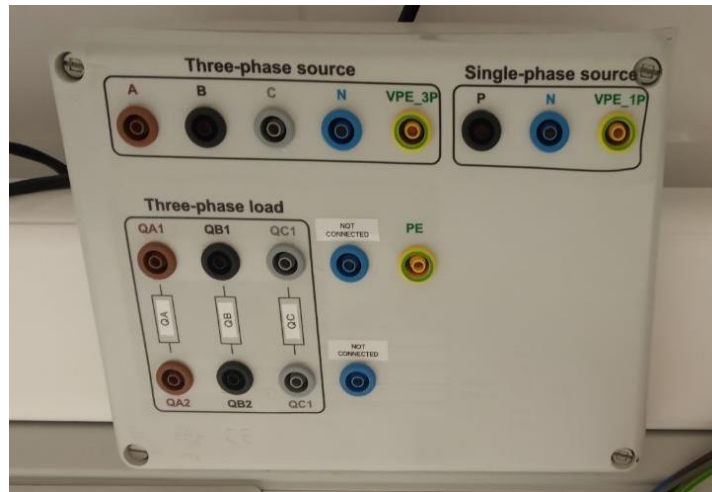


Figura 31. Cuadro disponible en el laboratorio con la conexión a la fuente monofásica

Las cargas se montan de idéntica manera a los esquemas vistos en el apartado anterior, con la diferencia de que ahora se trata de un circuito monofásico. De nuevo, los puntos neutro y tierra deben ir cortocircuitados. En la figura 32 se muestra el montaje correspondiente.

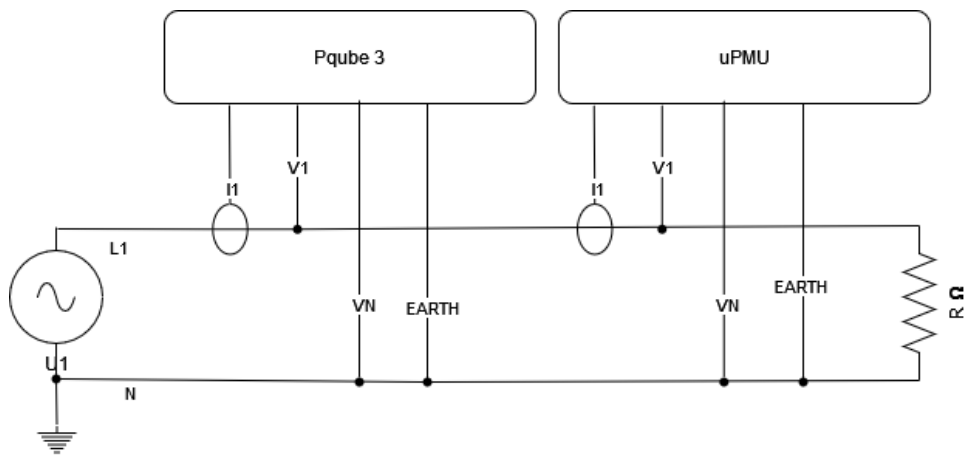


Figura 32. Montaje de una  $\mu$ PMU y una PQube3 con la fuente monofásica

# 5 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS

## 5.1. Ensayos con dos PQube3

En este ensayo se han realizado varias pruebas con dos PQube3 de idénticas características, únicamente variando el set de sondas de corriente usadas en un caso y en otro. El equipo PQ3 A trabaja con sondas con una relación de transformación 5A:333mV, mientras que el equipo PQ3 B trabaja con sondas con una relación de transformación 50A:333mV.

El objetivo en este caso es estudiar el comportamiento de los analizadores de calidad. Visualizar algunas de las medidas más significativas, y comprobar que la correlación entre ambos equipos es la indicada. Para ello, se han realizado 4 ensayos distintos (tabla 8).

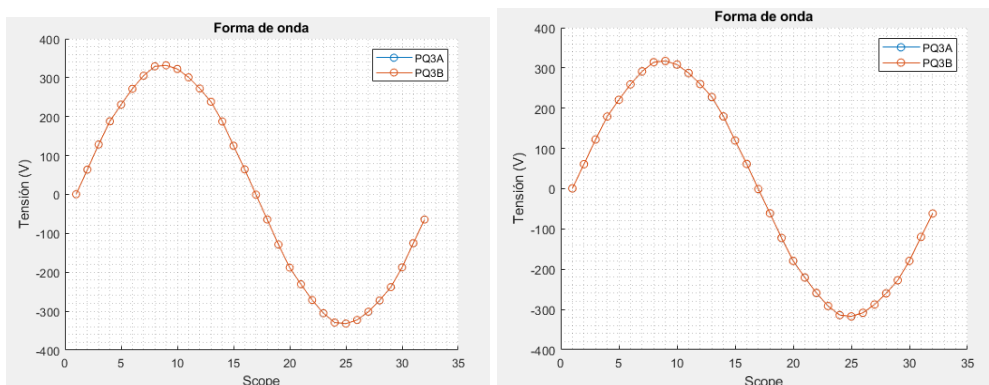
Tabla 8. Ensayos con dos PQube3

	Procedencia de la señal	Carga
<b>Ensayo 1</b>	Red	200 Ω
<b>Ensayo 2</b>	Red	100 Ω
<b>Ensayo 3</b>	Red	500 Ω
<b>Ensayo 4*</b>	Fuente monofásica	500 Ω

\*De los ensayos con la fuente monofásica sólo se tienen datos en una de las líneas

### 5.1.1 Forma de onda

Los equipos PQM almacenan 32 puntos que definen una forma de onda. En la figura 33 se puede ver la forma sinusoidal que se produce al contar con una carga resistiva. Las medidas de ambas PQM son prácticamente idénticas (se solapan por completo en la imagen), lo que indica que en efecto se corresponde al mismo ciclo, lo que a su vez confirma su sincronización, además de asegurar su precisión.



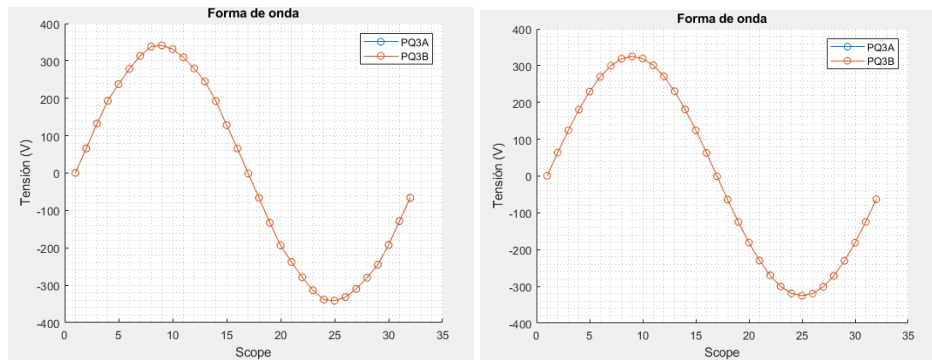


Figura 33. De izq. a dcha. y de arriba hacia abajo, red local con carga  $200 \Omega$ , red local con carga  $100 \Omega$ , red local con carga  $500 \Omega$  y señal proveniente de la fuente monofásica.

La visualización de la forma de onda resulta útil en casos donde la señal de onda esté fuertemente deformada, como indicativo visual, aunque para su análisis resulta pobre al tratarse únicamente de 32 puntos.

### 5.1.2 Medida de la frecuencia

La frecuencia resulta un parámetro práctico para comparar el funcionamiento y la precisión de los dos PQM. En primer lugar, se comprueba la precisión de estas midiendo una señal sinusoidal de referencia (“ideal”) dada por una fuente monofásica (Figura 34)

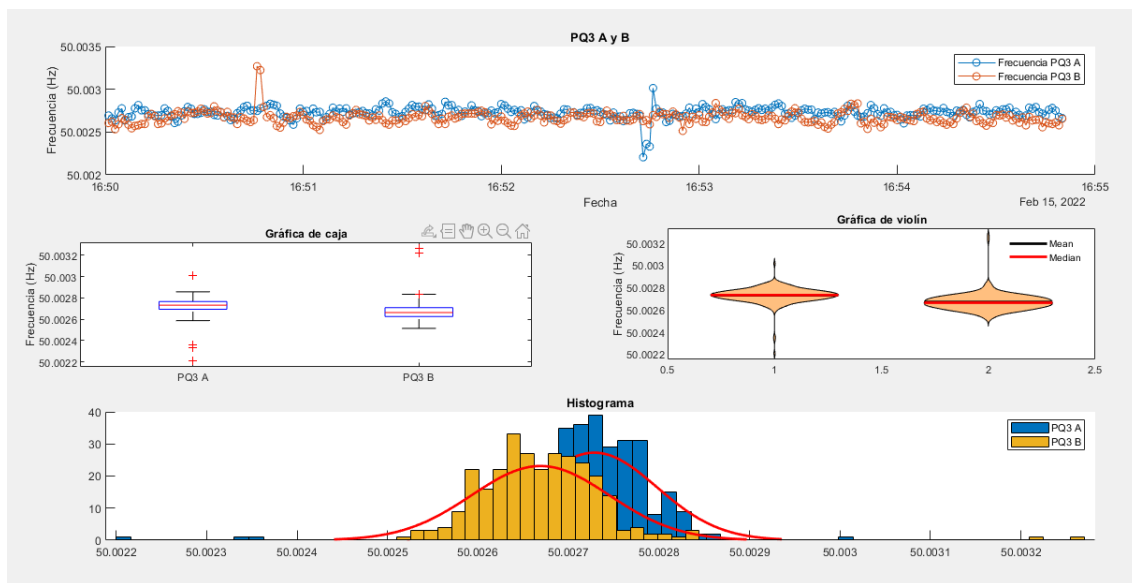


Figura 34. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la fuente monofásica

Se puede ver en la gráfica anterior que apenas existe diferencia en la tendencia central. Mientras que el equipo PQube3 A registra una media de  $50,002728 \text{ Hz}$  y una mediana en  $50,002731 \text{ Hz}$ , el equipo PQube3 B registra una media ligeramente menor, de  $50,002679 \text{ Hz}$  y una mediana situada en los  $50,00266 \text{ Hz}$ . Esto indica que ambos equipos miden con precisión hasta la tercera cifra decimal. La desviación desde los  $50 \text{ Hz}$  teóricos puede deberse tanto a un error sistemático de la medida como de la fuente. Las medidas de dispersión indican a su vez una gran precisión de la medida, contando los valores registrados por la PQ3 A con una desviación típica de  $6,9e-5$ , y la PQ3 B con  $7,603e-5$ .

Es notable la presencia de valores atípicos medidos por únicamente uno de los equipos, lo que puede indicar errores esporádicos de medida.

En las figuras 35, 36 y 37 se muestra la misma comparación de frecuencias para los ensayos con señal proveniente de red. Ahora, la señal de red no es tan estable como en el caso anterior, pero ambos equipos registran valores estadísticos muy similares (tabla 9). En los tres casos la variación de la señal real es tal que se puede descartar el error cometido por los analizadores. Por ejemplo, en estos ensayos los valores atípicos registrados se registran a la vez en ambos equipos, por lo que se puede deducir que corresponden a una variación de frecuencia real y no a un error de medida.

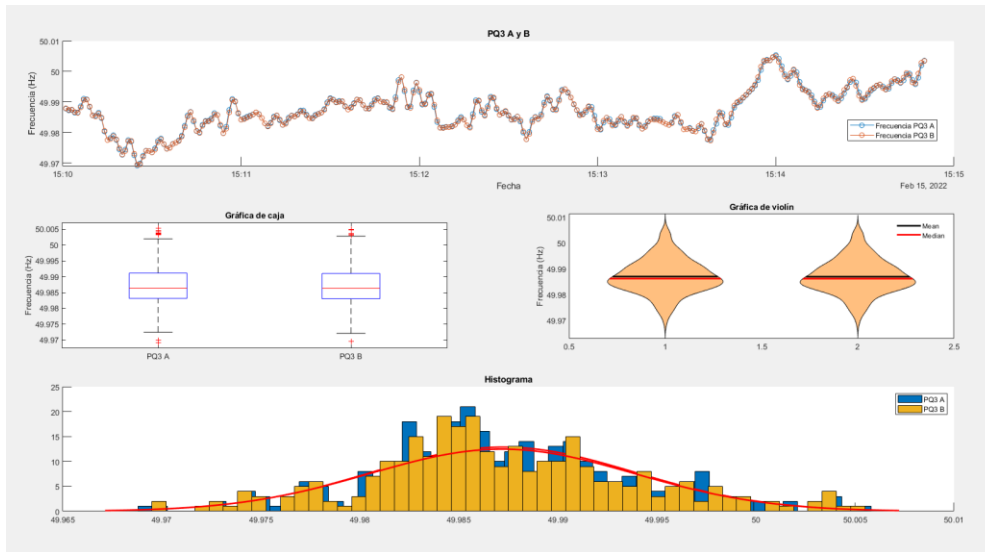


Figura 35. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200 Ω

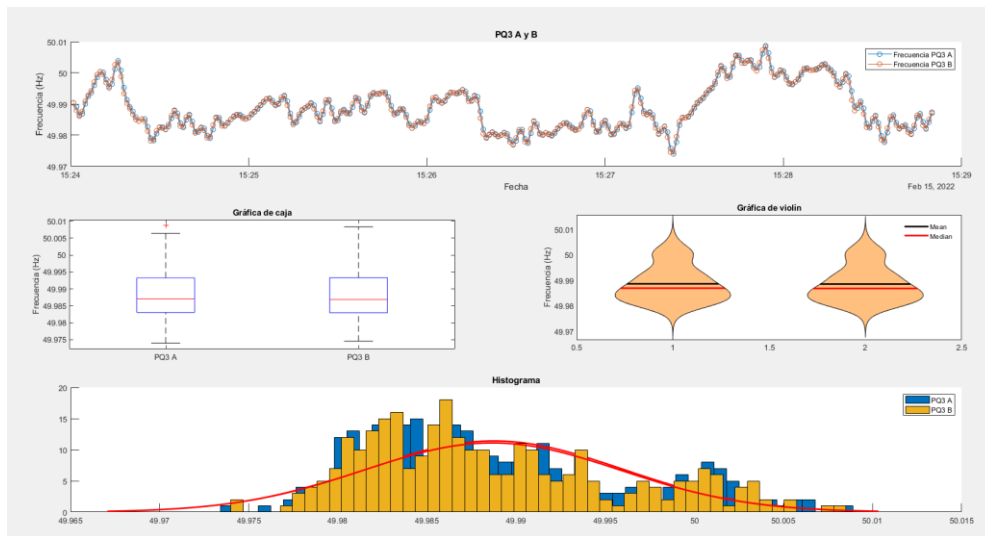


Figura 36. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100 Ω

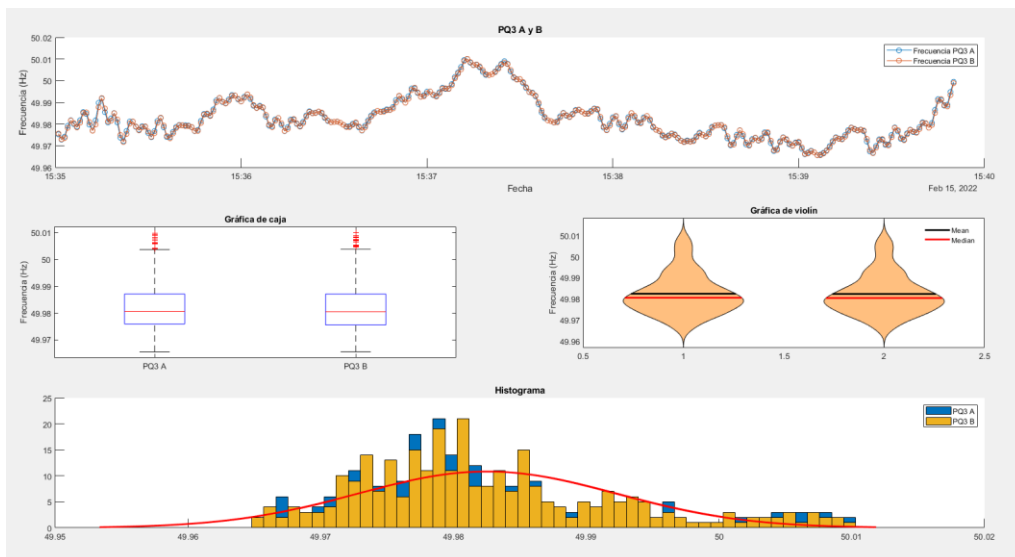


Figura 37. Comparación de frecuencias con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 Ω

En la tabla 9 se puede ver como ambos equipos recogen medias y medianas similares, estando la diferencia en

torno a la cuarta cifra decimal en la mayoría de los casos.

Tabla 9. Valores estadísticos por ambos dispositivos

		Media		Mediana		Desviación típica	
		PQ3 A	PQ3 B	PQ3 A	PQ3 B	PQ3 A	PQ3 B
<b>Ensayo 1</b>	Red local con carga 200 ohm	49.987236	49.987179	49.986429	49.986401	0.006651	0.006682
<b>Ensayo 2</b>	Red local con carga 100 ohm	49.988738	49.988652	49.987036	49.986914	0.007197	0.007194
<b>Ensayo 3</b>	Red local con carga 500 ohm	49.982609	49.982500	49.980707	49.980568	0.009740	0.009722

### 5.1.3 Medidas de tensión y corriente

Por último, también resulta conveniente estudiar las tensiones y corrientes. En las figuras 38 y 39 se muestran las tensiones y corrientes respectivamente medidas de la señal de la fuente monofásica.

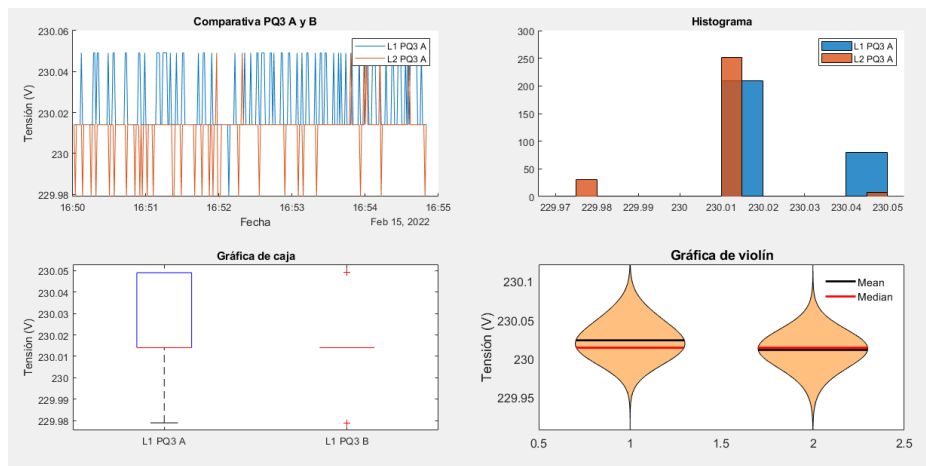


Figura 38. Comparación de tensiones con señal proveniente de la fuente monofásica

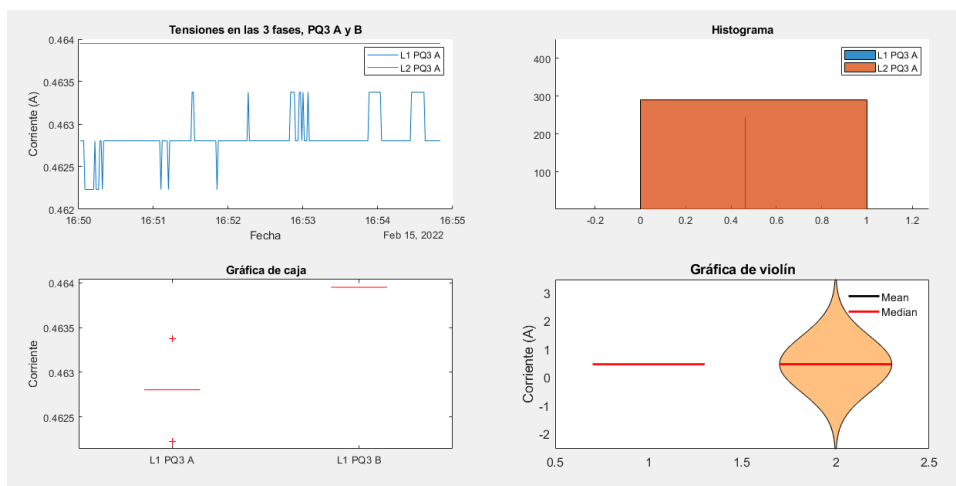


Figura 39. Comparación de corrientes con señal proveniente de la fuente monofásica

En la figura 38 se ve por ejemplo como para una tensión de 230 V los analizadores miden entre 229.98 V y 230.05 V, en concreto tres valores discretos: 299.98, 230.01, 230.05. Este efecto es debido al fondo de escala de estos analizadores. En el caso de las corrientes pasa algo similar, teniendo en cuenta además que la relación de transformación de las ondas de un analizador y del otro es distintas, dando así a dos fondos de escala diferentes. Mientras que el analizador PQ3 A cuenta con sondas 50 A:333mA, y por tanto con un fondo de escala de 5,73 mA, el analizador PQ3 B cuenta con sondas con un rango menor (hasta 5 A) y por tanto con un fondo de escala 10 veces menor, de 0,573 mA. Se hace notar aquí por tanto la importancia de trabajar con el equipamiento adecuado para las corrientes esperadas, de forma que no se pierda precisión en la medida.

Aplicando lo visto en el caso ideal a la red local, se han obtenido los resultados mostrados en las figuras de 40, 41 y 42 (tensiones) y en las figuras 43, 44 y 45 (corrientes)

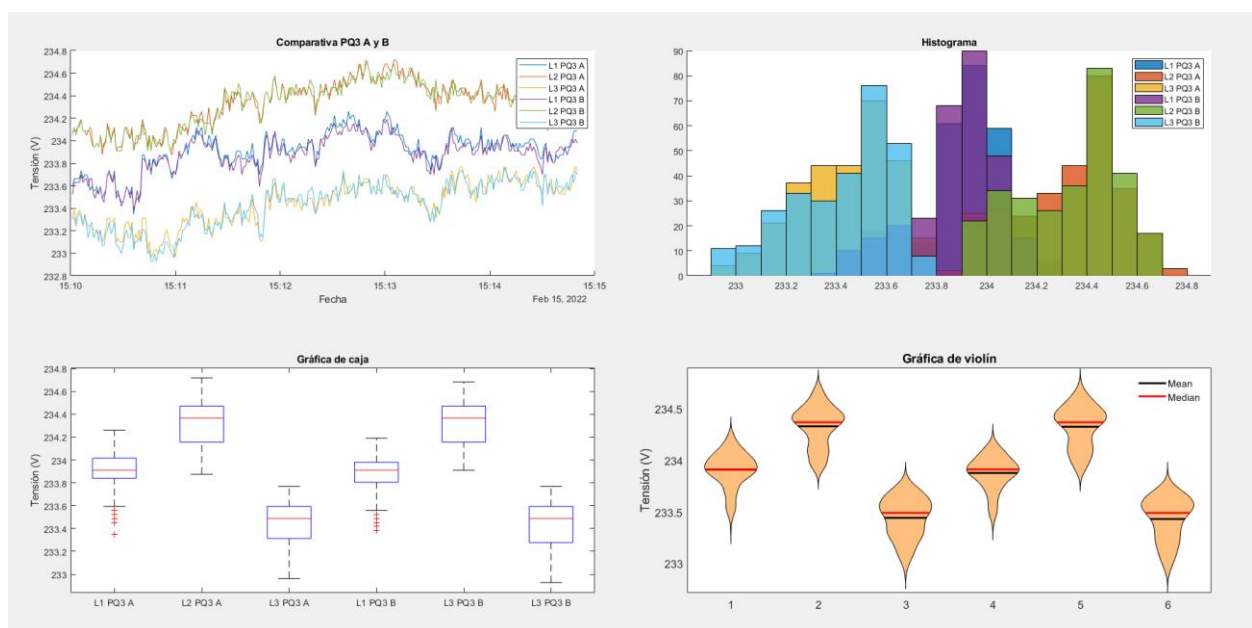


Figura 40. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200  $\Omega$

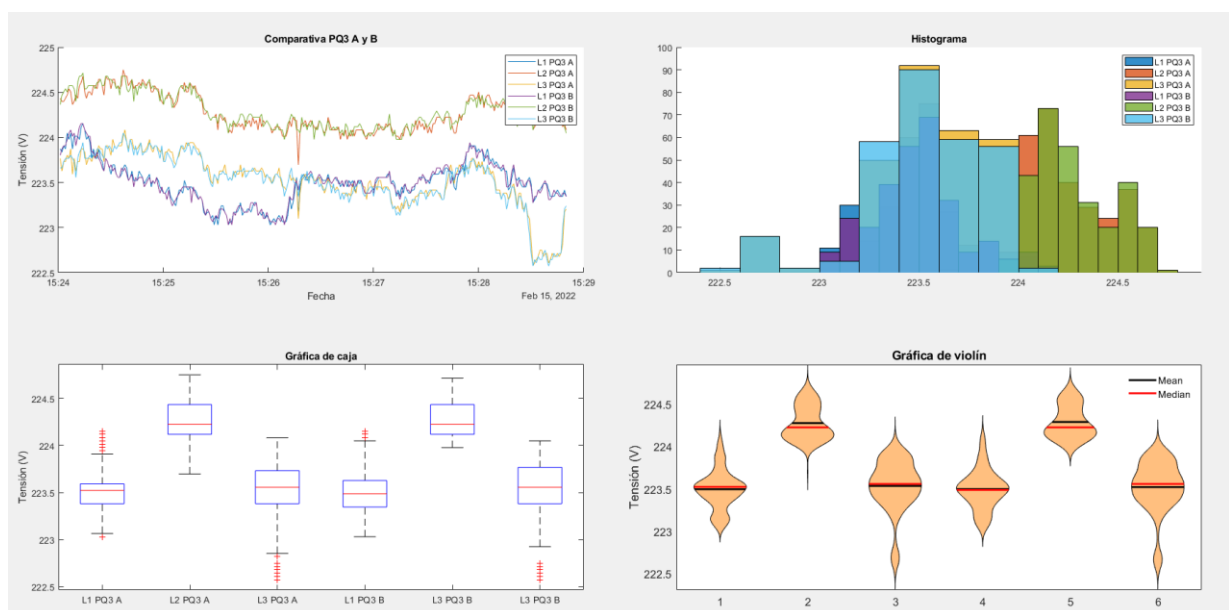


Figura 41. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100  $\Omega$

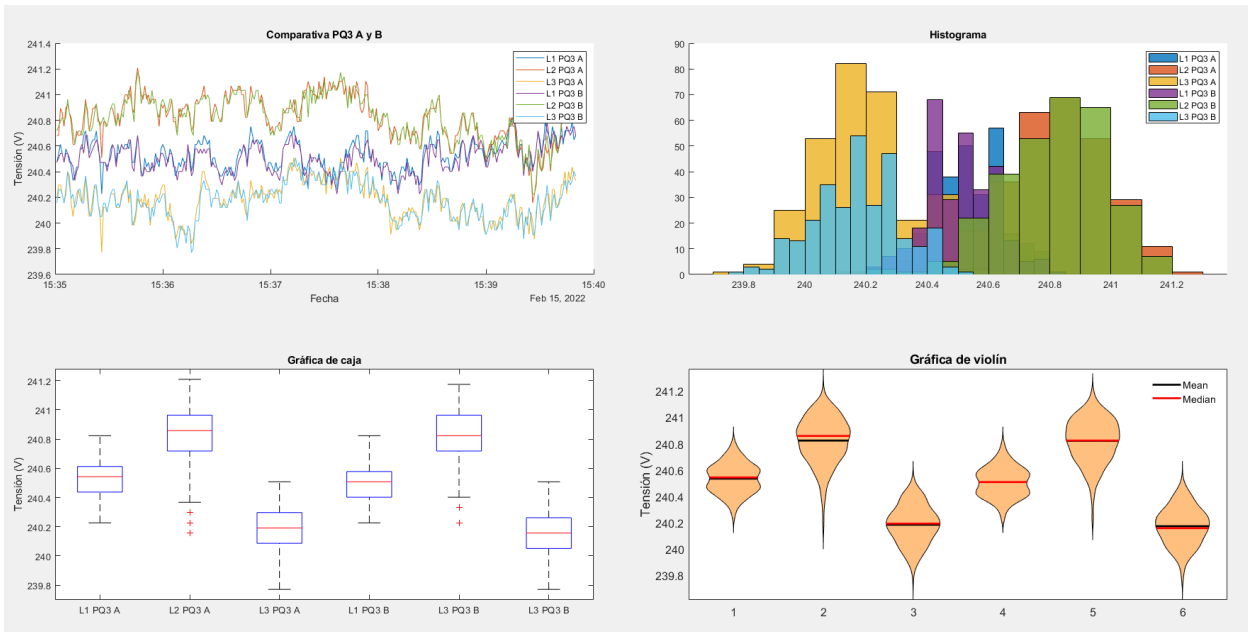


Figura 42. Comparación de tensiones con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 Ω

Las figuras 43, 44 y 45 muestran un funcionamiento correcto de los analizadores, donde ambos recogen las irregularidades de las tres líneas correctamente.

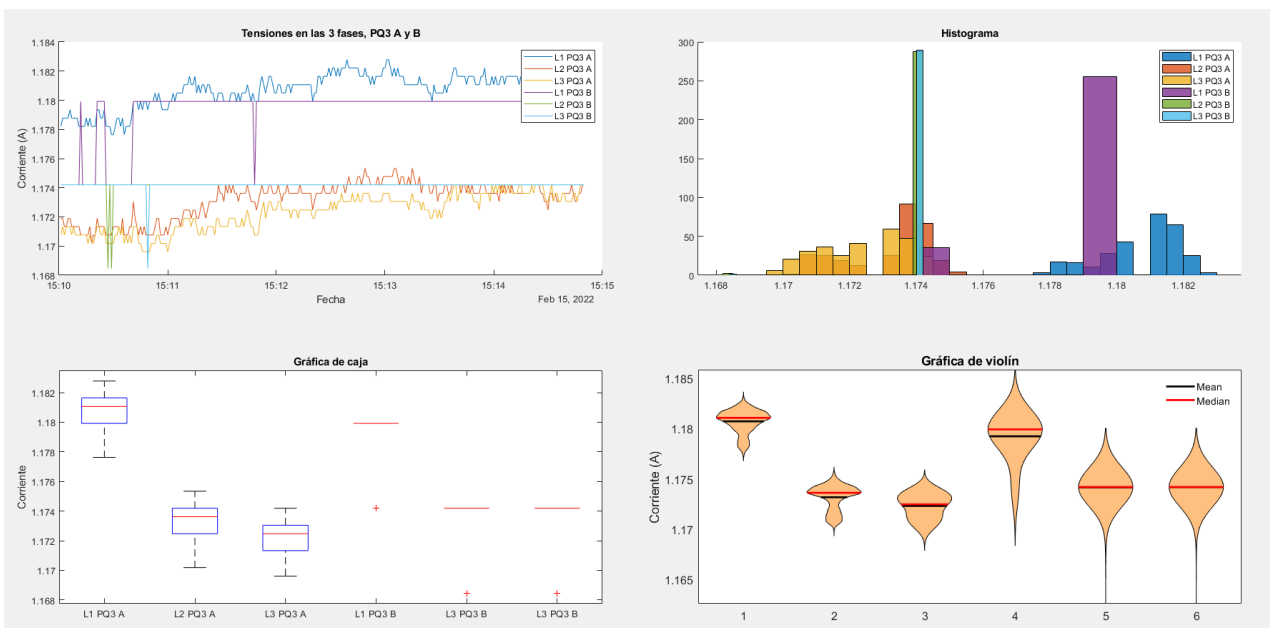


Figura 43. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 200 Ω



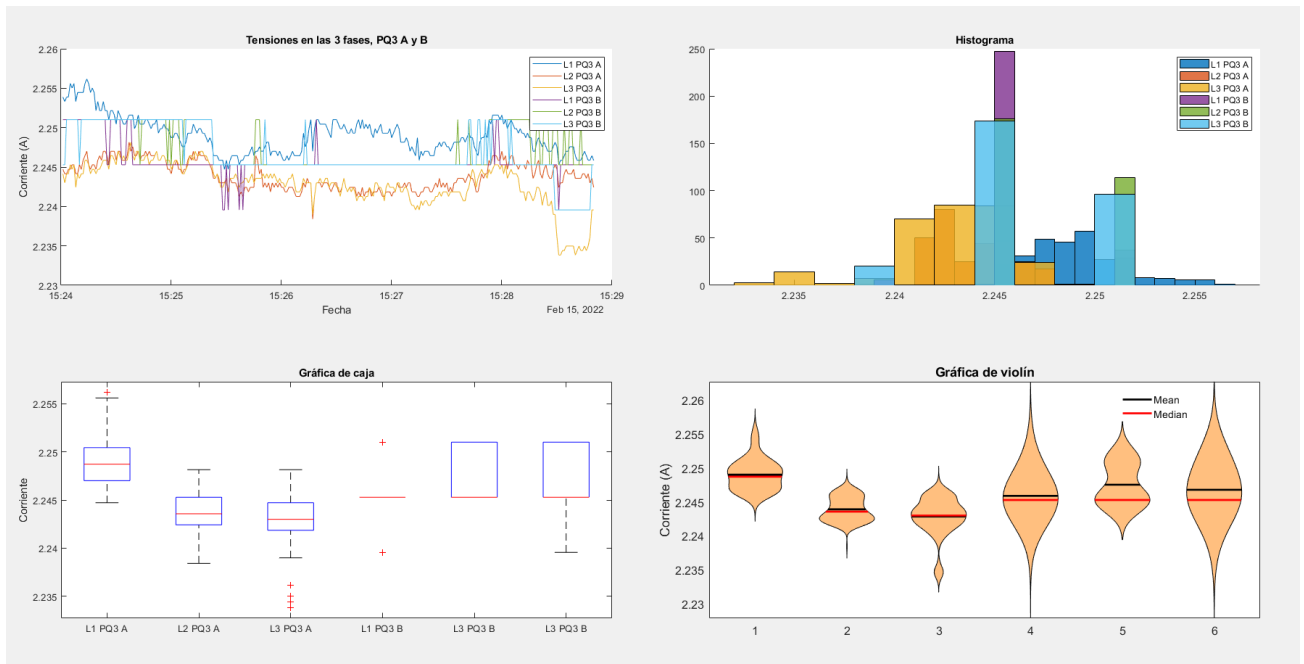


Figura 44. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 100 Ω

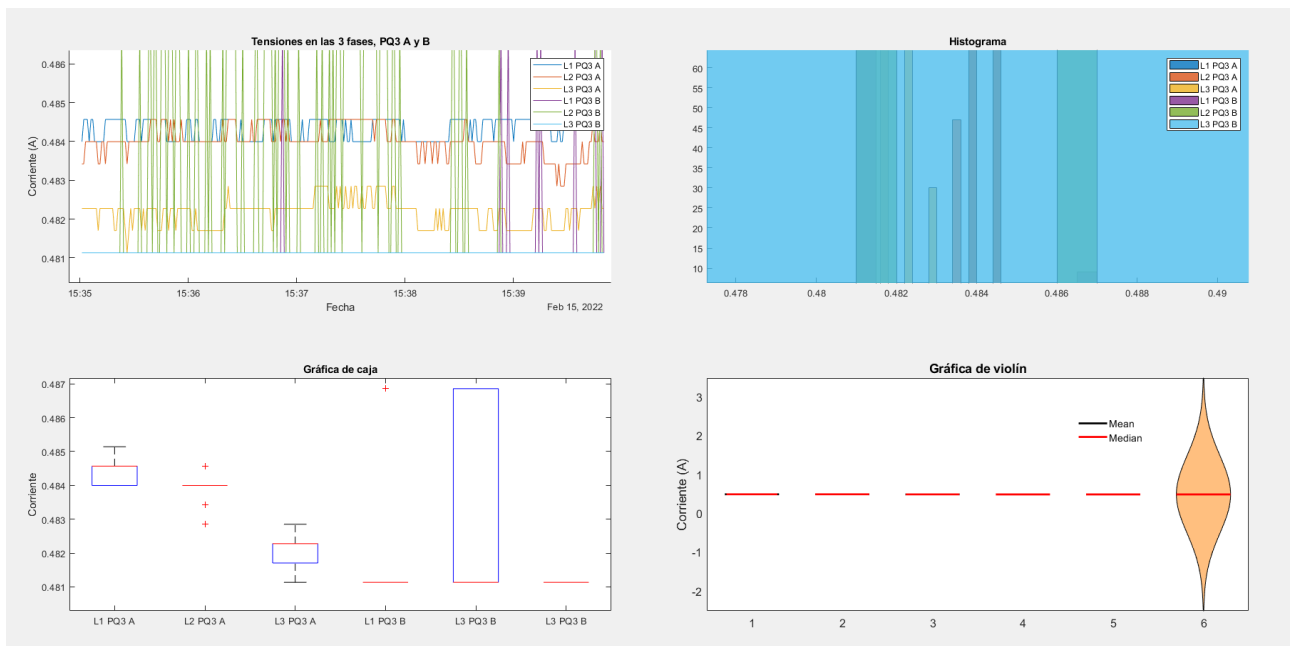


Figura 45. Comparación de corrientes con señal proveniente de la red con carga resistiva de 500 Ω

En las gráficas 43, 44 y 45, que comparan corrientes, se puede ver claramente la diferencia entre el uso de sondas con un fondo de escala de unos 6mA (PQ A) y sondas con menor fondo de escala (PQ B). En la figura 32, con carga resistiva de 100 Ω, la corriente resulta adecuada para medirla con precisión con una sonda de 5A, pero no con una sonda de 50A, ya que gran parte de las variaciones no se pueden leer. A medida que la corriente disminuye, el fondo de escala disponible empeora la calidad de la medida, devolviendo valores inadecuados aún con la sonda de 5 A.

## 5.2. Medida de formas de onda con dos PQube3

Uno de los puntos fuertes de los analizadores de calidad es poder trabajar con armónicos. Pocos dispositivos son capaces de medirlos, especialmente aquellos de más alta frecuencia. El analizador de calidad PQube3 no solo registra los armónicos hasta el 50 en cada fase, sino que también cuenta con un banco de registros dedicado a los armónicos de frecuencia a partir de los 2kHz, los llamados supra-armónicos. Es por tanto uno de los equipos mejor indicados para detectar este tipo de ruidos en la red. Se ha dedicado una tanda de ensayos específica con el objetivo de comprobar la calidad de estas medidas, y discernir en base a la precisión y el sesgo de estas si el analizador de calidad es capaz de distinguir formas de onda.

En estos ensayos se relaciona las medidas de dos PQM con distintos estados de la red, con un estado arbitrario, con una carga fuertemente ruidosa y con una señal ideal procedente de la fuente. En total, se han preparado 6 ensayos (tabla 10):

Tabla 10. Ensayos con armónicos

	Procedencia de la señal	Carga	Forma de onda
<b>Ensayo 1</b>	Fuente monofásica	-	Sinusoidal
<b>Ensayo 2</b>	Fuente monofásica	-	Flat-top
<b>Ensayo 3</b>	Fuente monofásica	-	Pointed-top
<b>Ensayo 4</b>	Fuente monofásica	-	Con armónicos dentro de la norma
<b>Ensayo 5</b>	Fuente monofásica	-	Con armónicos dentro de la norma
<b>Ensayo 6</b>	Red	3 bombillas	Armónicos producidos por la carga

En los ensayos, las medidas se han registrado cada segundo. Sin embargo, al ser los armónicos una variable de carácter estático y no percibirse variaciones llamativas durante los ensayos, se ha decidido a la hora de imprimir las gráficas realizar una media de todas las medidas obtenidas durante los 5 minutos y obtener un único valor representante de ese rango temporal.

### 5.2.1. Formas de onda Flat-top y Pointed-top

En primer lugar, se han realizado medidas con dos formas de onda distorsionadas que suelen aparecer en las redes de media y baja tensión. La primera se corresponde con una forma de onda achatada (flat-top) con un THD<sub>v</sub> ~ 3%, la cual se suele encontrar en redes de baja tensión residenciales, debido al uso masivo de rectificadores monofásicos en este tipo de redes. La segunda es una forma de onda puntiaguda (pointed-top), con un THD<sub>v</sub> ~4%, la cual es habitual en redes de baja y media tensión industriales, debido al uso masivo de rectificadores de 6 pulsos. En la tabla 11 se muestran los valores concretos de tensión introducidos para cada armónico.

Tabla 11. Valores de tensión para cada armónico para las señales de onda Flat top y Pointed top [47]

h	Flat-top		Pointed-top	
	V	φ	V	φ
1	224	0	230	0
3	5.3	0	6.9	180
5	3.7	180	6.9	0
7	1.9	0	0	0
9	0.5	180	0	0

En la figura 46 se visualizan las formas de onda resultante. A la izquierda aparece la onda flat-top, que presenta una forma achatada en los picos, mientras que a la derecha está la forma de onda pointed-top, que presenta una forma más aguda. Ambas formas son fácilmente reconocibles y se corresponden con lo esperado.

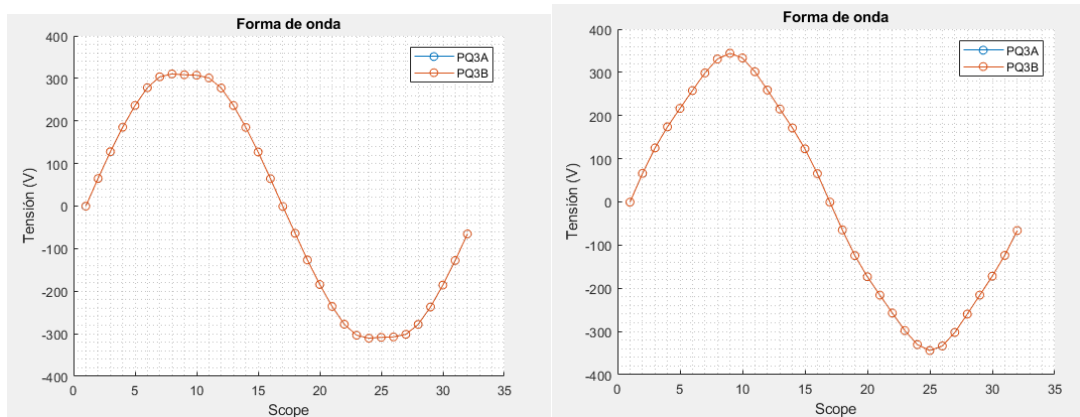


Figura 46. Formas de onda Flat-top (izq.) y Pointed-top(dcha.)

Para un mayor conocimiento de la onda que se tiene, se recurre al valor nominal de los armónicos. En la figura 47 se grafican todos los armónicos medidos desde la fundamental hasta el armónico de orden 50, en una escala logarítmica. En la gráfica superior se muestran los correspondientes a la señal Flat-top, mientras que en la gráfica inferior se muestran los correspondientes a la señal pointed-top. En la figura se puede ver como aparte de los armónicos introducidos manualmente, aparecen otros de un orden de magnitud menor. El origen de este ruido se divide entre el error cometido por el analizador, y los armónicos causados presumiblemente por la fuente al generar la forma de onda.

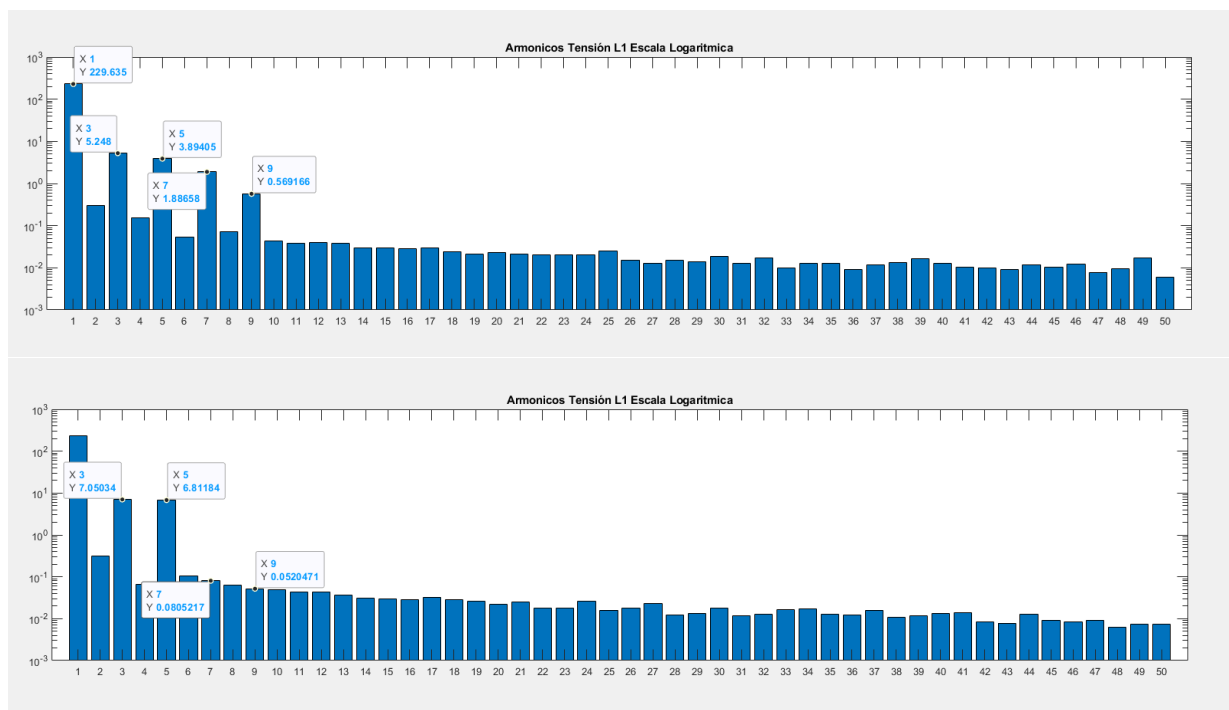


Figura 47. Armónicos de tensión de la señal Flat-top (arriba) y pointed-top (abajo)

## 5.2.2. Otras formas de onda artificiales

Además de las ondas esperables en una red, se han propuesto otros ensayos con formas de onda más irregulares para conocer los límites de los analizadores.

En primer lugar, se ha realizado un ensayo con una serie de armónicos que cumplirían con cierto margen la normativa UNE que limita el THD al 5%. La relación de los armónicos introducidos aparece en la tabla 12. Gracias a LabVIEW, se puede visualizar la forma de onda que debería tener teóricamente la forma de onda generada. En la figura 48 se muestra a la izquierda esta forma de onda teórica, mientras que la derecha se visualiza la forma de onda recogida por los analizadores. A simple vista, ambas figuras presentan unas perturbaciones similares.

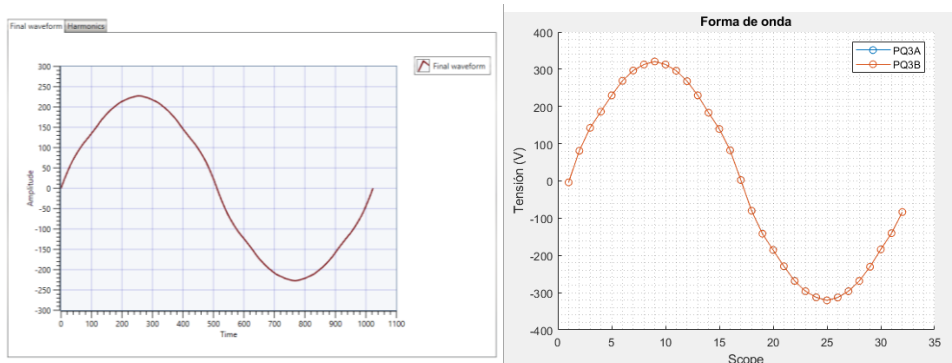


Figura 48. Forma de onda distorsionada. Imagen creada en LabVIEW (izq.) y medida con los PQube3 (dcha.)

Para una mejor comparación, se recurre de nuevo a la tabla 12. En esta tabla se muestran junto a la relación de armónicos introducidos en LabVIEW para crear la forma de onda, los medidos por el analizador. Los resultados para los armónicos tercero a noveno resultan adecuados, aunque para los armónicos de mayor orden y menor amplitud, la medida cuenta con peor calidad. En la figura 49, donde se muestra la relación completa de armónicos medidos, se ve como existe un error sistemático, donde el analizador de calidad detecta cierto nivel de armónicos en las frecuencias donde no debería haber. De nuevo, este error se produce en conjunto entre el error en la medida, y el ruido que produce la fuente monofásica al crear la forma de onda.

Tabla 12. Relación de armónicos para el ensayo 5

Armónico	Valores introducidos		Valores medidos		
	Amplitud (V)	Fase(°)	Amplitud (V)	Error absoluto (abs)	Error relativo (%)
<b>Fundamental</b>	230	0	229,519	0,48	0,21
<b>3</b>	6,9	0	6,7244	0,18	2,54
<b>5</b>	5,3	0	5,19784	0,102	1,98
<b>7</b>	3,6	0	3,50636	0,094	2,6
<b>9</b>	1,9	0	1,81718	0,083	4,36
<b>17</b>	0,4	0	0,355458	0,045	11,14
<b>33</b>	0,2	0	0,176709	0,023	11,65
<b>39</b>	0,02	0	0,004653	0,0154	76,74
<b>41</b>	0,02	0	0,004404	0,0156	77,98
<b>43</b>	0,02	0	0,002228	0,0178	88,86
<b>47</b>	0,02	0	0,002635	0,0174	86,83

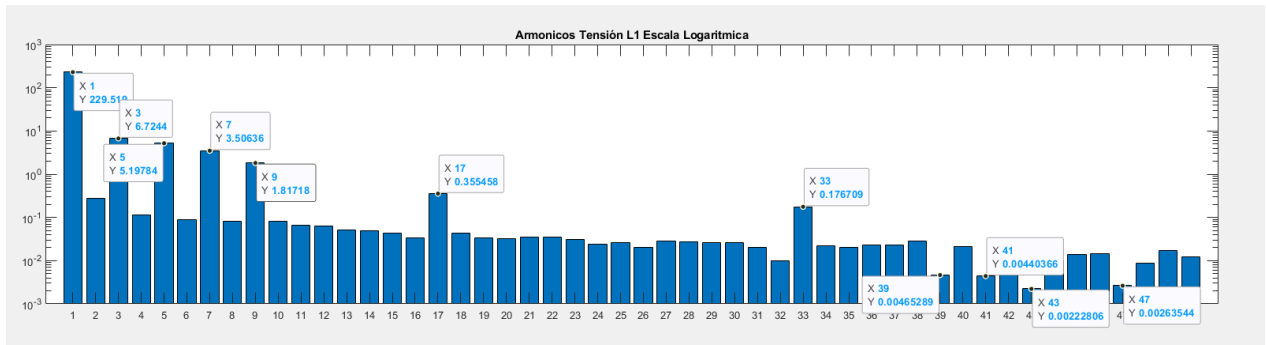


Figura 49. Armónicos de tensión de una señal distorsionada según la tabla 12

Por otro lado, se ha realizado un segundo ensayo donde se han introducido una serie de armónicos de mayor amplitud que en el caso anterior, pero que igualmente mantiene el total de THD por debajo del 5% permitido. Para deformar la onda lo máximo posible aun manteniendo el THD menor, se han introducido armónicos en prácticamente todas las frecuencias, con una amplitud mayor en los armónicos impares y un valor menor en los pares para mantener cierta relación con el ruido real en una red de distribución (figuras 50 y 51).

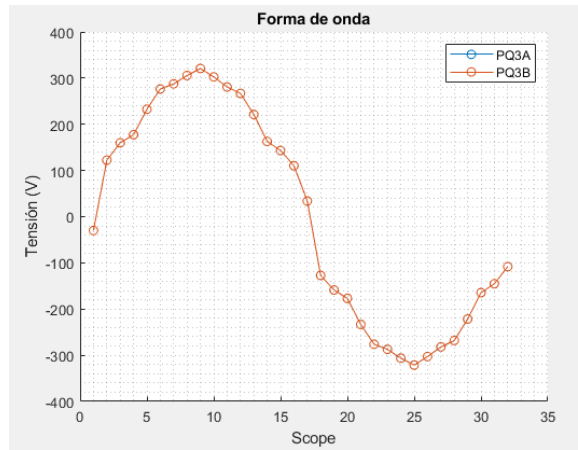


Figura 50. Forma de onda distorsionada con un THD inferior al 5%

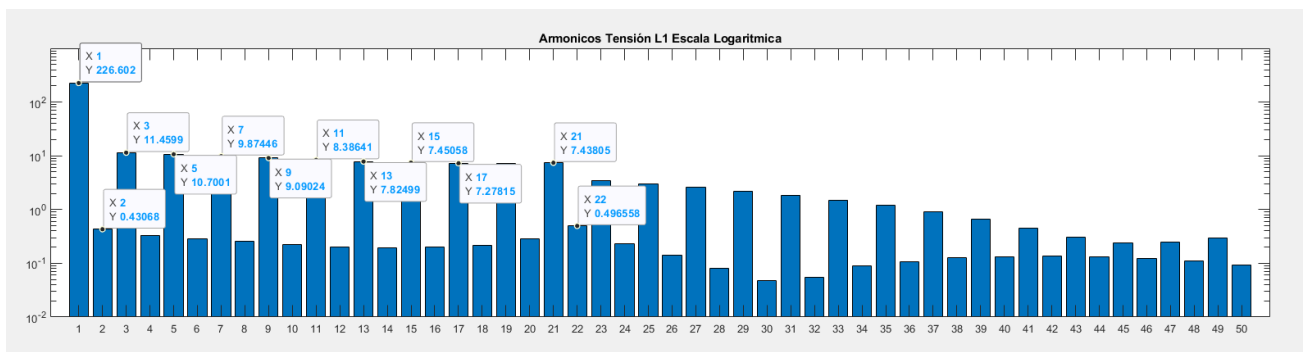


Figura 51. Armónicos de tensión de una señal fuertemente distorsionada

### 5.2.3. Medida de una carga trifásica de tres LED en la red local

Finalmente, se ha colocado como carga una bombilla led de distintas características en cada fase. El conjunto se ha conectado a la red local del laboratorio (según el montaje visto en el apartado de métodos), proporcionando así un entorno similar a un caso real de uso. La forma de onda resultante en cada una de las fases se puede ver en la figura 52. Resulta claramente visible que existe una deformación en la señal sinusoidal provocada por la carga, y como cada LED produce una deformación y por tanto unos armónicos distintos.

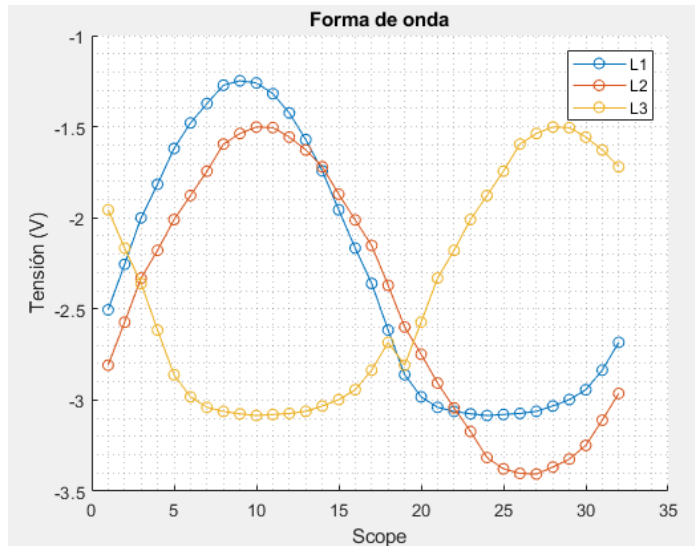


Figura 52. Forma de onda de las tres fases de la red cada una conectada a una carga Led distinta

Se puede ver con mayor detalle el resultado si se visualizan los armónicos presentes en cada fase, es decir, los armónicos generados por cada LED (figura 53). A simple vista resulta perceptible la diferencia entre los tres casos. Al contrario que en los ensayos anteriores, donde el ruido perceptible en los armónicos de mayor valor tenía un valor equiparable a los armónicos introducidos, en este caso resulta de una magnitud inferior al ruido introducido por los LEDs

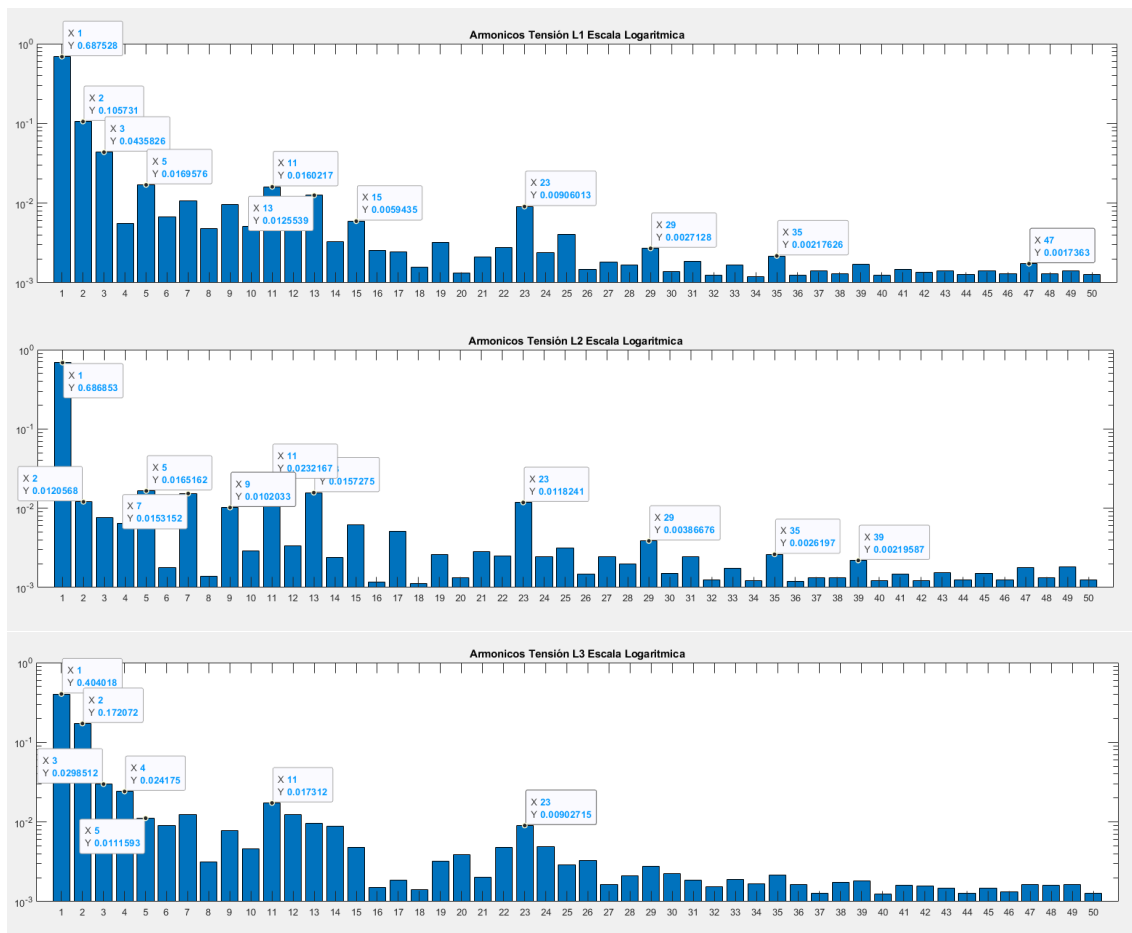


Figura 53. Armónicos causados por tres tipos distintos de bombillas LED

### 5.3. Ensayos comparativos entre PQube3 y $\mu$ PMU

Una vez estudiado el comportamiento de un analizador de suministro, primero de una forma más general (apartado 5.3.1) y después en un caso particular como es el estudio de señales distorsionadas (apartado 5.3.2), se procede ahora a comparar este con un equipo de medición de sincrofasores  $\mu$ PMU. Como se ha explicado anteriormente, ambos son equipos de distinta filosofía, pero diseñados para trabajar en el mismo tipo de redes. Con los ensayos realizados a continuación se podrá comparar la información devuelta por cada uno, la calidad de las medidas y el comportamiento de estas al almacenarse en la base de datos.

En la tabla 13 se presentan los ensayos realizados para este apartado.

Tabla 13. Ensayos comparativos entre PQube3 y  $\mu$ PMU

	Procedencia de la señal	Carga
<b>Ensayo 1</b>	Red	200 $\Omega$
<b>Ensayo 2</b>	Red	100 $\Omega$
<b>Ensayo 3</b>	Red	500 $\Omega$

#### 5.3.1. Frecuencia

Ambos equipos miden frecuencia, aunque la forma de obtener este valor difiere. Mientras que el analizador de calidad devuelve un valor cada segundo, resultado de la media de los valores anteriores, la  $\mu$ PMU devuelve frecuencia instantánea, calculada a través de la pendiente de la señal. De esta forma, es capaz de devolver hasta dos valores de frecuencia por ciclo.

En la figura 54 se muestran los datos referentes al ensayo 1, realizados en la red local con una carga resistiva de 200  $\Omega$ . A la izquierda se muestran las medidas de frecuencia medidas por el equipo PQ3 A, mientras que las gráficas de la derecha muestran las medidas realizadas por la  $\mu$ PMU a 100 FPS. La mayor diferencia perceptible entre ambas es la diferencia en muestras por segundo, siendo la de la segunda 100 veces superior a la primera. Sin embargo, a pesar de ello la media registrada por la PQube3 - 49,994275 Hz- y por la  $\mu$ PMU - 49,994592 Hz, así como la mediana (49,992897 Hz; 49,993469 Hz respectivamente) y la desviación típica (0,0112464 frente a 0,01139) son similares, coincidiendo hasta la tercera cifra decimal.

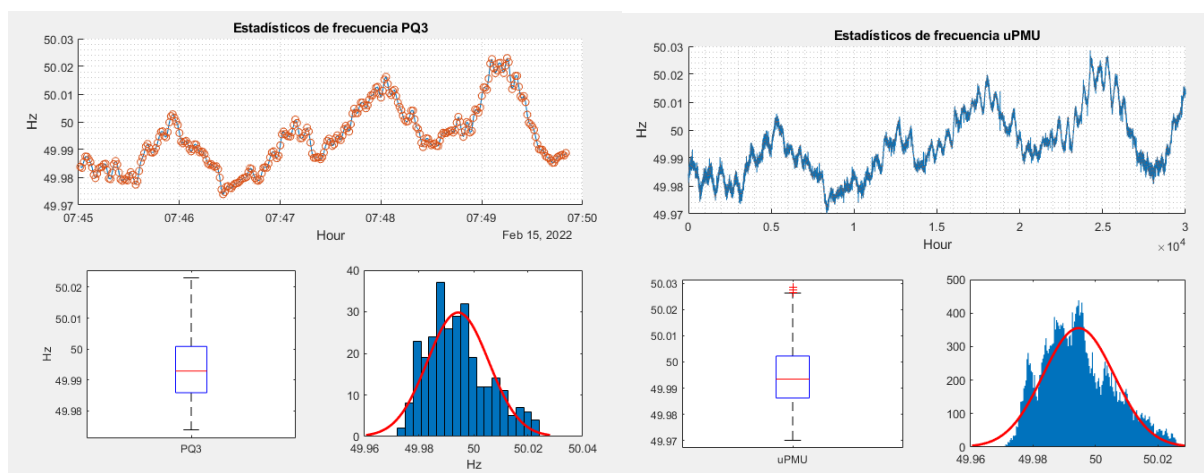


Figura 54. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de 200  $\Omega$ , medidos por PQube3 (izq.) y  $\mu$ PMU (dcha.)

En parte superior de la figura 55 se puede ver de forma solapada la frecuencia medida por ambos equipos durante 5 minutos. Se puede apreciar como existe un retraso entre la señal medida por el analizador y la medida por la  $\mu$ PMU. Este efecto se produce ya que la  $\mu$ PMU envía cada 10ms el valor medido en ese instante, con una estampación temporal realizada en origen. Sin embargo, la PQube3 envía un único dato cada segundo, el cual es además estampado temporalmente por la base de datos. La latencia existente en el caso de las medidas de PQube3 es mucho mayor que el de las medidas de  $\mu$ PMU. Aproximadamente la latencia añadida es de un segundo.

En la figura 55 también se pueden ver los diagramas de bigotes y violín uno al lado del otro. Especialmente en el caso del diagrama de violín, es palpable como la  $\mu$ PMU detecta mejor las pequeñas variaciones en la señal.

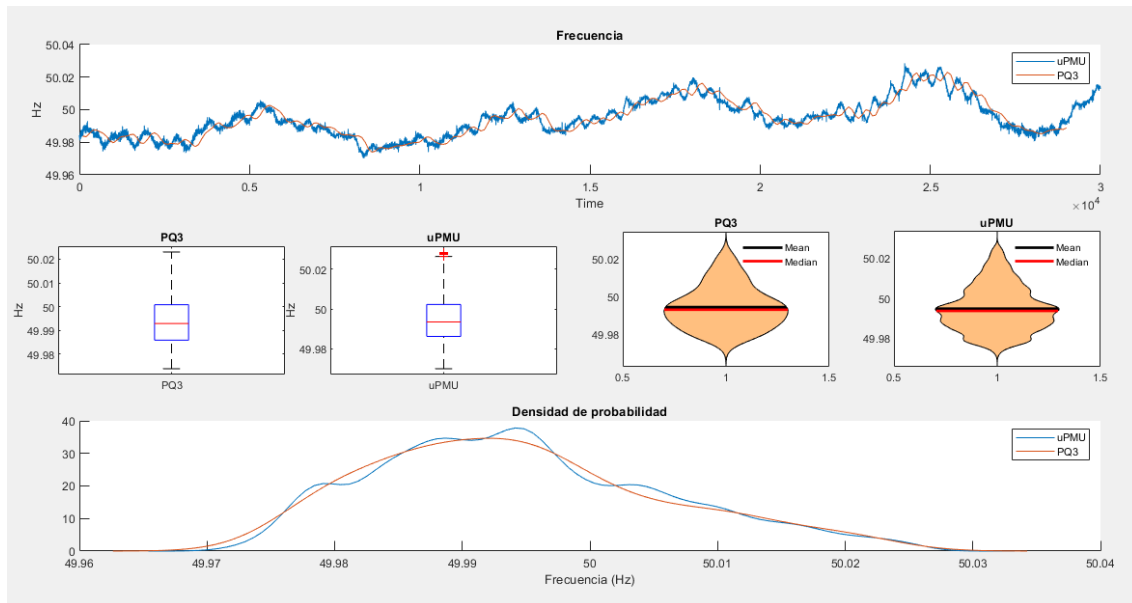


Figura 55. Comparación de las medidas de PQube3 y  $\mu$ PMU de la señal de la red local con una carga resistiva de 200  $\Omega$

En los ensayos 2 y 3, con cargas resistivas de 100  $\Omega$  y 500  $\Omega$  respectivamente, se han obtenido resultados similares. En el caso del ensayo 2 (figuras 56 y 57) es destacable la diferencia en la gráfica que compara la densidad de probabilidad. En ambos casos son apreciables dos nodos, uno con pico sobre los 50 Hz y otro en los 50.02Hz, pero el segundo es mucho más pronunciado y apreciable en las medidas de  $\mu$ PMU que en las de PQube3. Algo similar ocurre en el ensayo 3, donde el equipo PQube3 registra una función de densidad homogénea entre 50Hz y 50.04Hz, mientras que el equipo  $\mu$ PMU registra tres nodos apreciables a 50.01Hz, 50.024Hz, 50.035Hz. En el ensayo 3, figura 59 es también apreciable el desfase entre las medidas de PQube3 y  $\mu$ PMU, así como el efecto de suavizado que tiene el medir con menor resolución, ya que la PQube3 no llega a medir los picos ni los valles en la señal que sí registra la  $\mu$ PMU. Sin embargo, tomando las medidas de los 5 minutos, la media y la dispersión registrados entre ambos equipos sí que resulta muy similar, como se puede ver en la tabla 14.

Tabla 14. Comparación de valores estadísticos en las medidas de frecuencia entre una PQube3 y una  $\mu$ PMU

		Media		Mediana		Desviación típica	
		PQ3 A	$\mu$ PMU	PQ3 A	$\mu$ PMU	PQ3 A	$\mu$ PMU
<b>Ensayo 1</b>	Red local con carga 200 ohm	49,994275	49,994592	49,992897	49,993469	0,0112464	0,01139
<b>Ensayo 2</b>	Red local con carga 100 ohm	50.001653	50.002085	50.000908	50.001339	0.011112	0.011363



<b>Ensayo 3</b>	Red local con carga 500 ohm	50.020218	50.020781	50.020374	50.021168	0.011356	0.011303
-----------------	-----------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------	----------

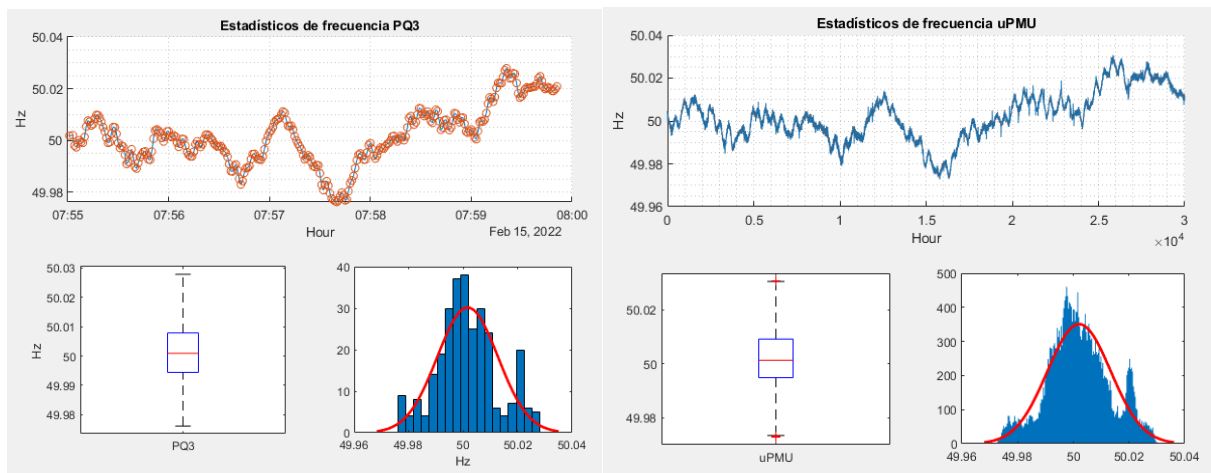


Figura 56. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de 100 Ω, medidos por PQube3 (izq.) y μPMU (dcha.)

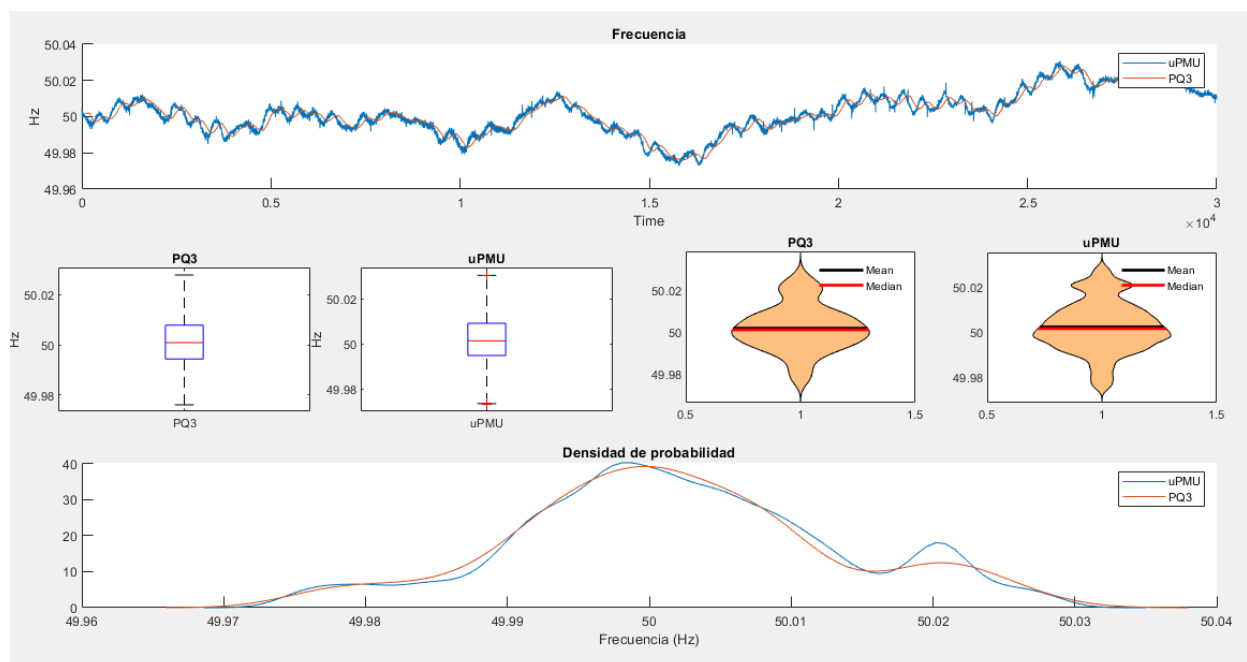


Figura 57. Comparación de las medidas de PQube3 y μPMU de la señal de la red local con una carga resistiva de 100 Ω

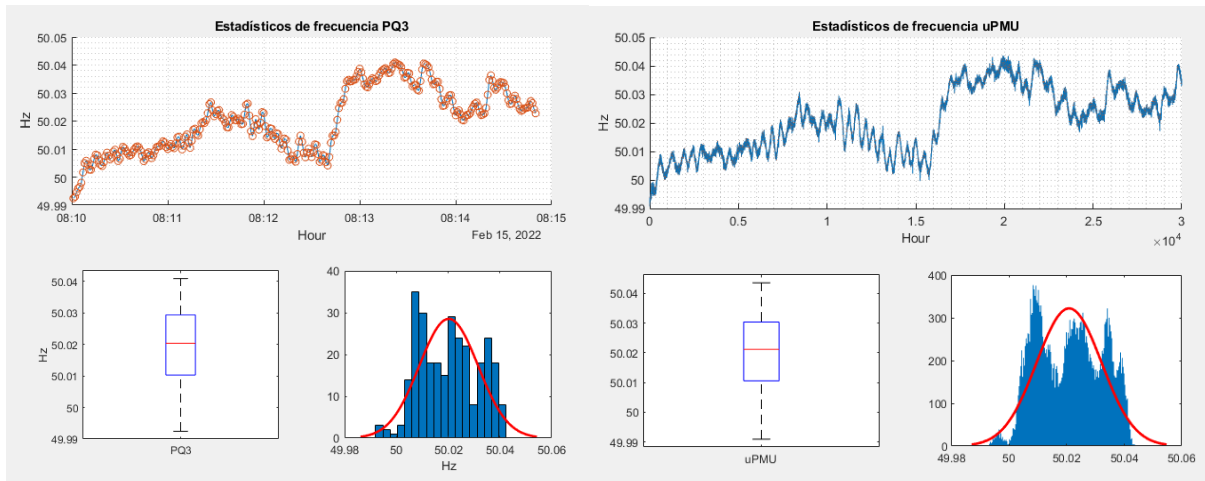


Figura 58. Valores de frecuencia de la red local con carga resistiva de  $500 \Omega$ , medidos por PQube3 (izq.) y  $\mu$ PMU (dcha.)

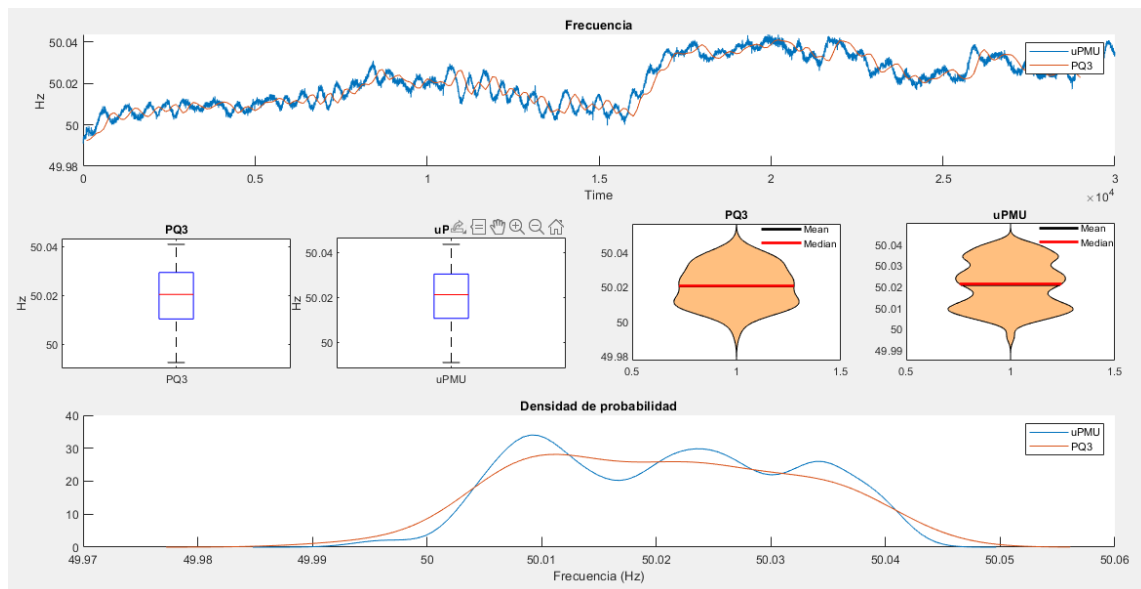


Figura 59. Comparación de las medidas de PQube3 y  $\mu$ PMU de la señal de la red local con una carga resistiva de  $500 \Omega$

### 5.3.2. Tensiones y corrientes

La forma de medir tensiones y corrientes entre ambos equipos también difiere. La  $\mu$ PMU mide sincrofasores, y devuelve el valor de estos en dos medidas distintas, módulo y ángulo. El analizador de calidad mide múltiples medidas de tensiones y corrientes, pero las de uso habitual son las medidas de fase en RMS.

En las figuras 60, 61 y 62 se muestra las medidas de tensión recogidas durante 5 minutos por una PQube3 y una  $\mu$ PMU en una red trifásica, conectada a una carga resistiva de 200, 100 y  $500 \Omega$  respectivamente. Los resultados son similares a lo que se vio en las medidas de frecuencia. Las medidas recogidas por la PQube3 son más suaves y presentan menos ruido que las recogidas con un muestreo mayor por el  $\mu$ PMU, pero vuelven a tener la misma tendencia central, con medias y mediana parecidas, como se puede ver en la tabla 15. De nuevo, en las gráficas de distribución de  $\mu$ PMU son perceptibles distintos nodos que no son reconocidos por las medidas de PQube3. El desfase entre las medidas de PQube3 y  $\mu$ PMU sigue existiendo.

Tabla 15. Comparación de valores estadísticos en las medidas de tensión entre una PQube3 y una  $\mu$ PMU

			Media		Mediana		Desviación típica	
			PQ3 A	$\mu$ PMU	PQ3 A	$\mu$ PMU	PQ3 A	$\mu$ PMU
<b>Ensayo 1</b>	Red local con carga 200 ohm	L1	234,844350	234,868278	234,857178	234,871002	0.314561	0.289386
		L2	233,636106	233,665480	233,628845	233,692093	0.292432	0.266356
		L3	233,859748	233,874439	233,909607	233,896378	0.249912	0.254858
<b>Ensayo 2</b>	Red local con carga 100 ohm	L1	229,208301	229,203424	229,206848	229,233902	0.345478	0.308342
		L2	228,065891	228,078867	228,118896	228,158340	0.420111	0.409235
		L3	228,204456	228,208538	228,259277	228,283234	0.348560	0.322407
<b>Ensayo 3</b>	Red local con carga 500 ohm	L1	220,302708	220,182244	220,292664	220,214401	0.239520	0.267840
		L2	219,254813	219,162677	219,274902	219,166412	0.191814	0.197216
		L3	219,133311	219,015484	219,204712	219,071167	0.245116	0.260246

Un dato importante que notar es como la  $\mu$ PMU, a pesar de ser un equipo que mide fasores y, por tanto, medidas de magnitud (en teoría equivalentes al valor de pico de la onda sinusoidal), devuelve en este caso medidas RMS como magnitud. Esto se trata de una práctica habitual, precisamente por acomodar las medidas a lo que es corriente en otro tipo de equipos.

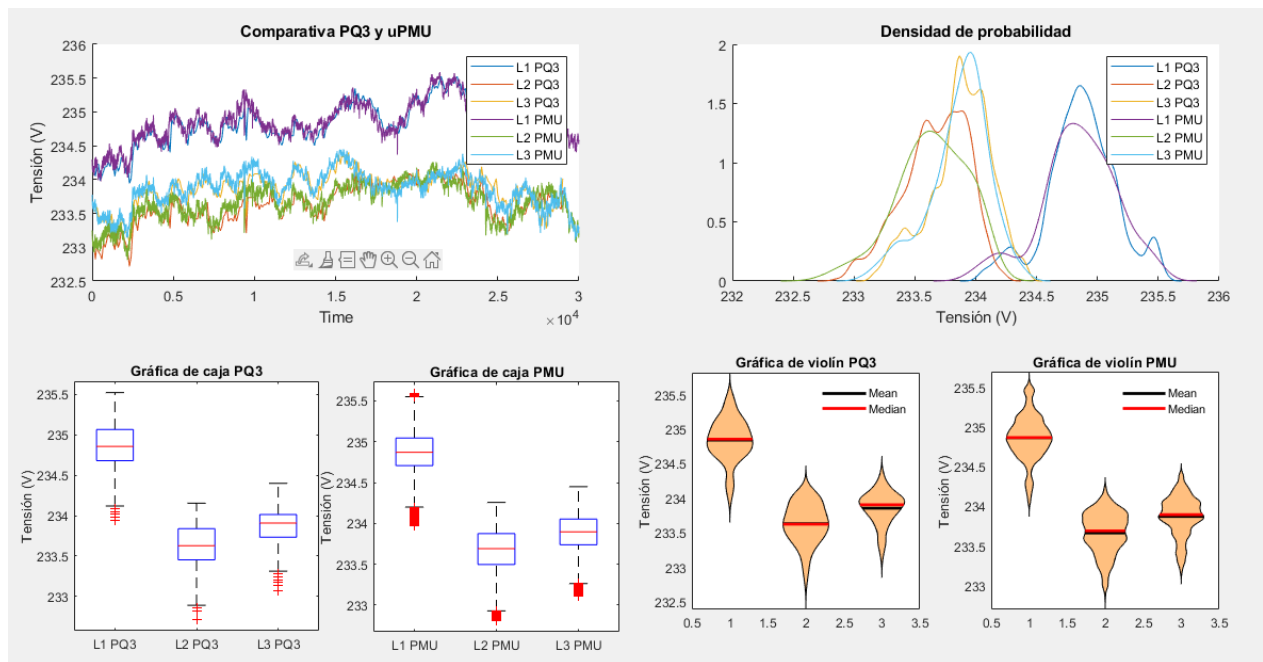


Figura 60. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de  $200 \Omega$

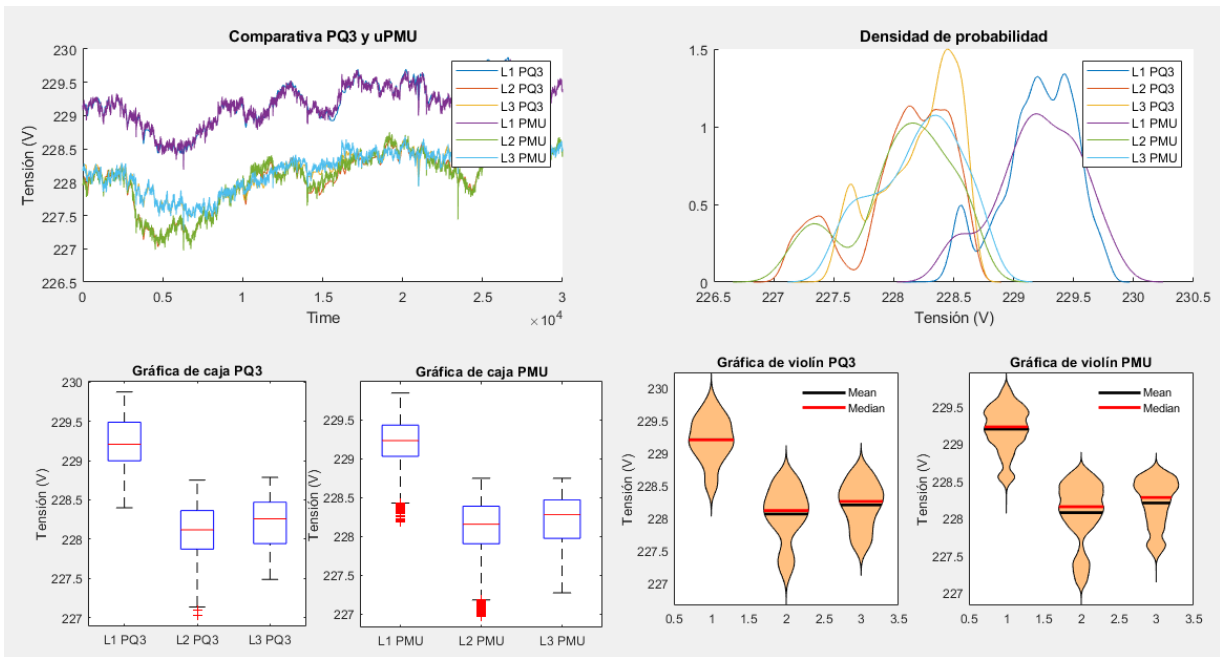


Figura 61. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de  $100 \Omega$

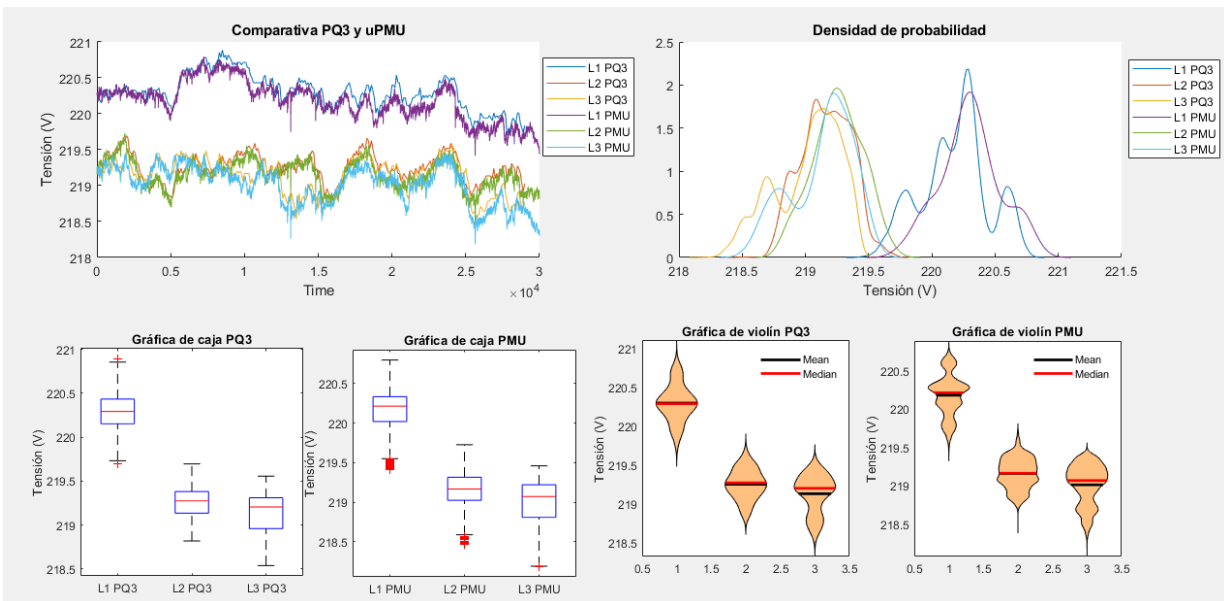


Figura 62. Comparación de las medidas de tensión de PQube3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de  $500 \Omega$

En el caso de las corrientes (figuras 63, 64 y 65) vuelven a aparecer diversos efectos ya vistos antes. De nuevo, los valores de corriente medidos por la  $\mu$ PMU aparecen en RMS, y no en valor pico como cabría esperar. En los tres casos, la PQube3 trabaja con las sondas de 50A mientras que la  $\mu$ PMU trabaja con las sondas de 5A.

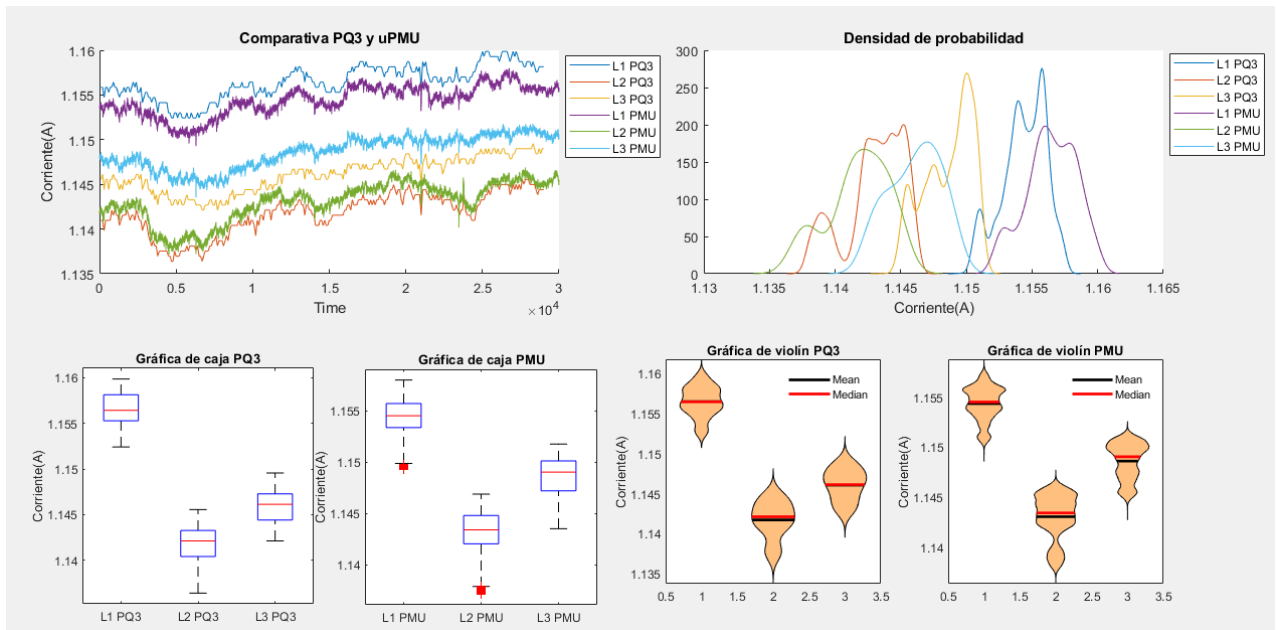


Figura 63. Comparación de las medidas de corriente de PQube3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 200  $\Omega$

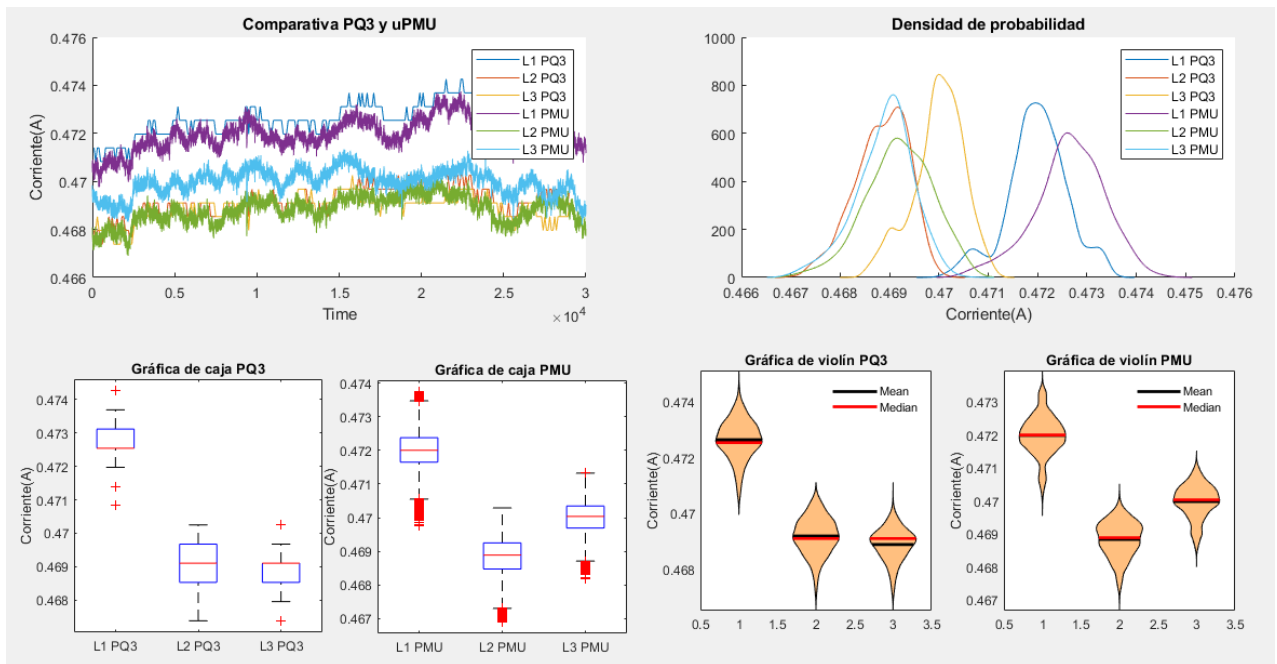


Figura 64. Comparación de las medidas de corriente de PQube3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 100  $\Omega$

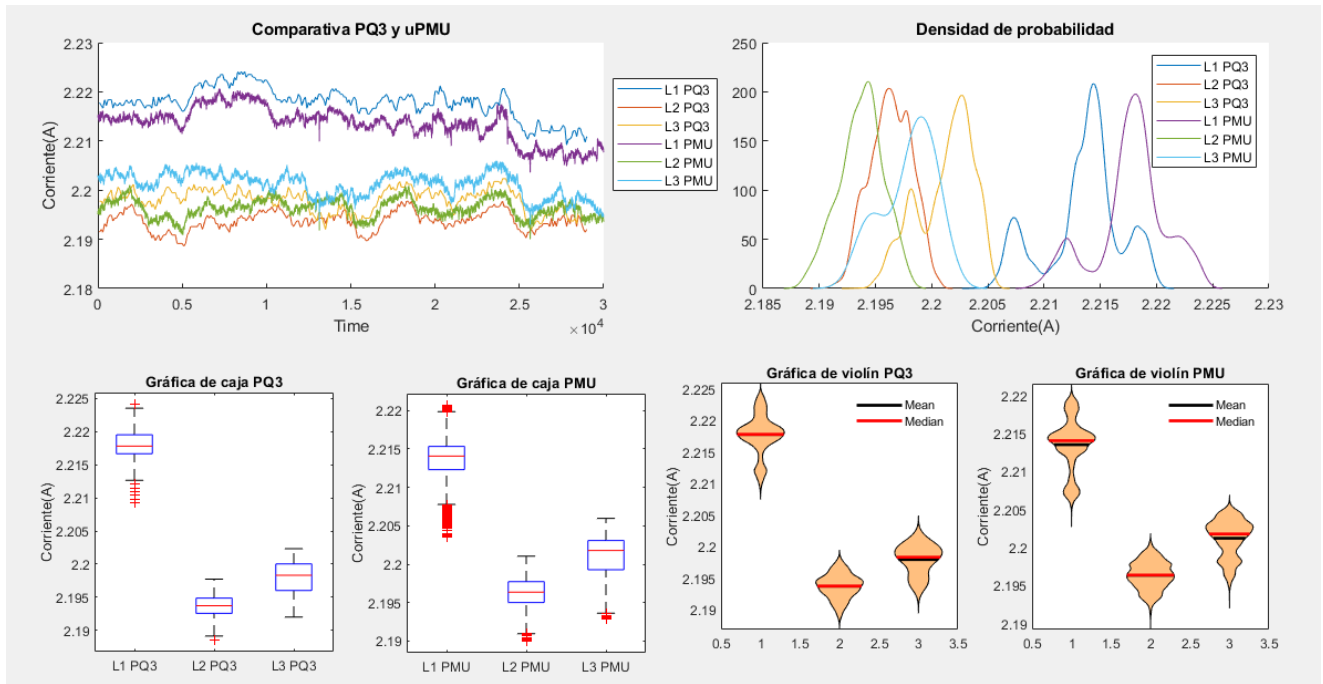


Figura 65. Comparación de las medidas de corriente de PQ3 y  $\mu$ PMU en una red local con carga resistiva de 500  $\Omega$

## 6. IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE LA RED CON MACHINE LEARNING

### 6.1. Objetivo y metodología

Como se ha visto a la hora de estudiar el analizador, la forma de onda de las bombillas es característica de cada una de ellas. Por tanto, se plantea ahora la posibilidad de utilizar técnicas de Machine Learning para, en base a los datos recolectados por la aplicación desarrollada, ser capaz de identificar el estado de la red, es decir, reconocer la bombilla conectada según la forma de onda recogida por el analizador. De este modo, en una red de distribución sería posible, de forma equivalente, conocer el estado de la red según el nivel de armónicos registrado, comparando los valores medidos en tiempo real con los modelos preentrenados con datos registrados anteriormente. De esta forma, se podría tener un gemelo digital de la red de distribución que detectase un funcionamiento atípico de la red, llegando incluso a reconocer la causa de dicho malfuncionamiento.

En líneas generales, el procedimiento a seguir es el indicado en la figura 66: se parte de unos datos conocidos, en este caso del nivel de armónicos de tensión producidos por cada bombilla. Con estos datos, se entrena un modelo. El modelo, ya entrenado, se alimenta en tiempo real con los datos registrados por el analizador de calidad, y devuelve como salida el estado actual de la red, que en este caso varía entre uno y tres según la bombilla colocada.

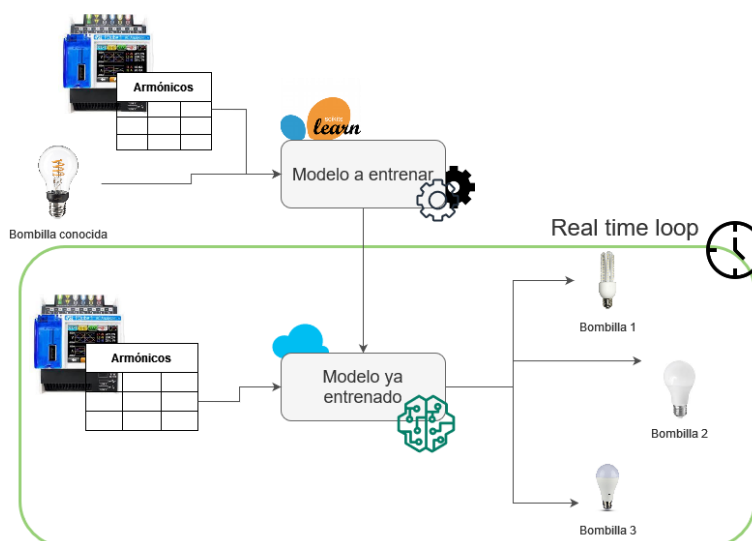


Figura 66. Predicción de la bombilla correcta

En este caso se ha decidido utilizar como datos de entrada únicamente los armónicos de tensión hasta el armónico 50, ya que se han considerado suficientemente representativos de cada caso. Otras variables podrían haber sido incluidas, pero no se ha visto necesario. Las bombillas que se pretende distinguir son las indicadas en el apartado de materiales.

## 6.2. Recolección y preprocesado de los datos

Para entrenar un modelo primero es necesario tener datos de referencia. En este caso, se necesita caracterizar la forma de onda que produce cada bombilla.

Para ello, se mantuvo en funcionamiento durante varios días el montaje con las bombillas conectadas en la red, tal y como se vio en el apartado 4.3.1. Se utilizó únicamente el analizador de calidad PQube3, con las sondas de corriente con fondo de escala de 5A. Para recoger los datos se utilizó la plataforma diseñada a lo largo de este trabajo, almacenando un nuevo valor cada segundo.

El volumen de datos almacenado durante 3 días, cada segundo multiplicado por las tres fases por los 50 armónicos registrados por fase da un valor de más de 38 millones de datos. Este volumen resulta exagerado y poco manejable, por lo que finalmente se decidió reducir los datos, de forma que los datos escogidos sean lo más significativos posible de cada bombilla para que se facilite la labor de predicción. En primer lugar, para comprobar que existen diferencias entre los tres casos, se grafica un perfil de referencia con la media de todos los datos registrados para cada armónico de cada bombilla (figura 67). A simple vista, la diferencia entre las medias es poca pero perceptible, por lo que es de esperar que los modelos a diseñar serán capaces de diferenciarlos.

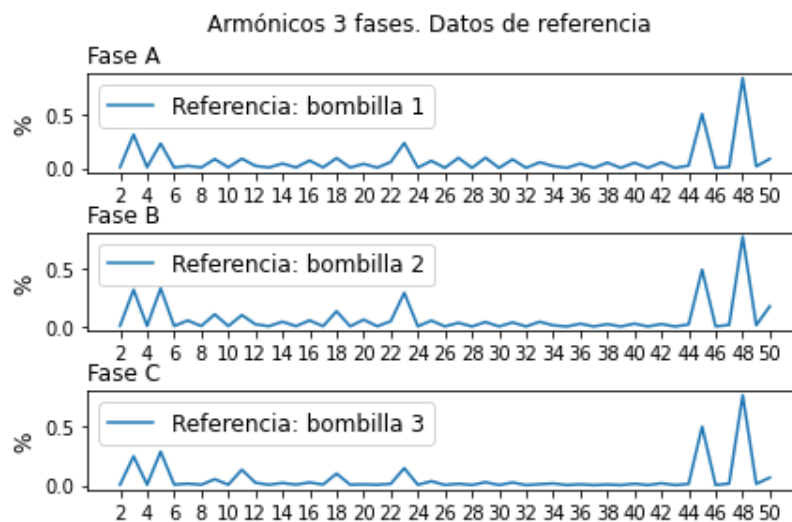


Figura 67. Media de los armónicos registrados para cada bombilla

Los datos recogidos, aparte de ser diferenciables entre bombillas, deben ser similares dentro del mismo caso, para que se pueda reconocer este. Por definición, los armónicos son una magnitud que se mantiene prácticamente constante en el tiempo y de las tensiones de alimentación (se entiende el valor porcentual de los armónicos). Esto se ha comprobado en numerosos trabajos, entre ellos en [48], donde se concluye que la mayor variación del valor de los armónicos con respecto al tiempo se produce en los primeros 10 minutos, cuando la bombilla pasa de estar a temperatura ambiente, “fría” y se calienta.

En este caso, los armónicos registrados cumplen la teoría. Entre los armónicos más significativos (aquellos que aparecen con una media mayor en la figura 67), encontramos dos casos principales: los que mantienen su valor constante a lo largo de las dos horas, como es el caso del armónico 5, 7 o 45 (figura 68), y aquellos que varían ligeramente con el tiempo, llegando a estabilizarse alrededor del minuto 10 en su mayoría, como es el caso del armónico 3, 9 o 23 (figura 69)





Figura 68. Valor del armónico 3 durante los primeros 40 min. Azul: bombilla 1, Rosa: bombilla 2, Naranja: bombilla 3

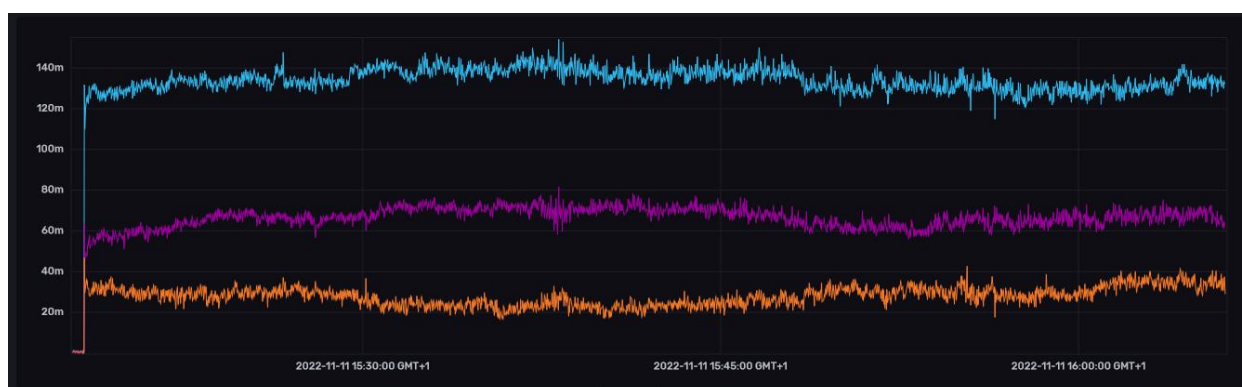


Figura 69. Valor del armónico 45 durante los primeros 40 min. Azul: bombilla 1, Rosa: bombilla 2, Naranja: bombilla 3

Para la mayoría de los algoritmos predictivos es necesario además que los datos tengan un balanceo adecuado entre clases. Es decir, que exista un número similar de datos perteneciente a cada una de las clases. Esto no resulta un problema aquí ya que el número de datos medido por fase es prácticamente idéntico, pero se ha considerado necesario incluir entre los datos de entrenamiento un porcentaje adecuado de armónicos con “bombilla fría” que sea equiparable con los datos de “bombilla caliente”. Por tanto, se han escogido únicamente los datos correspondientes a los primeros 40 minutos de la prueba.

Otra cuestión a tener en cuenta es que es recomendable que los datos estén normalizados. Para ello, se han indicado los valores en su valor porcentual con respecto a la fundamental. De esta forma, además se eliminan parte de los errores causados por la fluctuación de la señal de alimentación.

### 6.3. Entrenamiento del modelo

Para entrenar el modelo fuera de línea se ha recurrido a la librería Scikit-learn [49], dedicada al análisis predictivo. La librería, open source, cuenta con varios algoritmos de clasificación, regresión y análisis de grupos. En este caso, se pretende recurrir a un algoritmo de clasificación, es decir, distinguir a qué “categoría” (bombilla) pertenecen los datos de entrada (los armónicos). Además, se trata de un aprendizaje supervisado, ya que los datos que se utilizan para el aprendizaje están anotados, es decir, se conoce a qué categoría pertenecen.

Entre las opciones disponibles en Scikit-learn para este trabajo, se han elegido probar con un árbol de decisión y con una red neuronal.

#### 6.4.1. Árbol de decisión

Los árboles de decisión son algoritmos que modelan la toma de decisión basándose en las relaciones entre las columnas de entrada de un conjunto de datos. Utiliza los valores, conocidos como estados, de estas columnas para predecir los estados de una columna que se designa como elemento de predicción. Específicamente, el

algoritmo identifica la correlación existente entre las columnas de entrada y la columna a predecir. Se utilizan sobre todo para clasificación de información, bifurcando y modelando los posibles caminos tomados y su probabilidad de ocurrencia para mejorar su precisión. Tienen la ventaja de que una vez armados, se ejecutan muy rápido y obtienen rápidamente resultados en tiempo real.

En este caso, la columna a predecir sería la bombilla conectada, mientras que las columnas de entrada son los 50 valores de armónicos, entre los cuales el algoritmo se encargará de decidir cuál es la correlación entre sus valores y la bombilla.

#### 6.4.1.1. Ajuste de hiper-parámetros

Para crear el modelo simplemente hay que ajustar una serie de hiper-parámetros que definen las configuraciones que utilizará el algoritmo durante el entrenamiento. Scikit-learn define estos hiper-parámetros como entradas de la función `sklearn.tree`. Los hiper-parámetros a configurar son:

- **Criterion** (métrica). La métrica es la manera que tiene el algoritmo para saber la calidad de la división de los datos. Según la métrica escogida, se siguen distintos criterios para medir lo que es “mejor”. Scikit-learn admite las métricas más usadas, que son la impureza de Gini (“Gini”), la ganancia de información (“entropy”) o la reducción de varianza (“log\_loss”).
- **Splitter** (divisor). Se refiere a la estrategia elegida para dividir los datos. Scikit-learn admite una división aleatoria (“random”) o que se busque a cada paso la mejor división (“best”).
- **Max\_depth** (profundidad máxima). Es la cantidad de divisiones que se realizan
- **Min\_samples\_split**. Son los datos mínimos que debe de haber para que se divida una hoja en dos.
- **Min\_samples\_leaf**. El número mínimo de datos que debe de haber tras una división para que se cree una hoja nueva

El ajuste de los hiper-parámetros se realiza mediante prueba y error. Se han dividido los datos de entrenamiento disponibles en dos sets, uno de train con el 80% de los datos y otro de test con el 20% restante. La elección del modelo se ha realizado ejecutando diversas combinaciones de hiper-parámetros hasta que se ha obtenido uno con mayor precisión. En general, la precisión alcanzada ha sido superior al 95%. En la tabla 16 se indican la precisión alcanzada en algunas de las pruebas.

Tabla 16. Precisión alcanzada por varios árboles de decisión

Modelo	Métrica	Splitter	Profundidad	Muestras mínimas por división	Muestras mínimas por hoja	Accuracy/ precisión
1	Entropy	Best	1	20	5	65.986949
2	Entropy	Best	2	20	5	99.755302
3	Entropy	Random	2	20	5	99.836868
4	Gini	Best	2	20	5	99.918433
5	Gini	Best	4	20	5	99.918433
6	Gini	Random	1	20	5	66.068515
7	Gini	Random	2	20	5	100
8	Gini	Random	3	20	5	99.918434
9	Gini	Random	4	20	5	100

Entre todos los modelos de la tabla se ha elegido el que tiene una mayor precisión, el número 7. Como se

puede ver, el factor que más afecta a la precisión es la profundidad de las capas. Con una capa, apenas se aciertan el 66% de los datos, mientras que a partir de dos la precisión es cercana al 100%. Visualizando una matriz de confusión se puede ver como este 66% se causa al dividir la salida en únicamente dos categorías (figura 70, izquierda). Al añadir una capa más, la clasificación en tres categorías se realiza correctamente (figura 70, derecha). No se ha visto necesario elegir un modelo más profundo al alcanzarse una precisión tan alta en la segunda capa. Por otro lado, los valores de muestras mínimas por división y muestras mínimas por hoja apenas tenían repercusión en la precisión, por lo que su elección no se ha incluido en la tabla.

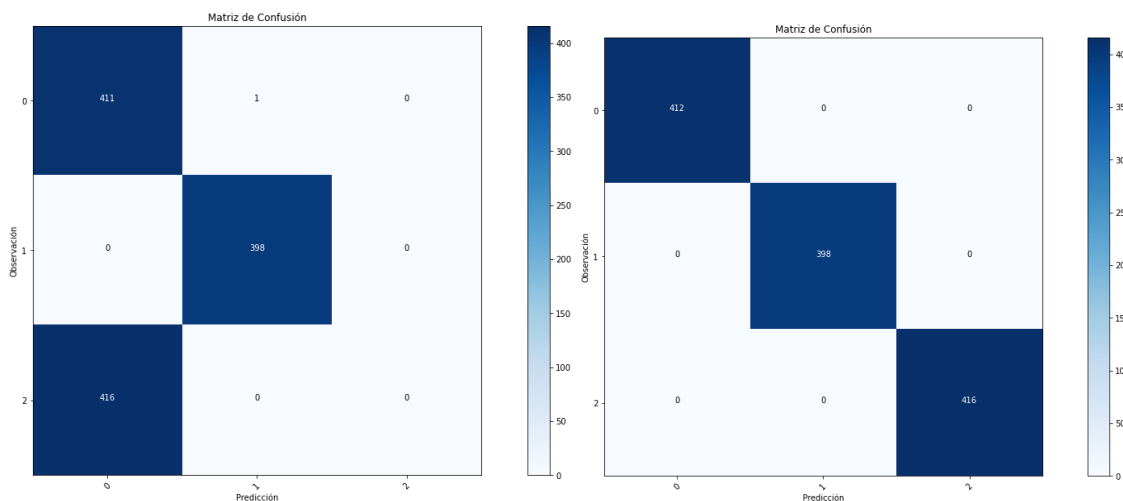


Figura 70. Matriz de confusión de los modelos con una capa de profundidad (izq.) y el elegido con dos capas (dcha.)

Los altos valores de precisión alcanzados pueden deberse a varios motivos. El primero sería una fuerte correlación entre los datos de entrada y los de salida, lo que facilitaría enormemente la labor del árbol de decisión. Esta teoría se apoya además en la constancia de los datos en el tiempo y en lo distinguibles que resultan incluso a simple vista las formas de onda, tal como se ha visto en el apartado anterior. Por otro lado, una precisión tan alta puede deberse a un sobre entrenamiento del algoritmo. Para llegar a una conclusión habrá que ejecutar el modelo con nuevos datos en tiempo real.

### 6.4.2. Red Neuronal

Las redes neuronales son algoritmos que se basan en la construcción de una red de diferentes capas formadas por nodos, llamadas perceptrones de tal manera que tiene capacidad de encontrar una función  $f$  no lineal que se aproxime a la relación entre las entradas y la salida. Sirve tanto para clasificación como regresión, dependiendo si la salida es continua o discreta. El nombre de red neuronal proviene de la similitud de esta estructura con las redes cerebrales, siendo el perceptrón el equivalente a las neuronas.

El perceptrón está formado por una regresión lineal de todas las entradas y una función de activación  $\sigma$ , que ajusta la salida del nodo (figura 71). El objetivo del entrenamiento es encontrar los parámetros  $w$  y  $b$  de la regresión lineal, llamados pesos, que relacionen las entradas con las salidas. En una red neuronal, los perceptrones se ordenan en capas, de forma que la salida de una capa es la entrada de la siguiente. A las capas que se encuentran entre la primera (capa de entrada) y la última (capa de salida) se le llama capas ocultas.

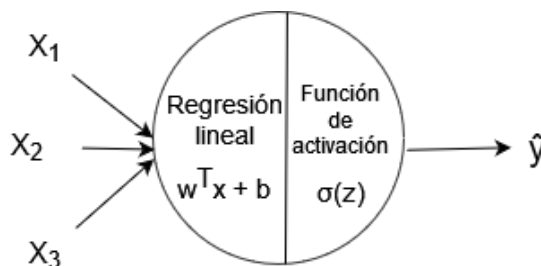


Figura 71. Estructura del Perceptrón

El número de capas ocultas, el número de perceptrones por capa y la función de activación son todo hiper-parámetros elegibles por el usuario a la hora de diseñar su modelo. De su correcta adaptación a los datos dependerá la calidad de la predicción. Un modelo con muchas capas y un gran número de perceptrones puede resultar costoso computacionalmente, además de verse afectado por problemas de sobre entrenamiento o convergencia.

#### 6.4.2.1. Ajuste de hiper-parámetros

En este caso, Scikit-learn tiene implementado un clasificador multicapa en el cual solo será necesario ajustar una serie de hiper-parámetros para poder entrenarlo en base a los datos de las bombillas. De manera análoga al árbol de decisión, se introducirán los armónicos como datos de entrada mientras que la salida será el tipo de bombilla, uno, dos o tres. Algunos de los hiper-parámetros a ajustar son:

- **Hidden\_layer\_sizes.** Tamaño de las capas ocultas. Se deben de indicar tanto el número de capas ocultas como el número de perceptrones por capa.
- **Solver.** El optimizador es aquel que ajusta el valor de los pesos. Scikit-learn admite tres optimizadores distintos: el gradiente descendente estocástico ('sgd'), lbfgs, un método quasi-newtown indicado para datasets de pequeño tamaño, y Adam, el más indicado para grandes datasets (>1000 datos),
- **Alpha.**  $\alpha$  es un coeficiente que ajusta el peso de la regularización L2 de la función de pérdida- aquella que mide qué tan bien se comportan los pesos calculados con respecto al óptimo. El valor por defecto de  $\alpha$  en Scikit-learn es de 0.0001, y en general se debe mantener en ese rango para asegurar la convergencia del entrenamiento.
- **Batch-side.** El batch define la manera de computar el gradiente descendente: de manera única, recorriendo el set de datos completo, o dividiendo el volumen total de datos para computar solo una parte cada vez. Por defecto, Scikit-learn ajustará el tamaño del batch que sea más adecuado para el volumen de datos disponible.
- **Max\_iter.** Número máximo de iteraciones del optimizador hasta la convergencia.

En la tabla 17 se muestran algunas de las pruebas realizadas a la hora de elegir modelo. El hiper-parámetro Batch-side no se incluye ya que se ha considerado desde el principio que Scikit-learn calcula de forma adecuada el tamaño del batch. De igual forma, 200 se ha visto un número máximo de iteraciones adecuado para las capacidades del ordenador utilizado.

Tabla 17. Precisión alcanzada por varios clasificadores multicapa

Modelo	Nº capas ocultas	Nº perceptrones/capa oculta	Solver	$\alpha$	Precisión
1	10	3	Adam	1e-5	99.653431
2	5	3	Adam	1e-5	82.346023
3	5	6	Adam	1e-5	99.91831
4	3	6	Adam	1e-5	99.79591
5	3	3	lbfgs	1e-5	33.551020
6	3	6	lbfgs	1e-5	33.551020
7	5	6	lbfgs	1e-5	85.979591
8	5	6	sgd	1e-5	33.265306
9	10	6	sgd	1e-5	33.551020

<b>10</b>	45	20	sgd	1e-5	33.265306
<b>11</b>	3	6	Adam	1e-4	100
<b>12</b>	3	6	Adam	1e-3	100

Como se puede ver en la tabla, el mejor optimizador con diferencia es el Adam, tal como era esperable para el volumen de datos de entrada. El optimizador lbfgs obtiene peores resultados, pero es capaz de clasificar si se le dota de una profundidad suficiente a la red. Sin embargo, el gradiente estocástico descendiente no ha sido capaz de clasificar correctamente en ninguna de las ejecuciones. Por otro lado, el factor  $\alpha$ , aunque no parece afectar a la precisión, sí que afecta a la capacidad del optimizador de converger. En los casos en los que se ha aumentado su valor, el optimizador llegaba con mayor frecuencia al número máximo de iteraciones sin converger. Estos casos se han indicado en la tabla 17 con un sombreado azul.

Observando la tabla 17 se observa como los valores de precisión alcanzados son o bien cercanos al 33%, o bien cercanos al 100%. Si se observa la matriz de confusión, se comprueba que en aquellos casos donde la precisión es cercana al 33% la red predice siempre la misma clase, en concreto en la mayoría de los casos se predice la clase 3 debido a que es la clase que cuenta con un número ligeramente mayor de casos (416 frente a los 398 de la clase 2 o los 412 de la clase 1) En el resto de los casos, sí se distinguen con mayor o menor precisión 3 clases distintas. En la figura 72 se muestran tres ejemplos, siendo el primero un caso donde la red neuronal no distingue las clases, un segundo caso donde de distinguen las clases, pero aún existe cierta confusión en algunos de los casos entre dos de ellas, y un tercer caso donde la precisión alcanzada es del 100%.

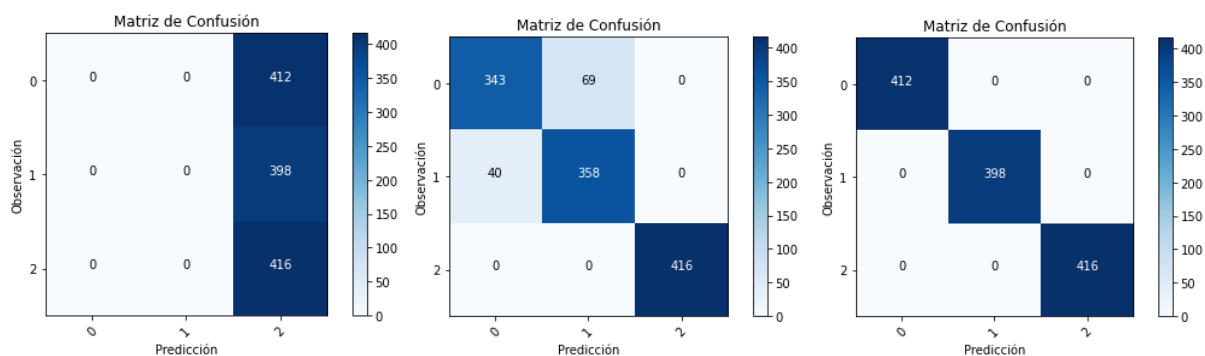


Figura 72. Predicción errónea(izq.), predicción adecuada (centro) y predicción con un 100% de precisión (dcha.)

Finalmente, se ha elegido como el más adecuado el modelo 3 de la tabla 17, por ser el que mayor precisión obtiene a la vez que una mayor convergencia del optimizador.

## 6.4. Clasificación a tiempo real.

### 6.4.1. Python API

Las partes necesarias para llevar a cabo la clasificación a tiempo real son:

- **El Modelo preentrenado.**

Una vez preentrenados los modelos, estos se guardan en un archivo .joblib con el comando *dump* de la librería joblib. Para volverlos a cargar simplemente se ejecuta el comando *load* de la misma librería (figura 73).

```
from joblib import dump, load
dump(model, 'trained_model2.joblib')
```

Figura 73. Guardado de uno de los modelos preentrenados

- **Datos de referencia.** Una vez indicada la predicción, será necesario saber si la predicción es correcta o no. Aunque en este caso se puede conocer a simple vista la bombilla colocada, se han incluido en el código los datos de ejemplo calculados en el apartado 5.1. *Recolección y preprocesado de los datos* con el fin de comparar los armónicos medidos con una referencia.
- **Acceso a los datos en tiempo real.** Para ello se recurre a la API de Python. La API define los siguientes objetos necesarios para realizar la consulta:
  - o **Base de datos.** Se define la base de datos a la que se va a acceder a través de su url y un token de seguridad
  - o **Consulta.** En concreto, se realizan tres consultas a la base de datos, una por cada fase, de forma que cada una devuelve el valor de los 50 armónicos en dicha fase. En cada consulta se leen todos los datos entrantes en los últimos 30 segundos. Posteriormente en el código, se eliminan todos los datos menos el más reciente. De esta forma se asegura que se ha recibido al menos un dato durante ese periodo de tiempo.
- **Bucle de ejecución.** Se recurre para ello a la librería time, que permite ejecutar el código cada un tiempo determinado. En el bucle se realizan las siguientes acciones:
  - o **Consultar a la base.** Se ejecuta el comando query\_api con las consultas ya creadas
  - o **Ajustar los datos** al tipo de dato y formato necesario para el modelo. En concreto, el árbol de decisión necesita como entrada un dataframe, mientras que la red neuronal tiene como entrada un array.
  - o **Ejecutar el modelo.** En este paso se realiza la predicción en sí
  - o **Mostrar los resultados.** Se imprime tanto una gráfica comparativa con los datos de entrada y los datos de referencia como una matriz de confusión que crece a cada ejecución.

#### 6.4.2. Resultados

Se han realizado una serie de ejecuciones con el modelo a tiempo real. En general, el modelo es capaz de clasificar correctamente los armónicos de entrada y distinguir a que bombilla pertenecen. En la figura 74 se muestra un ejemplo donde las tres bombillas se clasificaron con éxito. En cada gráfica se muestra en azul la referencia, es decir, los armónicos medios de la bombilla colocada; en verde, la predicción, es decir, los armónicos medios de la bombilla con la que el modelo identifica la entrada; y finalmente, en un tercer color, los datos de entrada. Al clasificarse correctamente, los datos predichos y los datos de referencia coinciden. Se observa en la imagen cómo el algoritmo es capaz de identificar correctamente cada caso aun cuando los valores de entrada muestran considerables diferencias con los valores de referencia.

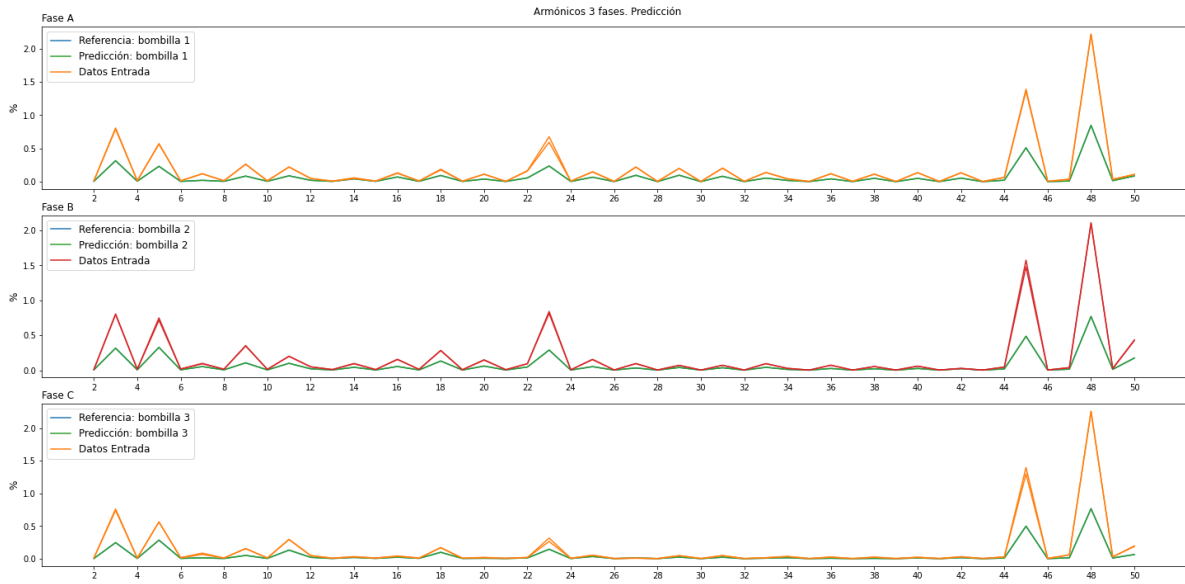


Figura 74. Correcta clasificación a tiempo real de las tres bombillas

Si las cargas se colocan en distintas fases, la clasificación también se realiza correctamente (figura 75):

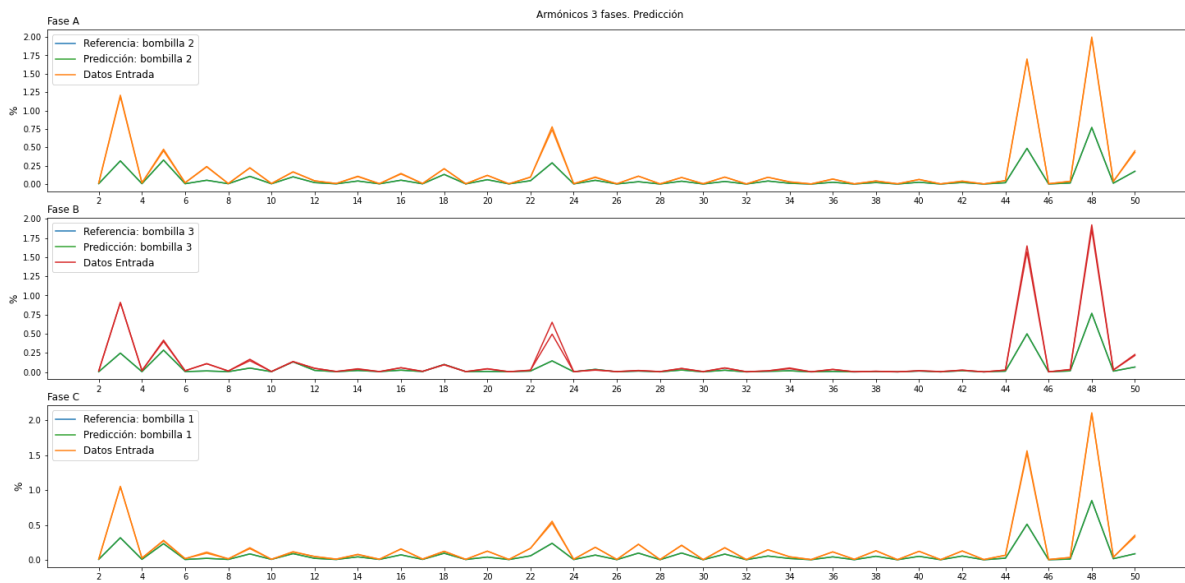


Figura 75. Clasificación de las tres bombillas, cambiadas de fase

En cambio, si las tres fases se dejan desconectadas, o se coloca una carga distinta a las tres caracterizadas, el algoritmo será incapaz de indicar este supuesto, ya que no se incluyó en los datos de entrenamiento. En la figura 76 se muestra un caso donde no hay ninguna carga. Los armónicos de tensión medidos ahora son mucho menores que los que producen las cargas (en la imagen, los datos de referencia). El algoritmo no tiene más remedio que devolver una de las tres clases como resultado.

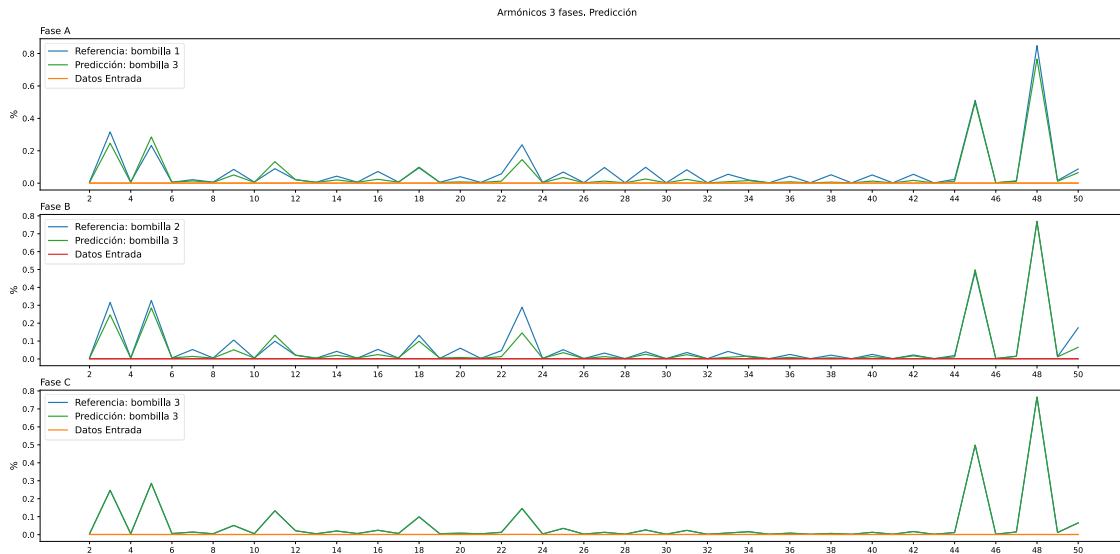


Figura 76. Clasificación errónea de la red sin cargas

En uno de los ensayos, se colocaron las tres bombillas en orden 2-3-1. Después de una serie de ejecuciones, se intercambió el orden de estas a 1-2-3. Observando en la figura 77 la matriz de confusión generada durante el ensayo se ve como la red neuronal detecta desde el principio el orden correcto, y responde de manera correcta las 8 veces que se ejecuta el código durante el primer estado de las bombillas (matrices superior izq. y superior dcha.). Al desconectar la red para realizar el cambio, el algoritmo da un resultado aleatorio ya que no hay nada conectado – en este caso, se indica en los tres casos la bombilla 2 (matriz superior dcha.). Finalmente, el analizador registra las medidas de las bombillas en el nuevo orden, y el algoritmo empieza a registrar estos valores, como se indica en las matrices de la fila inferior de la figura 77.

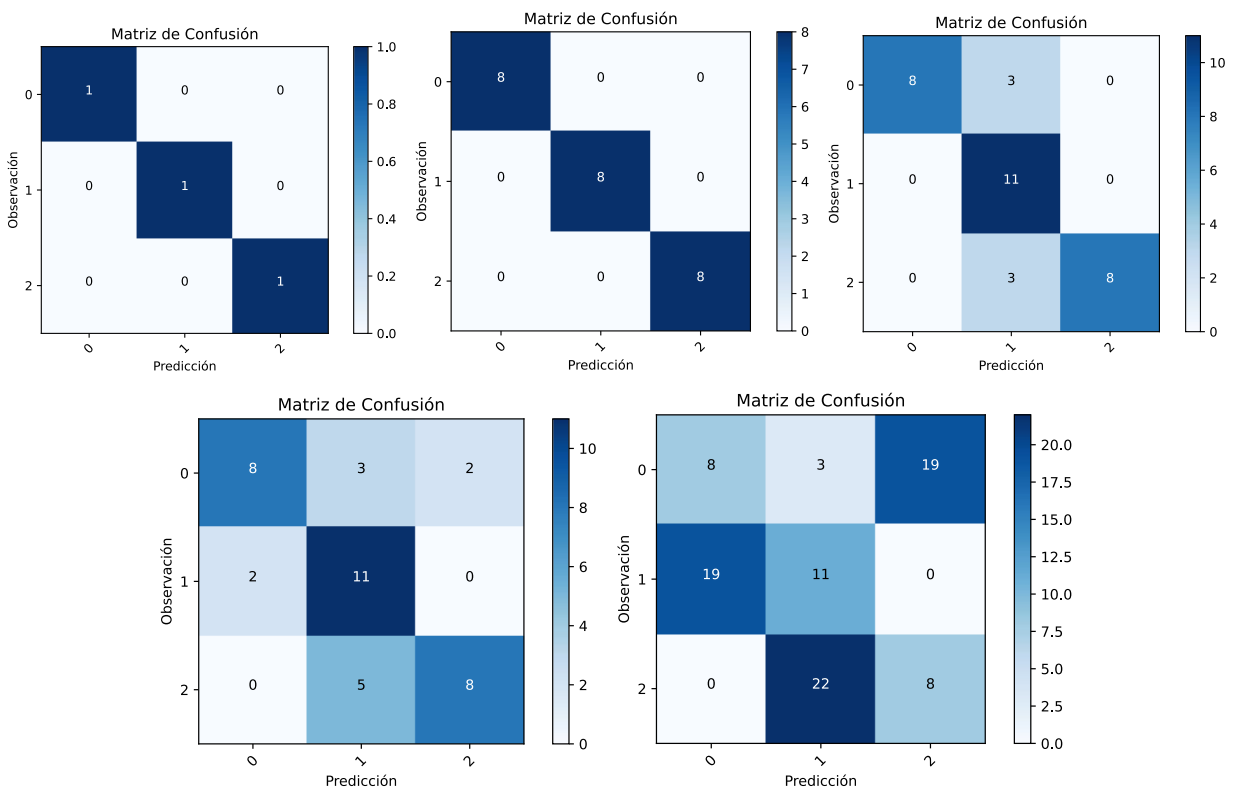


Figura 77. Matrices de confusión a lo largo de un ensayo

En general, al tratarse los armónicos de tensión de una magnitud relativamente constante en el tiempo, la respuesta del algoritmo a ejecuciones constantes no varía. Es decir, una vez detectado la carga, en muy raras ocasiones se producían errores esporádicos en la detección. Sin embargo, si se notó que los modelos producen mayor error al principio de la ejecución, cuando las bombillas están frías. En la figura 78 se muestra un



ejemplo donde se arrancaron las bombillas desde un estado frío. Al principio, solo una de las tres se detecta correctamente. En la segunda ejecución, el algoritmo es capaz de corregir el resultado de una más de las bombillas, pero sigue quedando una tercera que no se detecta bien. Al cabo de 50 ejecuciones - unos 10 min – la tercera bombilla es detectada correctamente. En los tres casos, una vez que los armónicos se estabilizaron, el algoritmo no vuelve a equivocarse con el resultado.

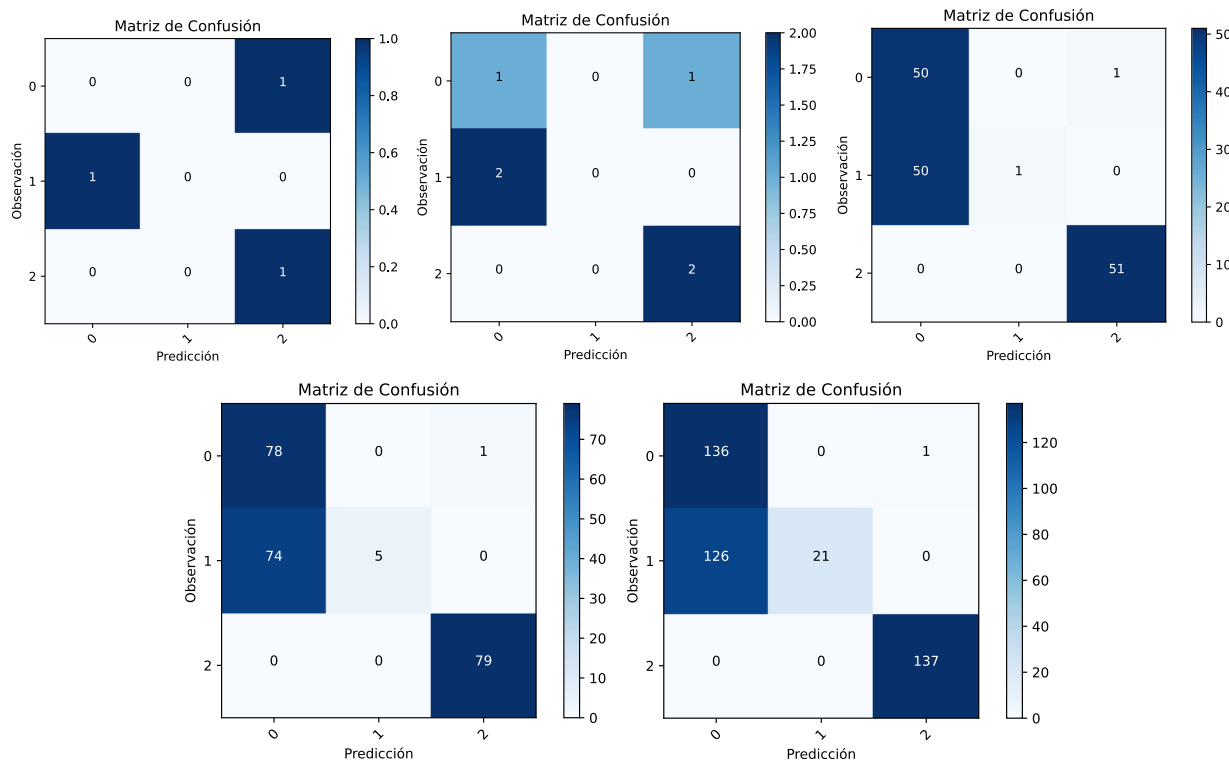


Figura 78. Matrices de confusión al pasar de estar las bombillas frías a calientes

De las tres bombillas, es la segunda la que tarda alrededor de 10 minutos en clasificarse. En las figuras 79 y 80 se muestra los armónicos correspondientes a la segunda ejecución y a la última del ensayo descrito. Observando las medidas se puede ver como efectivamente es en la segunda bombilla donde existe una mayor diferencia de valor en los armónicos.

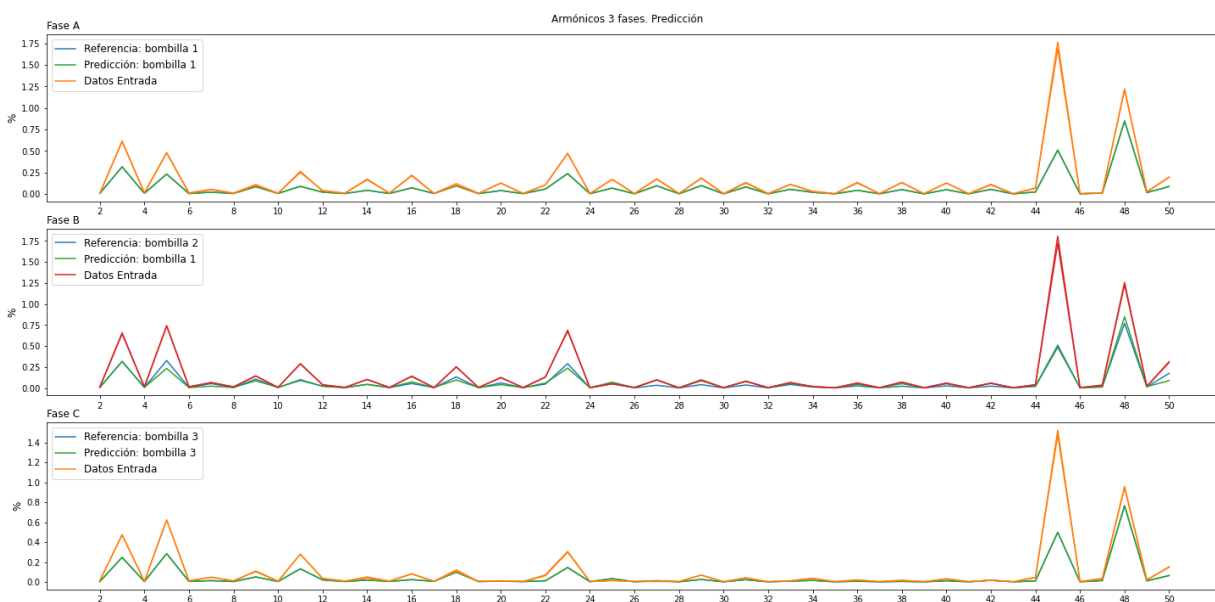


Figura 79. Armónicos registrados con las bombillas frías

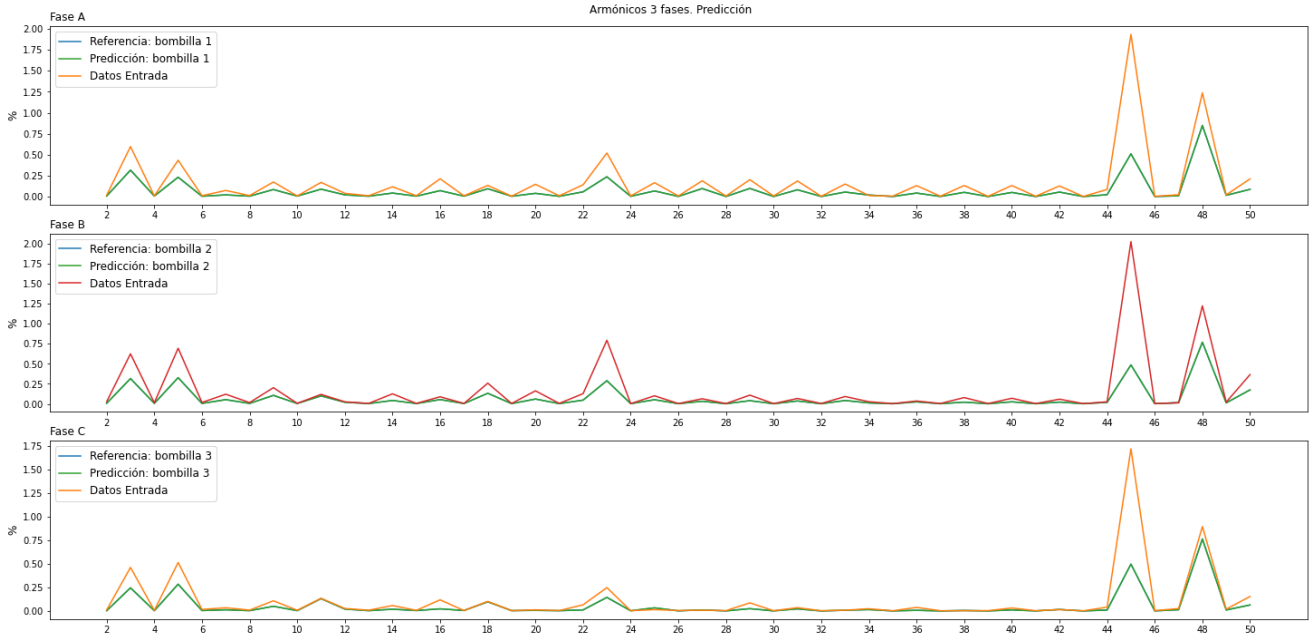


Figura 80. Armónicos registrados al cabo de 10 minutos de funcionamiento

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En conclusión, el trabajo realizado en este TFM supone un aporte a la situación actual en redes de baja tensión donde los generadores FV proliferan, y donde cada vez más se incluyen cargas sensibles (como material electrónico, equipos médicos, etc.) cercanas a fuentes de generación renovables que pueden empeorar la calidad de la señal. Se ha diseñado una infraestructura de monitorización y almacenamiento de datos óptima para su uso en redes de distribución, a la vez que se ha conocido la filosofía de los dispositivos de medición PQM y  $\mu$ PMU. Asimismo, se ha aplicado con éxito dicha plataforma a un caso práctico donde se detecta la carga colocada en cada una de las fases gracias a modelos predictivos basados en Machine Learning. El trabajo desarrollado en este TFM sirve además como referencia y resumen del estado del arte de la monitorización en redes de distribución para futuros trabajos.

La infraestructura cumple con creces los objetivos y requerimientos marcados. Es capaz de absorber las medidas de tanto el analizador de calidad como del sincrofasor, a tiempo real y con una tasa de fallos nula. El sincronismo entre medidas, especialmente entre equipos de distinta naturaleza resulta asombroso sobre todo si se tiene en cuenta las altas tasas de muestreo con las que se trabaja. A lo largo del trabajo no se ha observado en ningún momento la pérdida de datos o la pérdida de sincronismo de estos, lo que habla de la robustez conseguida. El gestor de bases de datos InfluxDB ha resultado ser la pieza fundamental de gran parte del trabajo. Su sencillez, su cómoda interfaz y sobre todo su gran capacidad de integración con herramientas externas tanto de ingesta de datos como de lectura han facilitado en numerosas ocasiones el trasiego de los datos. Aunque se ha echado en falta un enlace directo con Matlab, la API disponible en Python ha permitido realizar la predicción a tiempo real que se quería. El agente Telegraf, parte también del ecosistema desarrollado por InfluxData, comparte las mismas cualidades que el gestor de bases de datos. En cuanto al concentrador de datos fasoriales PDC, conviene resaltar su robustez, pero no tanto su sencillez o manejabilidad, puesto que la documentación disponible es escasa y esto complicó en primera instancia su conexión con el gestor de bases de datos externo.

Por su parte los analizadores de calidad de suministro trabajados, en concreto el modelo PQube3, han resultado ser equipos con grandes cualidades, pero también con considerables inconvenientes. La enorme cantidad de información que proporcionan y la calidad de estas medidas – indicada en las características del analizador, pero también comprobada a lo largo de este trabajo- es de un valor indiscutible. Sin embargo, la falta de un protocolo de comunicaciones más amigable con el trabajo a tiempo real condiciona la accesibilidad a esta información, que se encuentra aprisionada en la memoria interna del dispositivo. Aunque para este trabajo, y para gran parte de las aplicaciones es suficiente un muestreo cada segundo a través del protocolo Modbus, es una lástima no aprovechar el potencial de estos aparatos que cuentan con un muestreo real de 512 muestras por ciclo. Sin duda sería interesante trabajar con un analizador de calidad que permita integrar toda esa información en una plataforma genérica como la aquí desarrollada. Esto se ha hecho muy patente por ejemplo a la hora de querer visualizar la forma de onda. Los 32 valores por ciclo almacenados por el analizador han permitido visualizar casos en los que existen deformaciones notables, pero resultan escasos si se pretende realizar un análisis.

El otro equipo aquí trabajado, la unidad de medición fasorial o  $\mu$ PMU, cuenta de igual manera con sus propias ventajas e inconvenientes. La mayor ventaja sin duda vuelve a ser su altísima precisión y la calidad de sus medidas. Este equipo además sí que cuenta con un protocolo estándar para el envío de datos a plataformas genéricas externas al fabricante, aun cuando se necesite forzosamente un concentrador de datos fasoriales si se quiere obtener la máxima robustez. La principal desventaja de estos equipos reside en la naturaleza de sus medidas. Los fasores de tensión y corriente son medidas poco intuitivas, que tienen una serie de aplicaciones concretas, pero que aportan poca información cuando se quieren realizar análisis de una red de distribución. Por ejemplo, el mismo trabajo que se ha realizado aquí clasificando tres cargas en base al ruido en los armónicos generados, se podría haber realizado comparando los patrones de frecuencia, fasores y ROCOF recogidos por la  $\mu$ PMU. Sin embargo, esto no se ha hecho dado que la relación entre la deformación de la forma de onda y las medidas fasoriales resulta demasiado compleja.

En conjunto, sería ideal contar con un equipo de calidad de suministro capaz de calcular la información disponible localmente en el equipo PQube3, y enviarla a través de un protocolo similar al IEE C37.118.2 disponible en la  $\mu$ PMU. En ese caso, el volumen de datos disponible sería inmenso, pero dependería del usuario buscar la estrategia para almacenar selectivamente las medidas requeridas.

El trabajo aquí desarrollado tiene multitud de caminos a seguir de cara al futuro. Un primer paso sería comprobar empíricamente los límites de la infraestructura desarrollada. A lo largo de este trabajo se han realizado multitud de ensayos y pruebas de concepto, pero por diversos motivos no se han podido colocar más de dos equipos de forma simultánea. Sería necesario comprobar hasta qué número de equipos se pueden conectar de forma simultánea a un mismo gestor de datos. De igual forma, el algoritmo desarrollado apenas consulta 150 medidas cada 15 segundos. Un estudio de la velocidad de respuesta por parte de la base de datos sería necesario para conocer los límites de creación del modelo, y por tanto la verdadera capacidad de crear un gemelo digital con esta herramienta. Otras pruebas como la integración de equipos de distinta naturaleza o nuevas herramientas de análisis y monitorización quedarían igualmente como trabajo futuro.

Por otro lado, sería interesante poner en práctica el trabajo realizado en un entorno real, o al menos con una simulación más cercana a la realidad de lo que es una red de distribución, donde se coloquen varios analizadores de calidad en puntos distantes y se pueda estudiar con más detalle el sincronismo entre ellos, cómo se propagan las perturbaciones a través de la red y cómo quedan registradas en la plataforma. Por otro lado, con una red de distribución real podría aplicarse lo aprendido al entrenar los modelos clasificatorios para caracterizar su estado habitual, y detectar cualquier desviación fuera de ella. El caracterizar la red a través de los datos registrados por los analizadores sería equivalente a tener un gemelo digital de la red, lo que abre el camino a multitud de aplicaciones, desde predicción (p.e. predecir el consumo en los próximos días), clasificación y detección de fallos (p.e., detectar fallos en la red según las medidas se desvíen del habitual), o incluso control y actuación (p.e. respondiendo conectando o desconectando cargas tras detectar un fallo en el sistema).

## REFERENCIAS

- [1] J. Mírez, «Redes de distribución», 2012.
- [2] M. F. Akorede, H. Hizam, y E. Pouresmaeil, «Distributed energy resources and benefits to the environment», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n.º 2, pp. 724-734, feb. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2009.10.025.
- [3] A. E. Saldaña-González, A. Sumper, M. Aragués-Peñalba, y M. Smolnikar, «Advanced Distribution Measurement Technologies and Data Applications for Smart Grids: A Review», *Energies 2020, Vol. 13, Page 3730*, vol. 13, n.º 14, p. 3730, jul. 2020, doi: 10.3390/EN13143730.
- [4] «IEEE Std C37.2™-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996) IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations». <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4639522&tag=1> (accedido sep. 21, 2022).
- [5] G. Artale *et al.*, «Real-Time Power Flow Monitoring and Control System for Microgrids Integration in Islanded Scenarios», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 55, n.º 6, pp. 7186-7197, nov. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2932967.
- [6] «Application Notes - Help Center». <https://help.powerside.com/knowledge/application-notes> (accedido sep. 21, 2022).
- [7] J. Kim, M. E. Baran, y G. C. Lampley, «Estimation of fault location on distribution feeders using PQ monitoring data», *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*, 2007, doi: 10.1109/PES.2007.385635.
- [8] G. Selvaraj, V. Thangaiyan, y K. Rajangam, «Numerical method for islanding the location of ground fault in the material based distribution system», *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 634-639, ene. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.02.723.
- [9] A. A. Rahim, M. F. Hashim, y M. F. Mohd Siam, «Dynamic load modelling based on power quality recorder data», *Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2013*, pp. 119-123, 2013, doi: 10.1109/PEOCO.2013.6564527.
- [10] M. Leinakse, P. Tani, y J. Kilter, «Impact of Distributed Generation on Estimation of Exponential Load Models», *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2019-August, ago. 2019, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8974014.
- [11] D. Błaszczok, T. Trawiński, M. Szczygieł, y M. Rybarz, «Forecasting of Reactive Power Consumption with the Use of Artificial Neural Networks», *Electronics 2022, Vol. 11, Page 2005*, vol. 11, n.º 13, p. 2005, jun. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11132005.
- [12] J. Yu *et al.*, «Optimal placement of power quality monitors in complex distribution network based on topological degradation», *Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2019*, pp. 58-61, jun. 2019, doi: 10.1109/ICIEA.2019.8834084.
- [13] H. M. G. C. Branco, M. Oleskovicz, D. v. Coury, y A. C. B. Delbem, «Multiobjective optimization for power quality monitoring allocation considering voltage sags in distribution systems», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 97, pp. 1-10, abr. 2018, doi: 10.1016/J.IJEPES.2017.10.011.
- [14] M. R. Sheibani, A. Ketabi, y S. M. Nosratabadi, «Optimal power quality meters placement with consideration of single line and meter loss contingencies», *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, vol. 1, n.º 2, pp. 81-89, sep. 2018, doi: 10.22111/IECO.2018.25226.1043.
- [15] «IEEE Std 1159.3-2019 (Revision of IEEE Std 1159.3-2003): IEEE Recommended Practice for Power Quality Data Interchange Format (PQDIF)», 2019.

- [16] D. D. Sabin, «An assessment of distribution system power quality. Statistical Summary Report, Volume 2». may 01, 1996.
- [17] «Browse Standards Dictionary | IEEE Xplore». [https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/dictionary?queryText=phasor%20measurement%20unit%20\(PMU\)](https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/dictionary?queryText=phasor%20measurement%20unit%20(PMU)) (accedido sep. 21, 2022).
- [18] C. Lozano, S. RAMÍREZ, F. C.-E. H. y la Máquina, y undefined 2012, «Unidades de medición fasorial (PMU)», *redalyc.org*, Accedido: sep. 21, 2022. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47823946008.pdf>
- [19] E. Dusabimana y S. G. Yoon, «A survey on the micro-phasor measurement unit in distribution networks», *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, n.º 2, feb. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9020305.
- [20] E. Dusabimana y S. G. Yoon, «A Survey on the Micro-Phasor Measurement Unit in Distribution Networks», *Electronics 2020, Vol. 9, Page 305*, vol. 9, n.º 2, p. 305, feb. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9020305.
- [21] A. Jain y S. Bhullar, «Micro-phasor measurement units ( $\mu$ PMUs) and its applications in smart distribution systems», *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 487, pp. 81-92, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-8249-8\_7/COVER.
- [22] O. Ardakanian *et al.*, «On identification of distribution grids», *IEEE Trans Control Netw Syst*, vol. 6, n.º 3, pp. 950-960, sep. 2019, doi: 10.1109/TCNS.2019.2891002.
- [23] M. Pignati, L. Zanni, P. Romano, R. Cherkaoui, y M. Paolone, «Fault Detection and Faulted Line Identification in Active Distribution Networks Using Synchrophasors-Based Real-Time State Estimation», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, n.º 1, pp. 381-392, feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2545923.
- [24] Y. Zhou, R. Arghandeh, I. Konstantakopoulos, S. Abdullah, A. von Meier, y C. J. Spanos, «Abnormal event detection with high resolution micro-PMU data», *19th Power Systems Computation Conference, PSCC 2016*, ago. 2016, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540980.
- [25] J. Lee, «Automatic Fault Location on Distribution Networks Using Synchronized Voltage Phasor Measurement Units», *American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) POWER*, vol. 2, nov. 2014, doi: 10.1115/POWER2014-32231.
- [26] X. Chen, K. J. Tseng, y G. Amaratunga, «State estimation for distribution systems using micro-synchrophasors», *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, vol. 2016-January, ene. 2016, doi: 10.1109/APPEEC.2015.7381051.
- [27] M. Farajollahi, A. Shahsavari, y H. Mohsenian-Rad, «Tracking State Estimation in Distribution Networks Using Distribution-level Synchrophasor Data», *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2018-August, dic. 2018, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586273.
- [28] G. Cavraro, R. Arghandeh, K. Poolla, y A. von Meier, «Data-Driven Approach for Distribution Network Topology Detection», 2015.
- [29] M. H. F. Wen, R. Arghandehy, A. von Meier, K. Poollay, y V. O. K. Li, «Phase identification in distribution networks with micro-synchrophasors», *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2015-September, sep. 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286066.
- [30] M. G. M. Zanjani, K. Mazlumi, y I. Kamwa, «Application of  $\mu$ PMUs for adaptive protection of overcurrent relays in microgrids», *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, n.º 18, pp. 4061-4068, oct. 2018, doi: 10.1049/IET-GTD.2018.5898.
- [31] M. S. Elbana, N. Abbasy, A. Meghed, y N. Shaker, « $\mu$ PMU-based smart adaptive protection scheme for microgrids», *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, n.º 4, pp. 887-898, jul. 2019, doi: 10.1007/S40565-019-0533-6.
- [32] «Homepage - Powerside». <https://powerside.com/> (accedido sep. 21, 2022).
- [33] «PQube 3 Modbus Reference Manual PQube 3 Modbus Interface Reference manual Revision 1.11». [En línea]. Available: [http://modbus.org/docs/PI\\_MBUS\\_300.pdf](http://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf)

- [34] «microPMU Quickstart Kit First Steps». <https://help.powerside.com/knowledge/micropmu-first-steps> (accedido oct. 01, 2022).
- [35] E. O. Schweitzer, D. Whitehead, G. Zweigle, y K. G. Ravikumar, «Synchrophasor-based power system protection and control applications», *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2010, doi: 10.1109/CPRE.2010.5469481.
- [36] A. von Meier, D. Culler, A. McEachern, y R. Arghandeh, «Micro-synchrophasors for distribution systems», *2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014*, 2014, doi: 10.1109/ISGT.2014.6816509.
- [37] N. Constandache, D. M. Stanescu, M. Sanduleac, C. Stanescu, I. Tristiu, y A. Mandis, «Smart meters, PMU and PQ data analysis in active distribution grids - Case studies in MV networks», *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2018 - Proceedings*, nov. 2018, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551426.
- [38] G. Barchi, D. Macli, y D. Petri, «Synchrophasor estimators accuracy: A comparative analysis», *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 62, n.º 5, pp. 963-973, 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2236776.
- [39] «Database trends: The rise of the time-series database | VentureBeat». <https://venturebeat.com/business/database-trends-the-rise-of-the-time-series-database/> (accedido sep. 21, 2022).
- [40] «GitHub - GridProtectionAlliance/openPDC: Open Source Phasor Data Concentrator». <https://github.com/GridProtectionAlliance/openPDC> (accedido sep. 21, 2022).
- [41] J. Zuo, J. Tang, H. Guo, D. Hu, K. Zhang, y M. Xiang, «Low-frequency oscillation mode identification with openPDC platform», *2019 6th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2019*, pp. 223-227, nov. 2019, doi: 10.1109/ICSAI48974.2019.9010190.
- [42] «DB-Engines Ranking - popularity ranking of time Series DBMS». <https://db-engines.com/en/ranking/time+series+dbms> (accedido sep. 21, 2022).
- [43] «telegraf/README.md at release-1.21 · influxdata/telegraf · GitHub». <https://github.com/influxdata/telegraf/blob/release-1.21/plugins/inputs/modbus/README.md> (accedido sep. 21, 2022).
- [44] «InfluxData · GitHub». <https://github.com/influxdata> (accedido nov. 23, 2022).
- [45] E. Gutiérrez Ballesteros, A. Gil De Castro, y V. Pallarés López, «PLATAFORMA Y ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LÁMPARAS LED FRENTE A VARIACIONES DE TENSIÓN», Universidad de Córdoba, 2018.
- [46] J. Ceular Matabuena, V. Pallarés López, y R. J. Real Calvo, «PROTOCOLO PARA ENSAYOS Y EVALUACIÓN DE UNIDADES DE MEDICIÓN FASORIAL (PMU)». jul. 2022.
- [47] A. Gil-De-Castro, R. Medina-Gracia, S. K. Ronnberg, A. M. Blanco, y J. Meyer, «Differences in the performance between CFL and LED lamps under different voltage distortions», *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1-6, jun. 2018, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378918.
- [48] E. G. Ballesteros, A. Gil, y D. E. Castro, «Análisis de la temperatura y la distorsión de la tensión en lámparas LED», 2022, Accedido: sep. 21, 2022. [En línea]. Available: <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/22458>
- [49] «Scikit-learn. Machine Learning with Python», sep. 25, 2022. <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (accedido sep. 21, 2022).





## GLOSARIO

---

ADC: Analog-Digital Converter, conconvertor de analógico a digital

API: Application Programming Interface, interfaz de programación de aplicaciones

CT: Current transform, transductor de corriente

DER: Distributed Energy Resources, fuentes de generación distribuidas

FV: Fotovoltaica

GPS: Global Positioning System, sistema de posicionamiento global

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

ISO: International Organization for Standardization

NTP: Network Time Protocol

PDC: Phasor Data Concentrator, concentrador de datos fasoriales

PMU: Phasor Measurements Unit, Unidad de medición fasorial

PQM: Power Quality Measurement, Medidor de calidad de suministro

PT: Power transform, transductor de potencia

ROCOF: Rate of Change of Frequency

UNE: Una Norma Española

$\mu$ PMU: micro-PMU

UPS: Uninterruptible Power Supply, sistema de alimentación ininterrumpida