

Desarrollo del proyecto “Pruebas de Intercambio Térmico del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41)” de Central Nuclear de Cofrentes

Autores

B. López⁽¹⁾, J.I. Vaquer⁽²⁾, M. Mota⁽³⁾, S. Reyes⁽⁴⁾, M. Palomo⁽¹⁾, G. Ruiz⁽³⁾, C. Rebollo⁽⁴⁾

(1) *Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental*

(2) *Titania Servicios Tecnológicos*

(3) *Iberdrola Generación - CN Cofrentes*

(4) *Iberdrola Ingeniería y Construcción (IBIC) / Empresarios Agrupados*

Abstract

Se presenta el trabajo desarrollado para la ejecución del proyecto “Pruebas de Intercambio Térmico (TA-11/0155), del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41)” realizado por Iberdrola Ingeniería y Construcción y por el Departamento de Ingeniería y Mantenimiento de Instrumentación de la Central Nuclear de Cofrentes (CNC), en colaboración con Titania Servicios Tecnológicos S.L.

Titania, en colaboración con el Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Valencia, se encargó de definir y seleccionar el Sistema de Adquisición de Datos (SAD), desarrollar el software de monitorización y grabación de datos, gestionar las hojas de cálculo de balances térmicos y realizar informes. IBIC fue responsable de definir la ingeniería básica (alcance y criterios) así como los modelos termodinámicos y los cálculos de eficiencia de intercambio térmico de los cambiadores de calor del sistema G41 para refrigeración de la piscina de combustible gastado. Por su parte, el Departamento de Ingeniería y Mantenimiento de Instrumentación de CNC gestionaron el proyecto y proporcionaron los medios necesarios para la realización del mismo.

El trabajo se estructuró en cuatro fases. La primera fue la selección del SAD, condicionada por el cumplimiento de la precisión y velocidad de medida exigida para las señales implicadas en los cálculos de intercambio térmico; el sistema se montó sobre una plataforma PXI de National Instruments. En la segunda se desarrolló ad hoc el software de monitorización “CNC-SAD-G41” utilizando LabVIEW™, construido en varios módulos integrados: adquisición y grabación de datos, curvas de calibración de RTD’s, monitorización, generación de informes y cálculos estadísticos. En la tercera fase se instaló la nueva instrumentación necesaria para la evaluación térmica en planta, y se realizaron las pruebas previas para verificar el correcto funcionamiento de todos sus componentes. Por último, se realizaron las pruebas de intercambio térmico descritas en la especificación, y se volcaron los datos en los modelos termodinámicos desarrollados, pudiendo verificar que la eficiencia de intercambio térmico cumplía con lo exigido. El trabajo concluyó cumpliendo en todo momento con las especificaciones técnicas y de calidad propuestas por el departamento de Ingeniería de la Central Nuclear de Cofrentes.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Como consecuencia de la segunda fase de ampliación (reracking de la piscina Este) de la capacidad de almacenamiento de las piscinas de combustible gastado (SFP) de la Central Nuclear de Cofrentes (en adelante, CNC), en Julio 2011 se aumentó la capacidad de enfriamiento de los dos lazos A/B del Sistema G41 mediante la sustitución de los cambiadores de calor de placas (PHE) por otros de mayor capacidad.

Los cambiadores de carcasa y tubos (S&T), que trabajan en serie y contracorriente con los PHE, se mantuvieron, siendo sometidos a una limpieza mecánica del lado tubos (agua de enfriamiento).

El proyecto “Pruebas de Intercambio Térmico del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41) de CNC” se desarrolló con el objetivo principal de realizar pruebas de comprobación de la capacidad de intercambio térmico en cada uno de los dos lazos (A y B) de que consta el Sistema G41, tras la sustitución de los PHE. En la figura 1 se muestra el diagrama de funcionamiento del lazo A del sistema de enfriamiento de la SFP, extraído de un informe tipo generado con el software desarrollado para el proyecto.

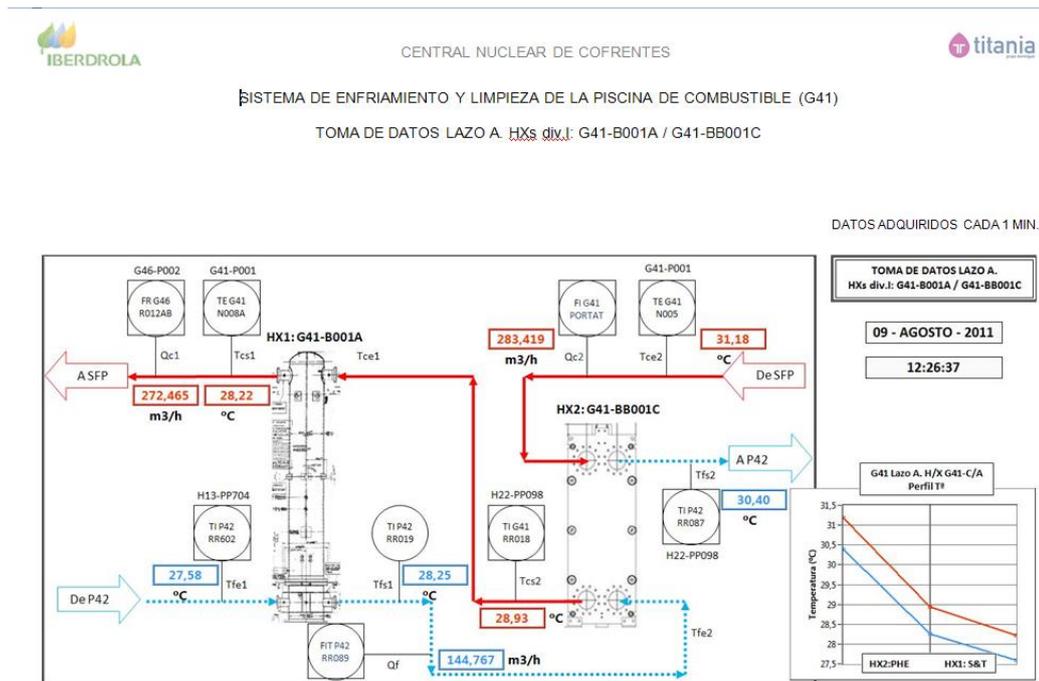


Fig. 1 – Diagrama de funcionamiento del lazo A del sistema de enfriamiento de la piscina de combustible (G41)

Titania, en colaboración con el Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Valencia, se encargó de definir y seleccionar el Sistema de Adquisición de Datos (SAD), desarrollar el software de monitorización y grabación de datos, gestionar las hojas de cálculo de balances térmicos y realizar informes. Iberdrola Ingeniería y Construcción (IBIC) fue responsable de definir la ingeniería básica (alcance y criterios), así como los modelos termodinámicos y los cálculos de eficiencia de intercambio térmico de los cambiadores de calor del Sistema G41 para refrigeración de la SFP. Por su parte, el Departamento de Ingeniería y Mantenimiento de Instrumentación de CNC gestionó el proyecto y proporcionó los medios necesarios para la realización del mismo.

1.2. Organización del proyecto

Los trabajos desarrollados en el proyecto “Pruebas de Intercambio Térmico del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41) de CNC” se agruparon en cuatro fases principales:

- **Fase 1.** Selección del sistema de adquisición de datos (SAD)
- **Fase 2.** Desarrollo del software “CNC-SAD-G41”. Software para la adquisición de datos, la monitorización y la realización de las pruebas de intercambio térmico en los lazos A y B del Sistema G41.
- **Fase 3.** Instalación de la instrumentación/SAD y pruebas previas.
- **Fase 4.** Pruebas de intercambio térmico y análisis de resultados.

Siguiendo la planificación comentada, el objetivo era realizar las siguientes etapas de pruebas:

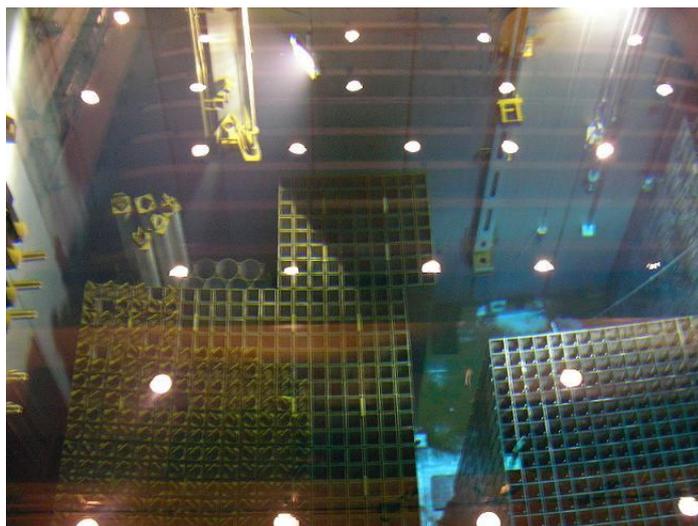
- A. Pruebas previas con nuevos PHE div.II: Julio 2011.
- B. Pruebas previas con nuevos PHE div.I: Julio 2011.
- C. Pruebas finales: Septiembre 2011.

El objeto de este documento es exponer las principales tareas que se realizaron en cada una de las fases integrantes del proyecto “Pruebas de Intercambio Térmico del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41) de CNC” llevado a cabo entre Junio y Octubre de 2011; el diseño y desarrollo del modelo térmico necesario para obtener resultados con posterioridad a la realización de las pruebas de intercambio térmico no queda contemplado.

En la figura 2 se muestran los nuevos PHE antes de ser instalados en planta y el interior de la piscina de combustible gastado (SFP).



a.



b.

Fig. 1 – Nuevos PHE antes de su instalación (a.). Interior de la piscina de combustible gastado (SFP) (b.)

2. SELECCIÓN DEL SAD

Tras estudiar el informe proporcionado por CNC “**Pruebas de Intercambio Térmico (TA-11/0155) (8.jun.2011, v0b). Requisitos funcionales del SAD**”, en el que se especifica la instrumentación de planta necesaria para realizar el balance térmico, se analizaron los requerimientos que debería tener el sistema de adquisición. Además, el criterio limitante para la selección del SAD, especificado en las reuniones previas al proyecto, eran las exigencias de precisión en la medición de la temperatura: 0,1°C; ya que, el incremento de temperaturas a observar en el balance térmico era entre 1,5°C y 2°C, al ser baja la carga térmica a disipar por encontrarse CNC al final del ciclo 18 de combustible.

Requerimientos iniciales para la selección del SAD:

1. Adquisición de 10 sensores de temperatura de precisión, **RTD tipo A**. Esta instrumentación garantiza una medida de **precisión inferior a 0,02°C**. La medición se realizó a **4 hilos**, con cable apantallado.
2. El **rango térmico** de las RTD's quedó acotado entre **15 y 40°C** para unificar lazo frío y lazo caliente.
3. Se debían medir los caudales de los equipos de enfriamiento en los dos lazos A/B del G41 (lado frío y caliente), **4 caudalímetros** en total. Estas medidas se realizaron con equipos de distintas características por lo que la incertidumbre fue superior a la obtenida con las RTD's. La medición se realizó en **miliAmperios (escala 4-20mA)** para evitar las pérdidas debidas a los tendidos de cableado.
4. Para poder unificar toda la instrumentación sobre un mismo equipo de medida, se realizó un tendido de varios metros de cables en campo. Esta circunstancia planteó la posibilidad de realizar ajustes en la configuración del SAD.
5. El **sistema debía estar operativo al menos tres meses**, por lo que el SAD tenía que ser robusto en su conexionado y estar instalado en una zona donde las interferencias (físicas y/o electromagnéticas) estuviesen controladas.
6. El equipo se ubicó dentro de una **caja de protección** para reducir la probabilidad de **contaminación radiactiva**.

Con estos condicionantes se tomó contacto con varias empresas especializadas en hardware para adquisición de datos, con especial hincapié en la medición con precisión de temperatura.

De todas las empresas consultadas, se seleccionó National Instruments (NI). Esta empresa es referente internacional en el diseño de hardware y software específico para adquisición de datos en distintas plataformas y con gran versatilidad en cuanto a tipologías de estructuras y precisión de los equipos específicos.

Los elementos adquiridos a NI para conformar el SAD fueron:

- Módulo Real-Time PXI 8101 Celeron 575 2.0 GHz: permite adquirir datos en tiempo real en entorno industrial.
- Multímetro digital PXI-4070 con nº de serie EACBD3: empleado para la medida de tensión de las RTD's y posterior obtención de la temperatura.
- Fuente de alimentación de precisión PXI-4132 con nº de serie EF8C28: sirve para alimentar las RTD's.
- Tarjeta de Adquisición PXI-6221: para la medida de datos de caudal.
- Bloque de conectores SCB-68: empleado para el conexionado y acondicionamiento de la señal de los caudalímetros.

- Multiplexor PXI-2503: permite discretizar entre canales de temperatura.
- Bloque de terminales TB-2605: es el elemento intermediario que permite el conexionado de las RTD's al multiplexor.

Todos ellos integrados en el Chasis PXI-1042Q de National Instruments. La figura 2 muestra el aspecto del SAD.

3. DESARROLLO DEL SOFTWARE “CNC-SAD-G41”

Los requerimientos técnicos del proyecto especificaban que el sistema para la realización de las pruebas de intercambio térmico debía recoger, almacenar, tratar y presentar los parámetros termohidráulicos procedentes del Sistema G41 (lado de proceso o caliente) y del Sistema Cerrado de Agua de Enfriamiento (P42, lado de servicio o frío).

Para cumplir con dicho objetivo, se diseñó y desarrolló el software “CNC-SAD-G41” formado por distintos módulos que fueron ajustados durante la fase de calibración/instalación de la instrumentación y pruebas en campo.

- 1. Módulo de Adquisición de Datos.** Comunicación entre el sistema de adquisición y el ordenador donde está instalado el software. Las condiciones de adquisición de datos se analizaron durante la fase de implementación del sistema en campo. Tras este análisis, la frecuencia de adquisición se estableció en 2 Hz para las PRUEBAS y en 1 minuto, configurable a 3 y a 5 minutos, para OPERACIÓN.
- 2. Módulo de Curvas de Calibración de RTD's.** Software de adquisición de datos y cálculo de ajustes para poder obtener la curva de calibración para cada una de las RTD's.
- 3. Módulo de Grabación de datos.** Este módulo permitió la grabación automática de los datos adquiridos durante todo el periodo de funcionamiento del sistema, realizando una grabación de datos en archivos independientes por día, indicando el tipo de muestreo realizado y en un **formato EXCEL**.
- 4. Módulo de Monitorización.** Se programó un entorno gráfico denominado Sinóptico, con las siguientes variaciones:
 - a. Sinóptico Operación:** Visualización on-line de las variables adquiridas.
 - b. Sinóptico Prueba de intercambio término:** incluye algunas opciones de cálculo extra para la realización del **balance térmico básico** en momentos concretos
 - c. Sistema de acceso codificado.** Para acceder a los sinópticos de las pruebas de intercambio térmico se ha realizado una gestión de acceso por Usuario/Contraseña.
 - d. Representación gráfica del salto térmico.**
 - e. La representación de sinópticos** permite diferenciar claramente los diferentes circuitos (lado proceso, G41, caliente, color rojo y lado servicio, P42, frío, color azul).
- 5. Módulo de cálculos estadísticos.** Para realizar el Balance Térmico Básico es necesario tener una referencia de la incertidumbre de la medida en función del tamaño de la muestra y del periodo de muestreo. Para ello se programó una estadística ad-hoc de análisis de la Señal. El sistema permitía, de un modo configurable, detectar, señalar (en rojo) y filtrar las variables que diferían de los valores medios obtenidos durante las pruebas:

- a. por defecto, los valores de temperatura que difiriesen de la media en más de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
- b. por defecto, los valores de caudal que difiriesen de la media en más de $\pm 2\%$. Tras análisis de los datos, el criterio de filtrado para los caudales se aumentó, ya que los caudalímetros de las ramas calientes ya tenían un ruido del 2%.

6. Balance Termodinámico básico. Este cálculo se realiza a partir del salto térmico medido en el lado caliente y frío de cada cambiador, así como las diferencias porcentuales entre ambos lados de un mismo cambiador.

7. Módulo de Almacenamiento y Exportación de Sinópticos. Permitía exportar los sinópticos en un formato de informe que recogía toda la información de definición de las pruebas de rendimiento térmico.

8. Módulo de Histogramas. Seguimiento de la evolución de las variables mediante histogramas. Se desarrolló para que la grabación de datos fuera compatible con EXCEL.

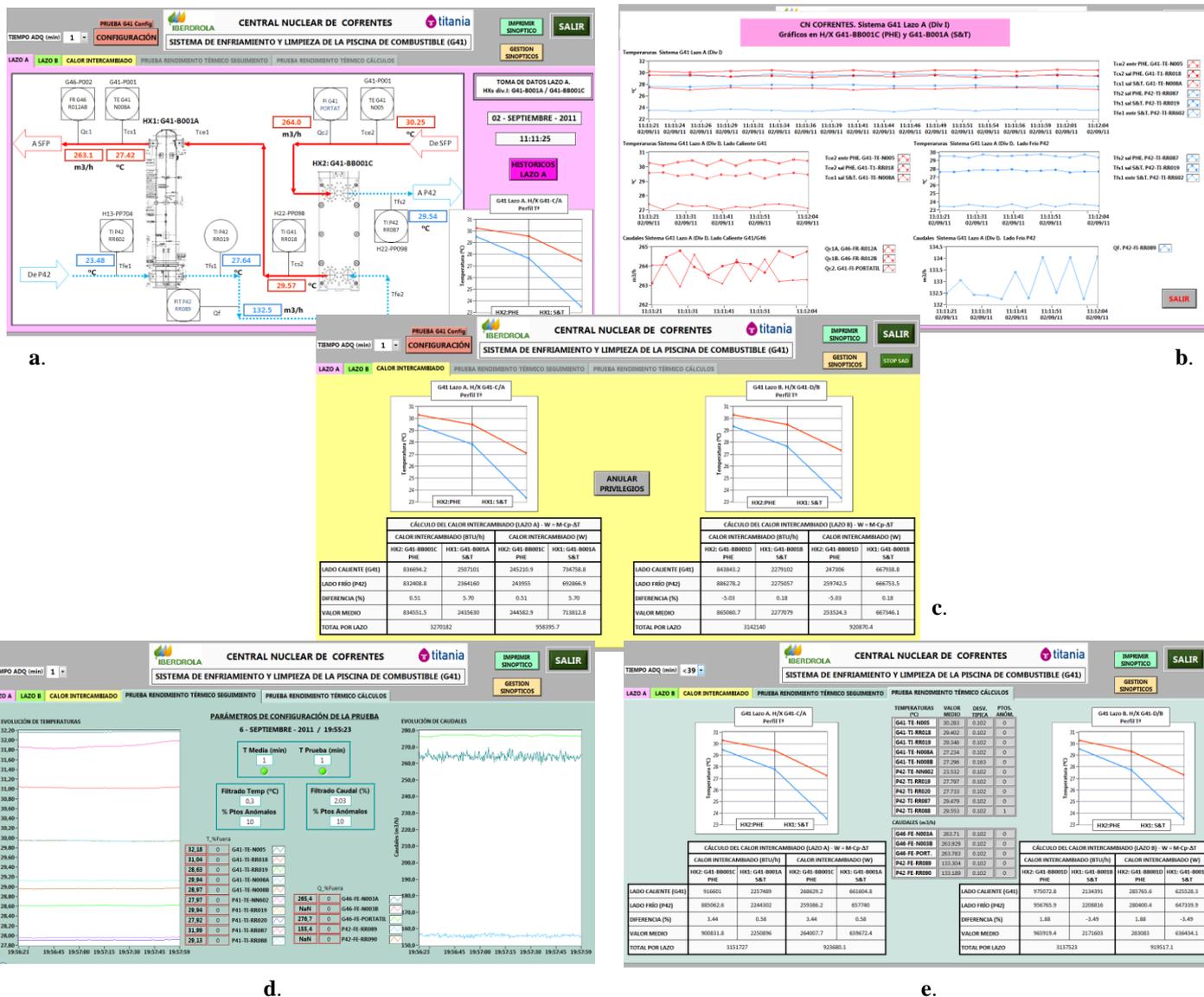


Fig. 3 – Imágenes de ventanas del software “CNC-SAD-G4”. Sinóptico de operación del lazo A (a). Visualización de históricos del lazo A (b). Intercambio térmico instantáneo de los lazos A y B (c). Seguimiento de la Prueba de Intercambio Térmico (d). Cálculos de la Prueba de Intercambio Térmico (e).

4. INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN/SAD Y PRUEBAS PREVIAS

4.1. Calibración de la instrumentación e instalación del sistema en planta

Antes de instalar la instrumentación y el SAD en planta, se calibraron e identificaron cada una de las RTD's, dada la importancia de cumplir con los requisitos de precisión en la medida de las temperaturas. Esta calibración se realizó en el Departamento de Instrumentación y Control (I&C) de CNC (véase figura 4, en la que se muestra el montaje necesario para calibrar la instrumentación).

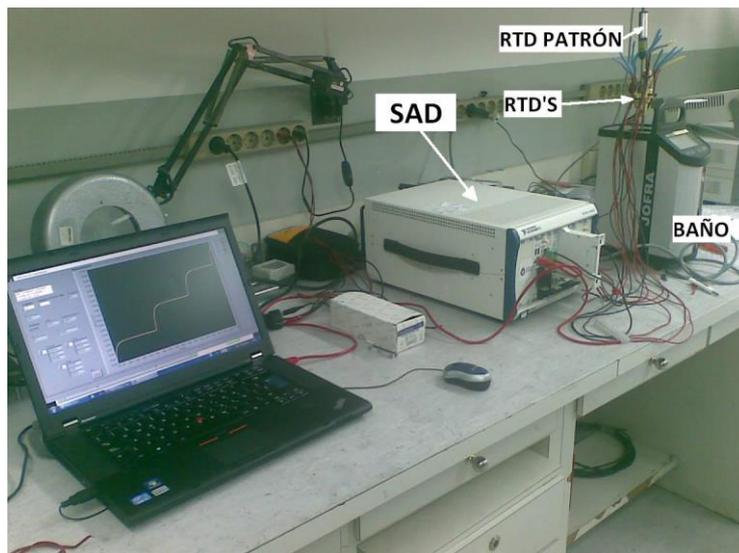


Fig. 4 – Montaje (instrumentación + SAD + software) para la calibración de las RTD's.

La dificultad en la instalación de las nuevas RTD's radicó en que los pocetes donde se instalaron no estaban diseñados para esta instrumentación, lo que podía provocar incertidumbres en la medida. Se realizó un seguimiento de la instalación de la instrumentación y su conexión con el SAD, con el objetivo principal de que el tendido de cable alterara lo menos posible la medida de las variables de temperatura.

Fue muy importante analizar la influencia de la conexión y configuración de las tierras, ya que, aunque el sistema dispone de su propia tierra, los sensores están ubicados e instalados en distintos subsistemas.

Además se realizó la comprobación y ajuste del Software desarrollado, así como del modelo de intercambio térmico.

4.2. Realización de pruebas previas

Durante las pruebas previas recogidas en el apartado 1.2, se realizó una comprobación completa del sistema.

Se cubrieron dos tareas principales con el fin de definir las mejores condiciones de muestreo en la realización de las pruebas finales:

- 1- Tras el análisis, el sistema se diseñó para que el periodo de muestreo fuera configurable seleccionando una de las tres opciones posibles: 2Hz, 2'5Hz y 3Hz.
- 2- Se valoró el efecto de la duración de la prueba de intercambio térmico. Siendo éste un parámetro configurable a 3-5 minutos.

5. PRUEBAS DE INTERCAMBIO TÉRMICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las Pruebas finales se realizaron durante el mes de Septiembre.

Se realizaron un total de 12 pruebas con un periodo de muestreo de 500 ms (2Hz) y una duración de 1 minuto para calcular los valores medios, y 3 minutos para la validación de los datos según los criterios de filtrado.

Con los resultados obtenidos, el personal de Iberdrola Ingeniería y Construcción comprobó que el calor intercambiado en los cambiadores de calor del sistema G41, determinado a partir de los datos adquiridos, tenía una diferencia, respecto al modelo térmico teórico desarrollado, menor de un 2%, lo que permitió validar la capacidad de intercambio térmico teórica considerada en los análisis de enfriamiento de las piscinas de combustible gastado.

6. CONCLUSIONES

Este proyecto ha proporcionado los datos necesarios para realizar el balance térmico detallado del Intercambio Térmico (TA-11/0155), del Sistema de Enfriamiento y Limpieza de la Piscina de Combustible (G41).

Estos datos se adquirieron según las condiciones de precisión exigidas por el proyecto para la medida de temperatura (medidas en campo con precisión por debajo de los 0,1 °C), lo que conllevó precisiones en calibración de $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

Así mismo se filtraron los datos con respecto a unos anchos de banda que el usuario puede configurar al definir los parámetros de la prueba de intercambio térmico, descartando así los datos fuera de límites en función de los valores medios del proceso. Este filtrado tenía como objeto garantizar la estabilidad respecto a la dispersión de datos y por tanto a la incertidumbre de los resultados del balance térmico.

Por otra parte, este proyecto ha permitido conocer más en detalle el comportamiento del sistema de enfriamiento de la piscina de combustible de CNC. De este sistema no se tenían históricos y ha permitido observar el efecto de las inercias térmicas del edificio y de la temperatura del foco frío, de cómo entraban en funcionamiento los sistemas de regulación del sistema de enfriamiento, etc.

Se consiguió un sistema robusto, práctico, que cumplía con las garantías de estabilidad y precisión requeridas, y que ha proporcionado datos para que los cálculos térmicos realizados por el personal de Iberdrola Ingeniería y Construcción tengan una incertidumbre respecto al modelo teórico inferior al 2%.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores y como conclusión final, puede considerarse que el desarrollo del proyecto ha cumplido al 100% con los objetivos planteados inicialmente, tanto en alcance como en resultados.