

Proyecto “Quantum Power: quantum traceability for AC power standards”

L. Matías⁽¹⁾, D. Peral⁽¹⁾, J. Díaz de Aguilar⁽¹⁾, M.L. Romero⁽¹⁾

⁽¹⁾Centro Español de Metrología (CEM). C/ Alfar, 2, 28760 Tres Cantos (Madrid)
 Laura Matías ⁽¹⁾, Telf. 91 807 42 41 Imatias@cem.es

RESUMEN: El objetivo del proyecto es trazar las medidas de Potencia y Energía a patrones cuánticos de potencia (QPS). Actualmente la trazabilidad a las medidas de potencia eléctrica se obtiene a través de una cadena de calibraciones que utilizan convertidores térmicos, shunts de corriente y digitalizadores y que solo unos pocos Institutos Nacionales de Metrología (INM) en Europa pueden proporcionar con incertidumbres cercanas a unas pocas partes en 10^6 .

Los patrones de tensión Josephson programables (PJVS), disponibles en muchos INM, no se utilizan habitualmente en medidas de potencia debido a la complejidad de su integración. El esfuerzo coordinado que se está realizando en el proyecto Quantum Power facilitará su aplicación, ya que un único INM no puede acometer todo el desarrollo que supone. Esto dotará a los INM de las mejores capacidades de medida y calibración (CMCs) con trazabilidad directa a la nueva definición del amperio en el SI.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Patrones de Potencia y Energía

Los patrones actuales de Potencia y Energía de la mayoría de los INM están basados en el **muestreo digital** de señales de tensión y corriente. Las señales primarias son reconstruidas a través de los algoritmos apropiados. De estas se obtienen las medidas de potencia y energía, tanto a la frecuencia fundamental como a la de sus armónicos, así como parámetros de calidad de red. Esto es posible gracias al progreso alcanzado en el desarrollo de los convertidores analógico-digitales (ADC), y de sus características de exactitud y frecuencia de muestreo.

El proceso consta de tres fases: Adaptación, Muestreo y Procesamiento.

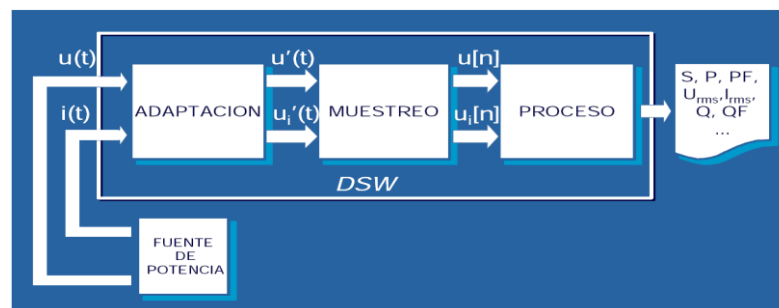


Fig. 1. Fases del sistema de medida por muestreo digital (SMMD)

La adaptación consiste en convertir las señales de intensidad de corriente, $i(t)$, y tensión $u(t)$, a tensiones adaptadas a los convertidores (ADC), $u_i'(t)$ y $u'(t)$, para que estos puedan muestrear en su rango óptimo de medida. Se realiza mediante los siguientes **adaptadores**:

Adaptación para $u(t)$: divisores resistivos de tensión (**RVDs**). La tensión de salida es $u'(t) = 0,8 V$.

Adaptación para $i(t)$: Se utilizan los **shunts** de corriente. La salida también es $u_i'(t) = 0,8 V$.

Desventaja: la trazabilidad de este sistema corresponde a la de los adaptadores y los convertidores (ADC) y supone una larga cadena de medidas desde los patrones cuánticos en corriente continua (DC) Josephson y Hall. Esto dificulta bajar las incertidumbres, que sólo es posible con mucho esfuerzo.

El muestreo es realizado por los convertidores (ADC), que en muchos casos están incorporados en multímetros (DMMs). Toman muestras de las señales adaptadas $u'(t)$ y $u_i'(t)$ en los tiempos correspondientes a la frecuencia de muestreo. Se produce una conversión analógico-digital (CAD), por lo que se dice que estos instrumentos son digitalizadores.

Finalmente se procede al procesamiento de los datos de acuerdo al método elegido. Es una tarea meramente matemática.

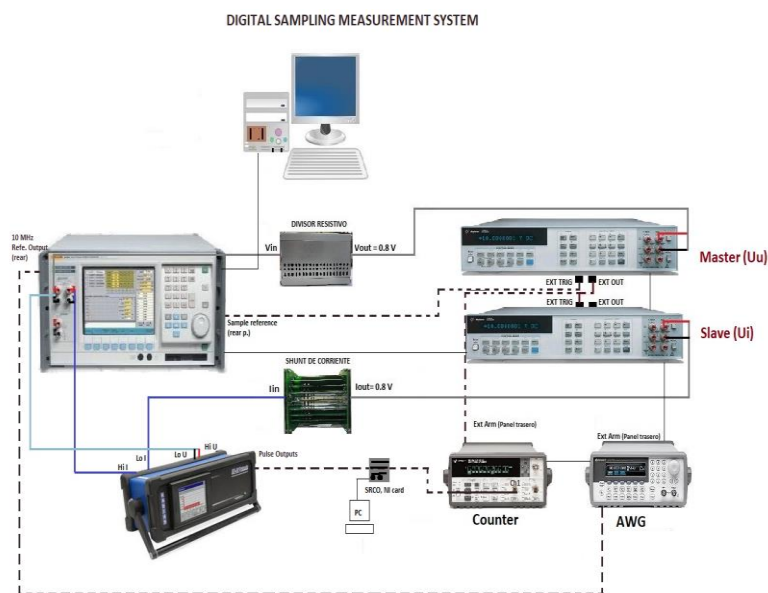


Fig. 2. SMMD en el CEM

1.2 El patrón cuántico de tensión Josephson

Cuando una unión Josephson (dos superconductores débilmente acoplados) es irradiada con microondas, se crean entre los superconductores niveles discretos de tensión (escalones de tensión constante), que dependen solo de la relación entre dos constantes fundamentales (e y h) y de la frecuencia f de las microondas. Con la redefinición del SI, h y e tienen valores exactos por definición, por lo que la tensión es realizada de manera directa a la definición del SI.

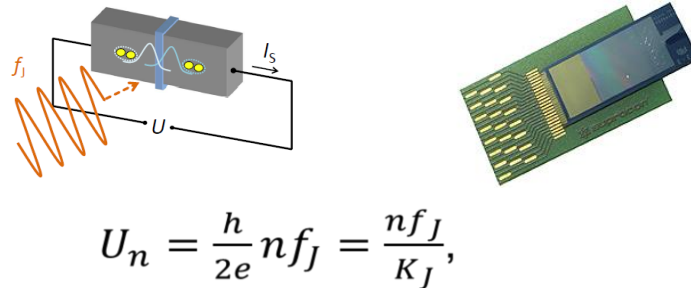
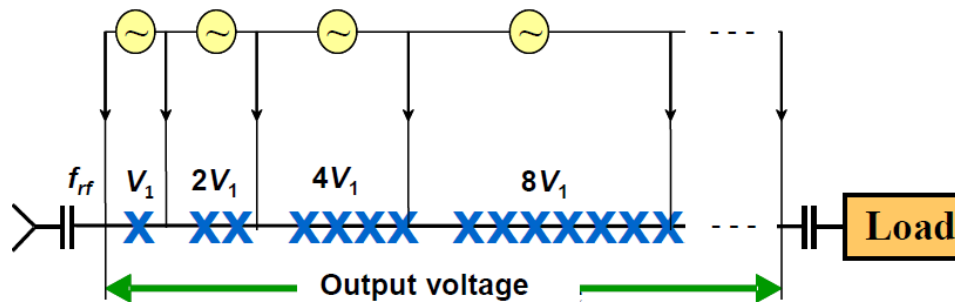


Fig. 3. El efecto Josephson

Con $n = (1, 2, \dots)$ El efecto Josephson ha sido utilizado como patrón de Tensión DC durante más de 30 años. La tensión en corriente alterna (AC) ha estado relacionada con los valores en DC por técnicas de transferencia principalmente basadas en convertidores térmicos, que son capaces de ofrecer la exactitud necesaria, pero están limitados a dar solo el valor eficaz. La industria y la ciencia necesitan información sobre la fase y el contenido en armónicos.

El patrón de tensión Josephson programable (*Programmable Josephson voltage Standard* o PJVS), uno de los patrones cuánticos más utilizados por los INM, consiste en un *array* Josephson en serie, en el que el número de uniones sigue una secuencia binaria, de tal modo que se pueden escoger tensiones en DC o formas de onda aproximadas paso a paso. Este *array* se emplea como un convertidor analógico-digital multi-bit.



C. A. Hamilton et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 44 (1995) 223

Fig. 4. El efecto Josephson: polarización del array

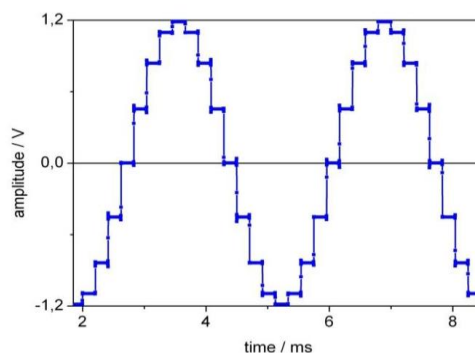


Fig. 5. El efecto Josephson: forma de onda sintetizada paso a paso

En **resumen**, tenemos un patrón cuántico de Tensión AC (PJVS) y un patrón de Potencia y Energía (SMMD) sin conexión directa entre ellos.

El **objetivo general** es desarrollar un patrón cuántico de muestreo para potencia eléctrica abierto a toda la comunidad metrológica y que proporcione trazabilidad directa al nuevo SI.

El proyecto 19RPT01, “*Quantum traceability for AC power standards*”, o **QuantumPower** es un proyecto de investigación conjunta destinado a mejorar los patrones dándoles trazabilidad directa a efectos cuánticos.

El proyecto tiene un presupuesto de 500 k€ y se extenderá desde septiembre de 2019 hasta septiembre de 2023. El consorcio está formado por 7 INMs:

- Justervesenet (JV), Noruega (Coordinador)
- Centro español de Metrología (CEM), España
- Český Metrologický Institut (CMI), Chequia
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina
- Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Italia
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Alemania
- Teknologian tutkimuskeskus (VTT) Oy, Finlandia

El proyecto se basa en exitosos proyectos anteriores, financiados por los programas de investigación en metrología EMRP (SIB59 Q-WAVE, ENG04 SmartGrid y ENG 52 SmartGrids II) y EMPIR (15RPT04 TracePQM, 14RPT01 ACQ-PRO, 15SIB04 QuADC, 17NM02 MeterEMI y 17RPT03 DIG-AC) y promoverá la cooperación entre los INM emergentes en el campo de la potencia y la energía.

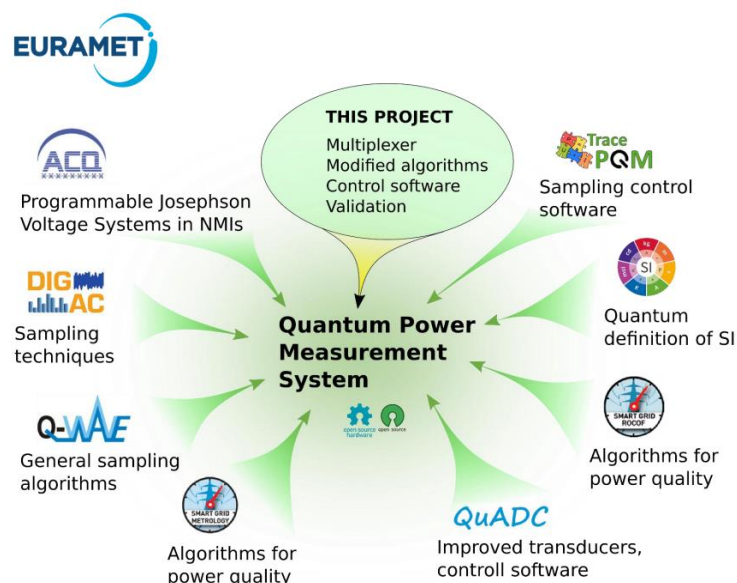


Fig. 6. Relación de Quantum Power con otros proyectos

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Los objetivos específicos del proyecto QuantumPower son los siguientes:

1. **Diseño y realización de un patrón cuántico de potencia basado en el patrón Josephson programable.** El patrón debe medir potencia eléctrica, parámetros de calidad de red y fase con incertidumbres inferiores a $20 \mu\text{W}/\text{VA}$ para medidas de potencia siendo la **contribución de los digitalizadores inferior a $2 \mu\text{W}/\text{VA}$.**

Para ello se revisarán los sistemas de medida existentes y su posible adaptación y se desarrollará un **multiplexor (MUX)**, para permitir métodos avanzados de medida. Un multiplexor es un dispositivo que sirve para transmitir datos de diferentes entradas a una sola salida.

2. **Desarrollo del software para la operación del patrón descrito en el objetivo 1** de forma que de soporte a la adquisición de datos, su proceso y el cálculo de incertidumbres.

3. **Desarrollo y validación de nuevos métodos** y algoritmos para la medición de QPS, así como un protocolo para futuras comparaciones con este nuevo sistema de medida.

4. **Definir las estrategias individuales** de operación a largo plazo para **cada participante**, incluyendo apoyo normativo, colaboraciones en investigación, esquemas de calidad y acreditación. Esto servirá de base para ofrecer nuevos servicios de calibración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo los objetivos, en el proyecto QuantumPower se ha desarrollado un nuevo sistema de medida, que comprende lo siguiente:

1. Diseño y fabricación de un **multiplexor** como nexo de unión para permitir la comparación entre el patrón cuántico de AC y el patrón de Potencia. Cuatro de los multiplexores fabricados ya han sido caracterizados para comprobar que cumplen con las especificaciones objetivo atendiendo a las características de sus componentes y construcción. Los resultados indican que cumple con las expectativas. Actualmente se encuentran en el proceso de prueba en conjunto con el PJVS.

La Fig. 7 muestra un ejemplo donde el digitalizador mide una señal cada vez; la corriente, la tensión y la tensión Josephson, que se puede ajustar para calibrar el digitalizador al mismo nivel que la señal de corriente o tensión a medir.

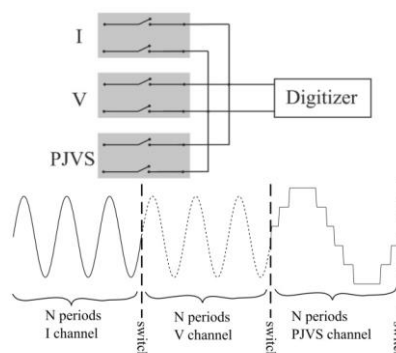


Fig. 7. Esquema de medida y señales conmutadas

El digitalizador toma un número fijo de periodos de cada canal, requiriendo un tiempo de conmutación del orden de ms. Además, la conmutación debe estar sincronizada con las señales, por lo que el multiplexor debe incluir un disparador (*trigger*) externo.

El multiplexor es un instrumento versátil que tiene la ventaja de permitir muchas configuraciones. La secuencia de conmutación y el disparador se pueden configurar desde un PC. Además, está construido de forma modular, posee una placa maestra que controla las placas esclavas. También incluye funciones de temporización.

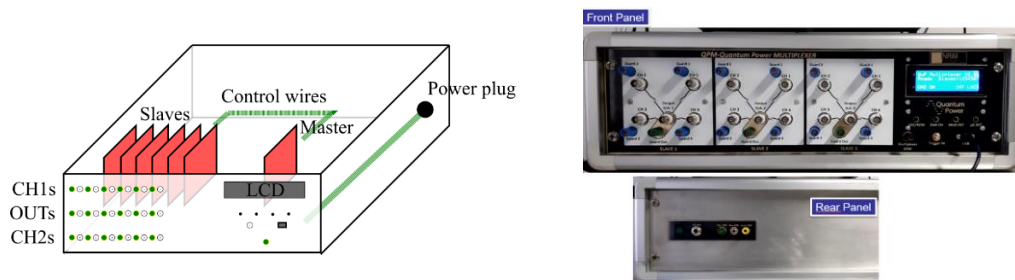


Fig. 8. Multiplexor

Caracterización del multiplexor

El **error de amplitud** se midió utilizando el PJVS y un calibrador. El PJVS realizó dos medidas de la amplitud del calibrador, una de ellas directa y la otra con el multiplexor conectado.

Tras múltiples mediciones, el error relativo fue de $(0,231 \pm 0,340) \mu\text{V/V}$ relativo a una tensión nominal de 7 V, cumpliendo con los requisitos de $20 \mu\text{V/V}$ para las medidas de potencia y de $2 \mu\text{V/V}$ para la contribución de los digitalizadores, fijadas en el objetivo 1. Por lo tanto, la contribución del multiplexor se considera dentro de las especificaciones requeridas para el rango de frecuencia 20 Hz – 1 kHz.

Respecto a la **fase** las mediciones mostraron que al pasar la señal por el “switch” del multiplexor el retraso es de aproximadamente 320 ps y se encontró una diferencia de aproximadamente 35 ps entre los dos canales. El valor del retardo encontrado está dentro del rango esperado y es interpretado favorablemente en el rango de frecuencia de DC a 5 kHz.

Se midió la **capacidad parásita** de los PhotoMos integrados utilizando un puente LCR. La medida muestra una relación (tensión de salida-entrada) inferior a -90 dB para el aislamiento y las interferencias. La resistencia de aislamiento resultó $>100 \text{ T}\Omega$.

La **resistencia de entrada** del canal se midió en el *input* con una conexión Kelvin y un cortocircuito en la salida. El valor medido de la resistencia correspondiente a los cuatro relés conectados en serie, $0,53 \Omega$, fue inferior al valor indicado por el fabricante, $0,72 \Omega$.

2. Desarrollo del software para la operación del patrón descrito en el objetivo 1 de forma que dé soporte a la adquisición de datos, su proceso y el cálculo de incertidumbres. El software de control (llamado TWM), y los algoritmos (llamados QWTB) desarrollados en anteriores proyectos han sido actualizados o ampliados para su adaptación al nuevo sistema. También ha sido desarrollado un nuevo software para la configuración del multiplexor.

De momento, el software existente ya controla los sistemas que ya han sido desarrollados, realiza medidas y procesa datos. La estimación de incertidumbres se encuentra en proceso. Todo el software será de código abierto y modificable para permitir la adaptación a diferentes patrones cuánticos.

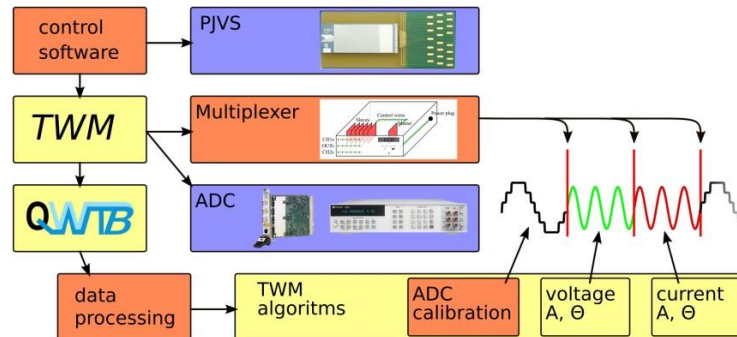


Fig. 9. Software del sistema Quantum Power

3. Se han desarrollado nuevos métodos y algoritmos para la medición de QPS. Se va a realizar una comparación entre distintos miembros del consorcio como medida de validación.

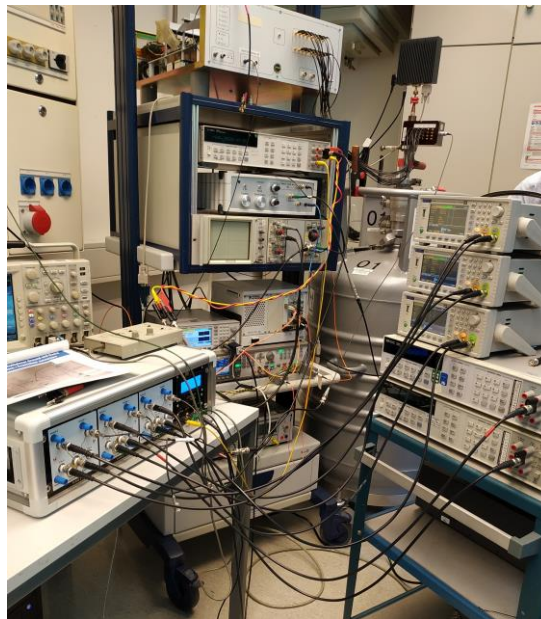


Fig. 10. Sistema funcionando en el PTB

4. Las estrategias individuales están siendo discutidas por el consorcio y con los INMs/DIs de EURAMET, y con miembros relevantes de EMNs, JRP y Comités Técnicos de EURAMET.

4. CONCLUSIONES

Existen ya cuatro multiplexores montados y probados. Las medidas realizadas demuestran que cumplen con los requisitos establecidos en los objetivos, por lo que se encuentran dentro de las especificaciones teóricas. Actualmente se está integrando y probando en los sistemas de medida con el PJVS con buenos resultados, en los que se pone de manifiesto la versatilidad del multiplexor.

Se ha cumplido con los requisitos de los objetivos 2 y 3 relacionados con el software, los métodos y los algoritmos para las medidas de potencia utilizando sistemas cuánticos, y se está desarrollando el análisis de incertidumbre para proceder a la validación del sistema completo.

Los resultados del proyecto proporcionarán un patrón cuántico de potencia y energía de las siguientes características:

- Software de código abierto, publicados en GitHub.
- Diseño de los distintos componentes público
- Potencia, Fase, Tensión/Intensidad de corriente AC directamente trazables al SI.
- Diseño modular: flexible para muchos propósitos.
- Adaptable a nuevos ADCs/ sistemas PJVS /algoritmos.

Cumpléndose los siguientes objetivos:

- Demostración de un multiplexor modular de código abierto que puede conmutar 4 señales de entrada diferentes entre 3 canales de salida separados.
- Disponibilidad de al menos dos sistemas de medida Quantum Power confirmados durante la vida del proyecto.

Los avances de este proyecto se distribuirán dentro de la comunidad metrológica. Esto proporcionará a los institutos en desarrollo mejores CMCs en la medida de potencia. Se garantizará trazabilidad al nuevo SI, se disminuirán los costos de desarrollo y se reducirá la brecha entre CMCs entre los institutos europeos.

5. REFERENCIAS

- [1] H. Malmbekk, “Open source Quantum traceability for AC power standards” EURAMET TC-EM SC Power and Energy meeting. Mayo 2021.
- [2] INT “D1 - Summary report on the development of an open hardware multiplexer based on a single Josephson chip covering the required frequency range (20 Hz to 1 kHz).” Agosto 2021.
- [3] CMI, INTI, VTT, JV “D2 - Report describing the open-source software with implementation of new methods for quantum sampling and power measurement, including non-RMS power and phasors” Abril 2022.
- [4] C. A. Hamilton, “Josephson D/A converter with fundamental accuracy”, IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 44, pag. 223, 1995

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto EMPIR 19RPT01 Quantum Power “Quantum traceability for AC power standards” está financiado por el programa *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR), cofinanciado por los estados participantes y el programa de investigación e innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020.