

Lógicas del Sistema de detección de fugas en los intercambiadores de calor del moderador, en Central Nuclear Embalse

Especialización en Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible

*Alumno: Fernando Luis Gomez
Director: Dra. Ing. Flavia Felicioni
Co-director: Ing. Carlos Cartelli*

Diciembre de 2018



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Comisión Nacional
de Energía Atómica

ÍNDICE

Resumen	3
Capítulo 1	4
1.1 Introducción	4
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Trabajo Previo	5
Capítulo 2	7
2.1 Requerimientos del sistema.....	7
2.2 Características de una cadena de medición	9
2.3 Estadísticas de conteo. Mínima fuga detectable.....	14
Capítulo 3	18
3.1 Disposición de las cadenas de medición	18
3.2 Evaluación de Lógicas.....	19
3.3 Simulación de las Lógicas.....	22
Capítulo 4	29
4.1 Validación del sistema a implementar: Sistema de adquisición.....	29
4.2 Mediciones de fondo.....	30
4.3 Prueba LED del detector y falla de Ratemeter	34
Conclusiones	38
Bibliografía.....	39

Resumen

Los equipos de instrumentación y control (I&C) son esenciales para operar Instalaciones Nucleares de forma segura y eficiente en todos los estados operativos y en situaciones accidentales. La evolución tecnológica desde los equipos analógico-electromecánicos hacia los “inteligentes” con tecnología digital, permiten aumentar la capacidad del control con más y mejores lecturas de variables de procesos (presión, caudal, etc.) y de variables nucleares (actividad, dosis, flujo neutrónico, etc) proporcionando gran confiabilidad y reduciendo la exposición del personal a la radiación.

Estos adelantos obligan a las Instalaciones Nucleares a incorporar nuevos equipos digitales a su sistema de control centralizado y predominantemente analógico, para poder extender su vida útil. Este es el caso de la Central Nuclear Embalse (CNE), central tipo Canadian Deuterium Uranium (CANDU), que está implementando un Proyecto de Extensión de Vida (PEV) que le permitirá operar por un nuevo ciclo de 25 años. Las principales actividades que se están realizando son los cambios de los tubos de presión y generadores de vapor, la actualización de las computadoras de control y la repotenciación de la Planta (de 648 iniciales a 683 MWe).

La extensión de vida implica cumplir con normativas más exigentes por parte de la ARN (Autoridad Regulatoria Nuclear), IAEA (International Atomic Energy Agency) y AECL (Atomic Energy of Canada Limited) respecto a todas las condiciones operativas y accidentales.

El caso accidental abordado en este trabajo es la rotura tipo 2A de un tubo del circuito primario de los intercambiadores de calor del moderador. Como el sistema de refrigeración se compone de un circuito primario-secundario doblemente redundado, la rotura implicaría un pasaje directo de agua pesada del moderador al agua de servicios que se descarga al embalse.

En base a esta situación accidental se decidió implementar un sistema propuesto por CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), el Sistema Adicional de Fugas del Agua del Moderador (SADFM), que detecta tempranamente la ocurrencia de fugas y que permite iniciar las acciones de mitigación para minimizar, tanto como sea posible, la emisión de agua tritiada en el efluente manteniéndose por debajo de los límites de fuga admisibles. El sistema detectará las fugas a través de la medición de actividad gamma en la salida de agua de servicios.

El SADFM está compuesto por dos subsistemas independientes, cada uno asociado a un intercambiador de calor del moderador en particular. Cada subsistema tendrá detectores triplemente redundados, configurándose en una lógica 2 de 3 para evitar una falsa detección por señales espurias. El SADFM entregará una medición válida ante falla simple de alguno de los componentes que lo integran, con el objetivo de mejorar la disponibilidad de la medición aún en esas condiciones.

En esta tesis se presentan las principales características del SADFM, se evalúan las posibles alternativas de las lógicas de votación de la redundancia para mejorar la disponibilidad del sistema de medición y se valida el sistema a ser implementado en la computadora de control de CNE mediante ensayos realizados en un sistema de adquisición construido a tal fin.

Capítulo 1

1.1 Introducción

Control de inventario de agua pesada

La Central Nuclear Embalse es una central de tipo CANDU que al usar uranio natural como combustible, debe usar como moderador y refrigerante agua pesada. Cuando el agua pesada (que no es radiactiva) es sometida al flujo de neutrones que se generan en la fisión, algunos núcleos de deuterio (D) transmutan a tritio formando agua tritiada (que si es radiactiva).

Como el agua tritiada se metaboliza de la misma manera que el agua liviana resulta imperioso su control de inventario, ya que es una fuente de contaminación interna que no es posible mitigar. Por tal motivo la ARN impone como requisito para poder operar a la CNE, el control y monitoreo de radioisótopos en los efluentes que se descargan en el lago de Embalse, en particular el tritio.

La CNE tiene un sistema de detección de tritio por centelleo líquido, que toma muestras del agua de servicios a la salida del intercambiador de calor del moderador. Este sistema es muy preciso pero su tiempo de residencia es superior a 15min, por lo que en caso de fuga el sistema da alarma cuando la fuga supera el límite de descarga de tritio. En caso de una rotura 2A en los tubos del intercambiador de calor, el límite de descarga de tritio en los efluentes del agua de servicio se supera en el orden de segundos. Por este motivo es necesario un sistema de detección temprana de fugas.

Como el Tritio presenta una desintegración por decaimiento β^- , no puede detectarse a través de un caño de acero. Sin embargo el agua pesada del moderador contiene un conjunto de radionucleídos activos que se generan a causa del normal funcionamiento del reactor. Cuando el reactor esta en operación el radionucleído preponderante es el N-16 (por reacción n,p con el O-16) y cuando está fuera de servicio son impurezas que contiene el agua pesada, que se activan al pasar por el reactor. Entre los más importantes se encuentra el Co-60, que se utiliza para calibrar detectores de radiación gamma. Por consiguiente si se puede detectar la presencia de actividad gamma en el agua de servicios se puede identificar rápidamente una fuga de agua del moderador.

En base a estos hechos la CNEA propone e implementa el Sistema Adicional de Fugas del Agua del Moderador (SADFM).

1.2 Objetivos

Los objetivos de esta tesis son,

- Presentar las principales características del Sistema Adicional de Fugas de Agua del Moderador (SADFM). Explicar las decisiones tomadas en base a los datos del proceso, a la elección del tipo de detector, a los ensayos en planta utilizando un mockup y a los antecedentes de otras centrales.
- Evaluar las lógicas de votación de la redundancia con el objetivo de mejorar la disponibilidad de la medición. Analizar las posibles alternativas utilizando software LabView, en función de las características de los equipos y en la comunicación con la computadora de control.
- Validar el sistema a implementar en la computadora de control procesando datos adquiridos en ensayos de laboratorio.

1.3 Trabajo Previo

Elección de la cadena de medición

Como se ha mencionado anteriormente, se busca detectar una fuga (especialmente de tritio) mediante la presencia de actividad gamma en el agua de servicio. En base a equipos instalados y datos operativos de las centrales Atucha 1 y 2 y CNE se decidió que la mejor manera de medir actividad gamma era con detectores de centelleo sólidos.

Entre las ventajas más relevantes de estos detectores se encuentran su tamaño compacto, bajo peso, funcionan a temperatura ambiente, no requiere de insumos para operar y la medición es rápida y no invasiva.

Con la tecnología de detección definida y por cuestiones de compatibilidad de equipos ya instalados en CNE, se analizaron las distintas alternativas que ofrecía el fabricante de detectores Canberra. Dicha empresa ofreció 2 cadenas de medición, una de NaI (Ioduro de Sodio) y otra BGO (Germanato de Bismuto).

Cada cadena de medición se compone por un detector (en su interior se encuentra el cristal que interactúa con la radiación gamma y el fotomultiplicador que amplifica la señal que sale del cristal), un preamplificador (que amplifica y conforma el pulso que sale del detector) y un Ratemeter (que cuenta los pulsos, los visualiza en una pantalla y los convierte en una señal analógica de 4-20mA).

El detector BGO tenía mayor sensibilidad y el rango de energía que detectaba (250keV a 9MeV) era mayor que el de NaI (70keV a 2,55MeV). Sin embargo su principal desventaja era la falta de experiencia operativa de este tipo de detectores en las centrales argentinas.

Se realizaron simulaciones en MCNP (Monte Carlo N-Particle) con los dos detectores en las condiciones de proceso. Los resultados determinaron que las ventajas del detector BGO no eran aprovechadas para la situación planteada. La experiencia operativa resultó determinante en la elección final de los detectores de NaI.

Simulaciones en las condiciones operativas

La fuga en el intercambiador de calor podía suceder en 2 condiciones operativas, una con el reactor en operación y otra con el reactor fuera de servicio. El factor de mayor incidencia en la medición era el abrupto cambio de actividad en la fuga, por la presencia de N-16 en la condición de reactor en operación.

Como la concentración de N-16 varía en función de la potencia del reactor, es posible determinar con datos operativos y programas de simulación, la actividad de N-16 que habría en el agua de servicios por la fuga del agua de procesos, en el lugar donde estaría instalado el SADFM.

Con el reactor fuera de servicio no se genera N-16 y la fuga solo puede detectarse por la concentración de radionucleídos activos presentes en el agua pesada del moderador.

Pruebas funcionales en Mockup

La selección de la cadena de medición se verificó y validó mediante la realización de pruebas funcionales en un mockup diseñado para tal fin.

El mockup se componía de un recipiente cilíndrico cerrado con características similares al caño de agua de servicios (del intercambiador de calor de CNE), con un agitador motorizado que aseguraba el mezclado total del agua que contenía el recipiente. El control de temperatura se lograba mediante una resistencia eléctrica.

El recipiente tenía bridas para la incorporación de fuentes líquidas y sólidas puntuales. La medición se tomaba con el detector montado externamente al recipiente del Mockup, con un blindaje de plomo que se deslizaba sobre una guía regulable.

Las pruebas se realizaron en un recinto cercano al cual sería el emplazamiento final y se utilizaron fuentes líquidas y sólidas puntuales de Co-60 y Cs-137. Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron comparables a las simulaciones hechas con anterioridad.

El mockup permitió obtener valores de fondo reales dentro de la central y desarrollar experiencia operativa para el diseño de los soportes y blindajes de plomo definitivos.

Implementación del sistema

En función de los datos obtenidos y con el objetivo de que el sistema pueda entregar una medición válida ante falla simple/única de alguno de los componentes que lo integran, se adquirió todo el equipamiento a instalar en la central.

La implementación también requirió el diseño de los soportes de los blindajes, el diseño propio del blindaje, los sistemas de anclaje en hormigón, el análisis de las capacidades de la computadora de control y el relevamiento de las medidas precisas del recinto donde se instalaría el sistema.

Todas estas tareas se desarrollaron en el transcurso de más de 2 años y terminaron en la instalación y montaje del Sistema Adicional de Fugas del Agua del Moderador (SADFM) en Septiembre de 2018.

Capítulo 2

2.1 Requerimientos del sistema

Condiciones de proceso

Los detectores de centelleo sólido de NaI deben poder medir a través de un caño de acero con las siguientes condiciones,

Datos de proceso y cañerías

- Cañería del agua de servicios de acero al carbono con espesor de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm) y diámetro de 30" (762 mm),
- Agua de Servicio: P= 3,45 bar y T= 43°C,
- Caudal del agua de servicios 702 kg/s,
- Caudal de moderador debido a una rotura 2A de un tubo de algún intercambiador de calor 2 kg/s.
- Niveles de actividad en base a los datos históricos del agua pesada del moderador

Condiciones ambientales del sitio de instalación

- Temperatura ambiente 35°C.
- El recinto está rodeado de paredes de hormigón de más de 320 cm de altura y espesor mayor a 20 cm. Distancia mínima entre las paredes de 120 cm.
- Se asume un fondo (con blindaje de 2 pulgadas) en alrededor de 8 cps.

Los datos de proceso fundamentan en gran medida la elección del detector de centelleo sólido, ya que no requieren la extracción de una muestra (es no invasivo), soportan temperaturas ambiente de hasta 50°C (y HR: 95%), son compactos (por lo cual se reduce el peso del blindaje) y la medición es rápida. Además existen numerosos antecedentes de sistemas de detección que utilizan este tipo de sensores, para detectar la rotura de caños en intercambiadores de calor en centrales nucleares.

Con los datos de proceso se procede a analizar las 2 condiciones operativas. A fines prácticos se denominará "encendido" al reactor en operación y "apagado" al reactor fuera de servicio.

Tipos de fuga

Reactor encendido

Con el reactor encendido se genera N-16 ($^{16}\text{O} + n \rightarrow p^+ + ^{16}\text{N}$) en el agua pesada del moderador por la reacción nuclear del O-16 con los neutrones. El N-16 tiene un período de semi-desintegración de 7,13s emitiendo rayos gamma con energías entre 6 y 7 MeV mayoritariamente. Aunque el detector de NaI no puede medir estas energías ya que su rango operativo es hasta 2,55MeV, si puede hacerlo en la dispersión que ocurre por efecto de Compton y por formación de pares.

Un decaimiento del orden de los segundos implica determinar con la mayor exactitud posible, el tiempo y la concentración del N-16 desde el núcleo hasta el lugar donde se sitúa el detector. Con datos aportados por CNE se pudo saber los caudales y las distancias de cada circuito, y con los datos de la potencia del reactor se pudo inferir mediante simulaciones la concentración de N-16 en el punto de detección.

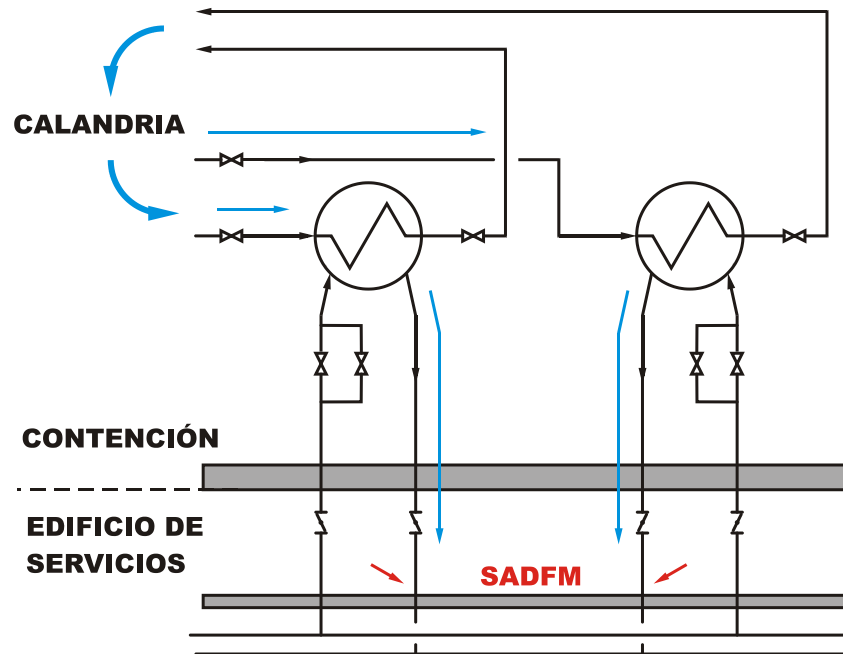


Figura 1: Esquema ilustrativo de los intercambiadores de calor del moderador.

Las simulaciones indican que los detectores pueden llegar a contar en el orden de las miles de cps (cuentas por segundo) en caso de fuga. Por lo que *a priori*, sin saber con exactitud el valor de cps del fondo del recinto, se puede asegurar que en caso de fuga el valor detectado será fácilmente distinguible del fondo y la detección será inmediata.

Reactor apagado

Con el reactor apagado no se genera N-16 y la fuga sólo puede detectarse por la concentración de radionucleídos activos presentes en el agua pesada del moderador.

Para ser detectados deben decaer emitiendo rayos gamma en el proceso y luego de atenuarse en el agua y en el caño de acero, tienen que llegar al detector con una energía que se ubique dentro del rango de detección.

Con los registros históricos de los niveles de actividad y los radionucleídos presentes en el agua del moderador se pudieron realizar distintas simulaciones en MCNP y ORIGEN-S (Oak Ridge Isotopes Generation). Las simulaciones arrojaron una alta variabilidad de concentraciones y por ende de actividad.

Aunque el valor exacto de actividad en caso de fuga se determinará más adelante, se estima en el orden de los cientos de cps.

2.2 Características de una cadena de medición

Cada cadena de medición está compuesta por un detector de centelleo de NaI (TI), un Preamplificador/discriminador que también es fuente de alto voltaje para el detector, y un Ratemeter que cuenta los pulsos, los visualiza y genera una salida analógica y digital de la medición.

Detector de centelleo de NaI, MD55EV1

Los centelladores hacen uso de ciertos materiales, que cuando son expuestos a radiación ionizante, sus átomos se excitan y/o se ionizan y al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible (o cercano a él). La emisión de luz es instantánea (fluorescencia), está en el orden de los 10 ns posteriores a la interacción de la radiación con el material.

En este caso el detector es un centellador sólido, constituido por un cristal de alta pureza de Ioduro de Sodio (NaI) con una pequeña cantidad de Talio. La radiación gamma (por su cubierta de acero inoxidable) interactúa con el material centellador, transfiriendo parte de su energía (o toda) como ionización y excitación. Parte de la energía absorbida es liberada en forma de luz visible (o cercana al espectro visible).

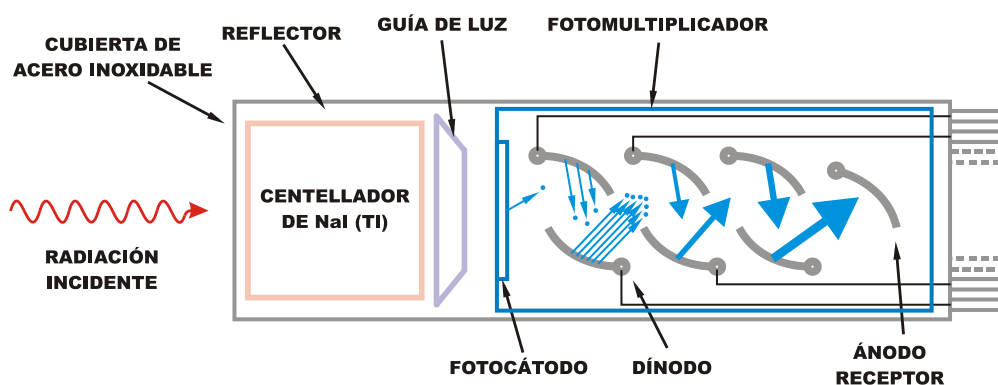


Figura 2: Esquema general de un detector de centelleo sólido.

La luz emitida por el cristal se encauza hacia el fotodetector mediante reflectores, guías de luz y/o fibras ópticas. El fotodetector es un tubo fotomultiplicador (FM) que convierte la luz de centelleo en una señal eléctrica.

El fotomultiplicador cuenta con un fotocátodo y un arreglo multiplicador de electrones (dinodos). El primero es una fina capa de un compuesto que emite electrones cuando absorbe fotones en el espectro visible (o en las cercanías de él). Estos electrones son de baja energía y se requiere multiplicarlos para poder generar una señal eléctrica útil.

El arreglo multiplicador de electrones es un conjunto de dinodos puestos en cascada que están cargados positivamente (cientos de voltios) en orden creciente. De esta manera cuando el fotocátodo recibe un fotón y consecuentemente emite un electrón, este se dirige al primer dinodo, que al estar cargado positivamente acelera el electrón, el cual impacta en su superficie emitiendo a su vez más electrones, que se dirigen al siguiente dinodo. Este proceso multiplicador continúa hasta llegar al ánodo receptor. De esta forma, se pueden obtener ganancias del orden de 10^6 .

Posteriormente esta señal, con una tensión del orden de decenas de mV, es procesada electrónicamente para analizar y contar los pulsos, con el objetivo de obtener información acerca de la radiación incidente.

El detector MD55EV1 se denomina “inteligente” ya que además de todo lo anterior descrito incluye soluciones nuevas para los problemas típicos de este tipo de detectores. El mayor problema son los cambios en la ganancia, las causas son diversas e incluyen histéresis del fotomultiplicador (FM), fatiga y efectos inducidos por la temperatura. Por tal motivo en este modelo se incorporan dos elementos de control, un LED y un sensor de temperatura (RTD).

El LED emite pulsos a niveles y repeticiones constantes y el preamplificador corrige los cambios en la ganancia ajustando el alto voltaje que llega al FM. Reemplazando un antiguo esquema que utilizaba una fuente de Am-241 como señal de referencia para estabilizar el detector, y que contribuía a las mediciones de fondo.

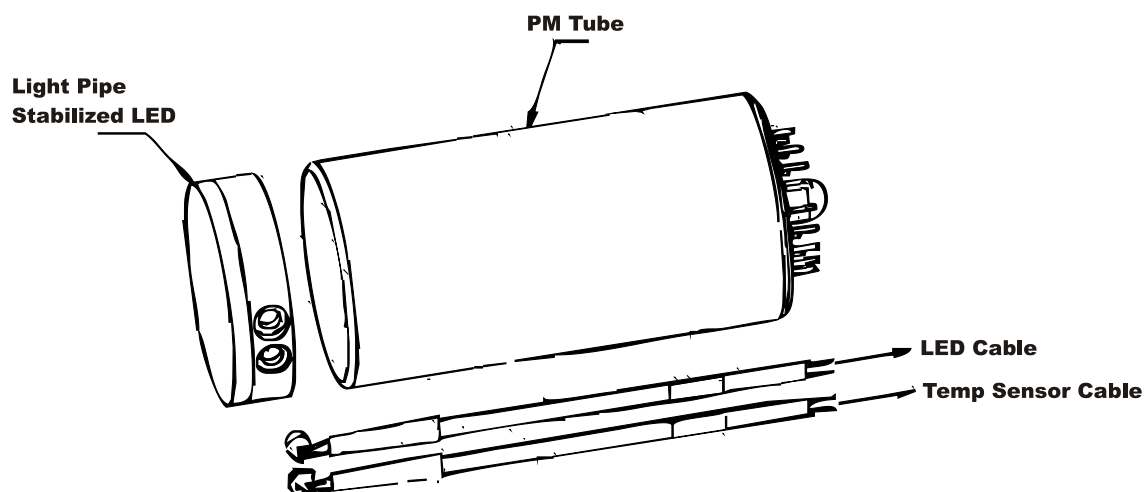


Figura 3: Detector Inteligente MD55EV1.

El detector MD55EV1 permite detectar en modo pulsos (para bajas mediciones de radiación) y en modo corriente (para mediciones altas). Cuando el detector esta cerca de la saturación el preamplificador disminuye el alto voltaje y aplica un factor de escala en la medición.

El fabricante asegura un detector “libre mantenimiento” (calibración de fábrica detector + preamplificador)

Características principales

Tipo y tamaño del detector:	NaI 50.8x50.8 mm (2x2 in) (diapL)
Sensibilidad del detector:	1.7×10^{-5} CPM/ μ Ci para Cs-137
Rango dinámico del detector:	1x10E1 a 2x10E7 CPM (modo pulso) 5x10E6 a 1x10E12 CPM (modo corriente)

El detector de NaI con el fotomultiplicador (FM) asociado es el más relevante para espectroscopia gamma de aplicaciones generales por su resolución, inmunidad al ruido, robustez y portabilidad. Si bien en este caso no se busca determinar la concentración de un radionucleído en particular sino que se quiere determinar si existe una fuga, el detector NaI+FM resulta apto para la aplicación considerando que se van a integrar las cuentas en todo el rango de energía.

Preamplificador PA300E

El preamplificador es la interface entre el centellador y el Ratemeter. Provee el alto voltaje que requiere el fotomultiplicador y convierte los niveles de corriente de salida en un tren de pulsos digitales con una frecuencia proporcional al nivel de radiación. Luego el Ratemeter coloca las unidades correspondientes.

El preamplificador tiene 3 canales analizadores de pulsos que pueden controlarse independientemente desde el Ratemeter. La comunicación entre ambos es digital.

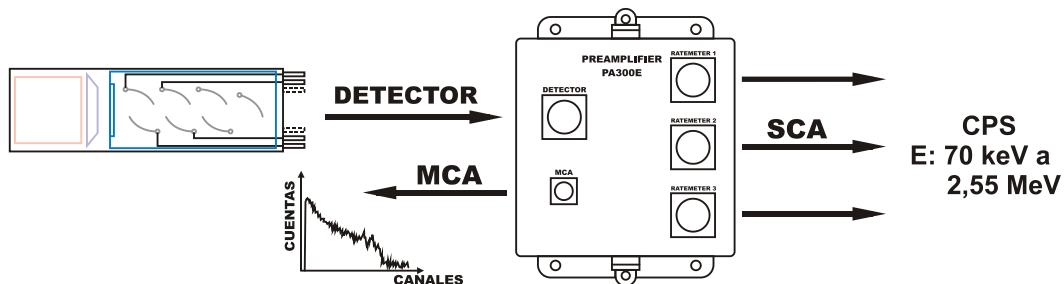


Figura 4: Esquema Preamplificador PA300E

En la imagen se puede ver dos tipos de conexiones, el que indica MCA (Multi channel analyzer) proporciona un espectro de la medición del detector. El espectro muestra la cantidad de pulsos y su energía (el rango de energía que mide el detector se divide en canales y los pulsos se agrupan según su energía en estos canales).

Las conexiones SCA (Single channel analyzer) integran los pulsos en un rango de energía que uno define en el Ratemeter. La elección del rango depende del conocimiento de la energía implicada en el proceso de detección.

Ratometer iR7040

El equipo consta de un panel LCD, un switch con 4 posiciones de llave (on, off, Mantenimiento-configuración, Remoto), una alarma y 4 lámparas indicadoras.

El equipo tiene 4 canales que pueden conectarse a 2 detectores diferentes. Las primeras 3 corresponden a distintos canales configurables de un solo detector.

Posee entradas y salidas analógicas (0a+10V o 4a20mA de 12bit). Las entradas pueden usarse para medir variables de proceso (medición de presión, flujo, temperatura).

También posee entradas y salidas digitales, 8 configurables para alarmas con salida de relés. Las salidas digitales para alarma incluyen salidas tipo contacto seco NO ó NC y failsafe configurables compatibles con la computadora de control de CNE.

Los tiempos de actualización/lectura de las señales analógicas pueden configurarse a partir de 0,5s.

El equipo guarda los datos en formato .csv y pueden descargarse a un pendrive USB. Además el equipo puede conectarse con una computadora a través de puerto serie o Ethernet (TCP/IP) usando el protocolo RADACS.

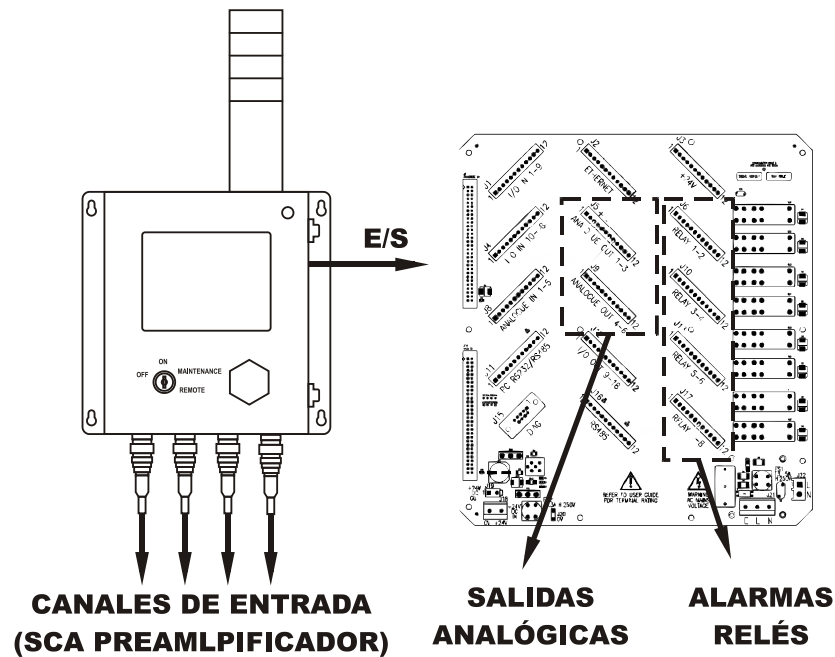


Figura 5: Esquema Ratemeter iR7040

Las salidas de los canales pueden ser,

- 1) Salida sin filtro, resultado instantáneo de la medición
- 2) Salida filtrada a través de un filtro configurable solo desde el Ratemeter.

Tipos de filtro

Filtro Time-mode: crea un promedio móvil sumando las últimas “n” entradas y dividiendo por “n”. Con un intervalo de adquisición configurable entre 2s y 1h.

Filtro Statistical: El filtrado estadístico crea un promedio de la misma manera que el time-mode, pero el número de entradas 'n' varía según la exactitud estadística requerida. Los conteos del sensor se van sumando hasta llegar a un límite de cuentas definido. La sumatoria se divide por “n”. El límite de conteo definido varía con la precisión requerida,

% Accuracy Required:	1,	3,	10
Defined Count Limit:	10000,	1000,	100

Filtro Exponential: El filtrado exponencial produce un filtro que imita un filtro RC analógico de primer orden con la constante de tiempo RC variando para producir un filtro exponencial dinámico. Si la diferencia entre el promedio actual y un nuevo punto de datos es grande, entonces la constante de tiempo se reduce para que el cambio se vea inmediatamente. A medida que la diferencia se hace más pequeña, la constante de tiempo aumenta de manera que la menor diferencia se filtra en una medición más extendida. Con una pequeña diferencia constante entre el promedio y un nuevo punto de datos, la constante de tiempo aumenta lentamente hasta un máximo.

Filtro Rate dependent averaging: El filtro de promedio dependiente de la tasa promediará el tren de pulsos entrante dependiendo de la tasa instantánea de conteo. Si está por encima de la tasa de conteo máximo, entonces se utiliza esa tasa y no se aplica ningún otro filtrado.

Si está por debajo de esa tasa, los conteos recibidos se suman hasta que se llega a una cantidad de pulsos máximo (configurable hasta 65535 pulsos) y se calcula la tasa usando esta suma de pulsos y el tiempo que se tardó en acumularlos. Si la tasa de conteo es muy baja, entonces los pulsos se acumulan hasta un tiempo máximo, y la tasa se calcula usando la suma de pulsos acumulados y el tiempo máximo configurado. El filtro funciona cuando se utiliza CPS como unidad de canal.

De las opciones de filtros disponibles se eligió el Time-Mode porque es el más simple y divulgado en la literatura, mientras que en el manual del equipo no se documenta como los demás filtros se implementan matemáticamente y además tienen pocos parámetros configurables (son poco flexibles).

Configuración de las salidas analógicas

El Ratemeter posee salidas analógicas de corriente activa. La ecuación que rige la conversión de medición de actividad r (en cps) a salida de corriente i_{OUT} (en mA) es la siguiente,

$$i_{OUT}[mA] = 4 + \frac{16}{d} \log \left(\frac{r[cps]}{s[cps]} \right)$$

con d : décadas asignadas a la salida de corriente comenzando por s

Lo que implica que para obtener la medición de actividad a partir de la corriente de salida de los Ratemeter, se debe resolver para cada entrada analógica la ecuación,

$$r[CPS] = s[CPS] \cdot 10^{\frac{(i_{OUT}[mA]-4)d}{16}}$$

Blindajes

Aunque los blindajes no forman parte de la cadena de medición, su función es muy importante en la medición. El blindaje aísla (atenúa) a los detectores de la radiación de fondo y de posibles interferencias dadas por operaciones de planta que utilicen una fuente de actividad.

En el SADFM cada subsistema cuenta con un solo blindaje, en su interior se ubican los 3 detectores de manera triangular, un soporte plástico mantiene sus posiciones fijas.

Para asegurar un mejor blindaje y un peso razonable para manipular en planta, los blindajes están constituidos por una serie de anillos encastrables, cuya forma busca atenuar la radiación incidente en todas las direcciones (ver Figura 6)

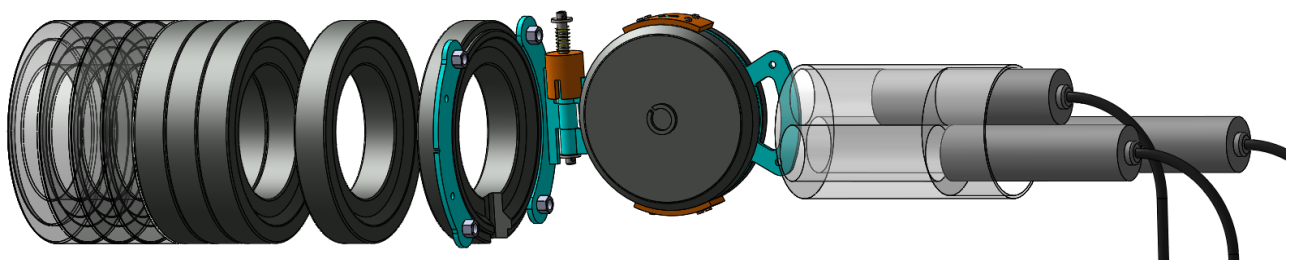


Figura 6: Blindaje para cada Subsistema.

2.3 Estadísticas de conteo. Mínima fuga detectable

La desintegración radioactiva es un proceso aleatorio. En consecuencia, cualquier medición basada en la observación de la radiación emitida en la desintegración nuclear está sujeta a cierto grado de fluctuación estadística.

El término estadísticas de conteo incluye el marco de análisis estadístico requerido para procesar los resultados de los experimentos de conteo nuclear y hacer predicciones sobre la precisión esperada de las cantidades derivadas de estas mediciones.

El valor de las estadísticas de conteo cae en dos categorías generales. El primero es servir como un control del funcionamiento normal de un equipo de conteo nuclear. [6]

Si la cantidad de fluctuación observada no es consistente con las predicciones, se puede concluir que existe alguna anomalía en el sistema de conteo. [6]

La segunda aplicación es generalmente más valiosa y trata la situación en la que solo tenemos una medición. Luego podemos usar estadísticas de conteo para predecir su incertidumbre estadística inherente y así estimar una precisión que debería asociarse con esa única medición. [6]

Modelos estadísticos

Bajo ciertas condiciones (ver Figura 7), podemos predecir la función de distribución que describirá los resultados de muchas repeticiones de una medición dada.

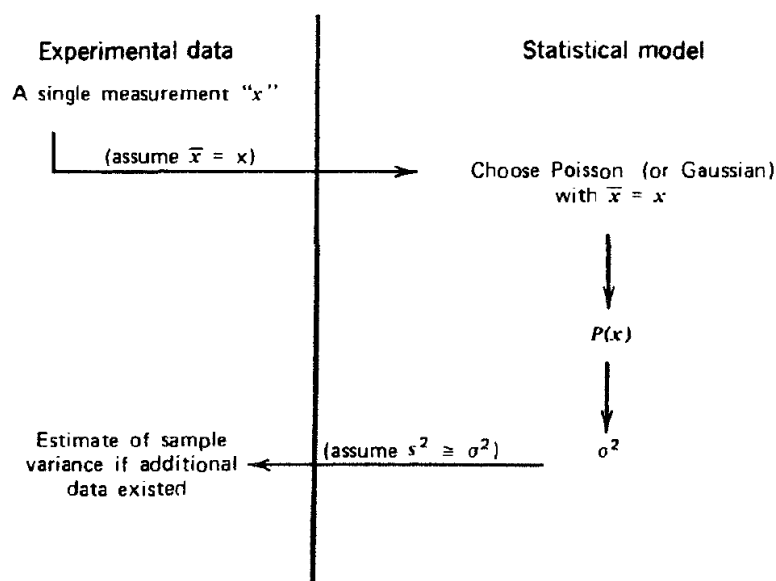


Figure 3.12 An illustration of Application B of counting statistics—prediction of the precision to be associated with a single measurement.

Figura 7: Aplicación del conteo estadístico. [6]

Si permitimos que $P(x)$ represente la distribución de Poisson (o Gaussiana) con $\bar{x} = \bar{x}_e$, luego la función de distribución de datos medida $F(x)$ debe ser una aproximación a $P(x)$ siempre que el modelo estadístico describa con precisión la distribución a partir de la cual surgieron los datos.

Además de la media, un segundo parámetro de cada distribución es la varianza, y podemos realizar una comparación cuantitativa comparando la varianza predicha σ^2 del modelo estadístico y la varianza muestral medida s^2 de la recopilación de datos.

Si los datos se caracterizan por el modelo estadístico y muestran un grado de fluctuación interna que es consistente con la predicción estadística, estos dos valores de varianza deberían ser aproximadamente los mismos. [6]

Límites de detectabilidad

Existen algunas circunstancias bajo las cuales es conveniente estimar la señal más pequeña que se puede detectar de manera confiable para establecer un "límite de detección" para el sistema de conteo. Algunas agencias reguladoras requieren que cierta cantidad mínima detectable (MDA) de la actividad puede medirse mientras se monitorea la posible presencia de contaminantes radioactivos. Una de las definiciones más utilizadas de MDA se introdujo por primera vez por Currie. [6]

Sea N_T el número de conteos registrados con una muestra desconocida y N_B sea el número de conteos registrados cuando se sustituye una muestra en blanco para determinar el nivel de fondo. Las cuentas netas resultantes de lo desconocido se calculan como,

$$N_S = N_T - N_B$$

Si asumimos que el tiempo de conteo es lo suficientemente largo como para que el número total de conteos registrados en cada una de estas mediciones sea grande (mayor a 30), entonces tanto N_T como N_B deberían seguir una distribución Gaussiana.

Caso 1. No hay actividad real presente

Para tomar la decisión sobre si la muestra contiene actividad o no, se establece un nivel crítico L_C . Si N_S es menor que L_C , se concluye que la muestra no contiene actividad, mientras que si N_S excede L_C , se supone que está presente alguna actividad real.

Dado que no hay actividad verdadera presente, cualquier indicación positiva será un falso positivo. Por lo tanto, queremos establecer un L_C lo suficientemente alto como para garantizar que, bajo estas condiciones, la probabilidad de que N_S exceda L_C sea aceptablemente pequeña. De tabla se sabe que la probabilidad de que una muestra aleatoria de una distribución Gaussiana tenga un valor dentro del intervalo, media $\pm 1.645 \cdot \sigma$ es del 90%. Ya que solo nos preocupan las desviaciones positivas de la media (los valores negativos de N_S siempre se interpretan como una ausencia de fuente), existe una probabilidad del 95% de que una muestra aleatoria se encuentre por debajo de la media más $1.645 \cdot \sigma$. Por lo tanto se puede establecer un valor de L_C que garantice una probabilidad de falsos positivos menor o igual al 5%. [6]

$$L_C = 2,326 * \sigma_{NB}$$

Caso 2. La actividad real está presente.

Ahora suponemos que el valor medio de N_S es un valor positivo (N_D), y cualquier conclusión de que no hay actividad es ahora un falso negativo.

Claramente, para valores medios de N_s iguales a L_c , la tasa de falsos negativos será del 50% (ver Figura 8) porque la distribución gaussiana es simétrica respecto a su media. Definiremos la MDA de actividad como la intensidad de la fuente necesaria para producir un valor medio de N_s que sea lo suficientemente alto como para reducir la tasa de falsos negativos a un nivel aceptable. De nuevo, una probabilidad de falso negativo del 5% se elige comúnmente como base.

Sea N_D el valor neto mínimo de N_s que cumple con este criterio. Por lo tanto, N_D se convertirá en una estimación numérica del número medio de conteos netos que corresponden a la MDA. Para garantizar que el 95% del área bajo la distribución de N_s esté por encima de L_c , requerimos que, [6]

$$N_D = 4,653 * \sigma_{NB} + 2,706$$

Esta es la "Ecuación de Currie".

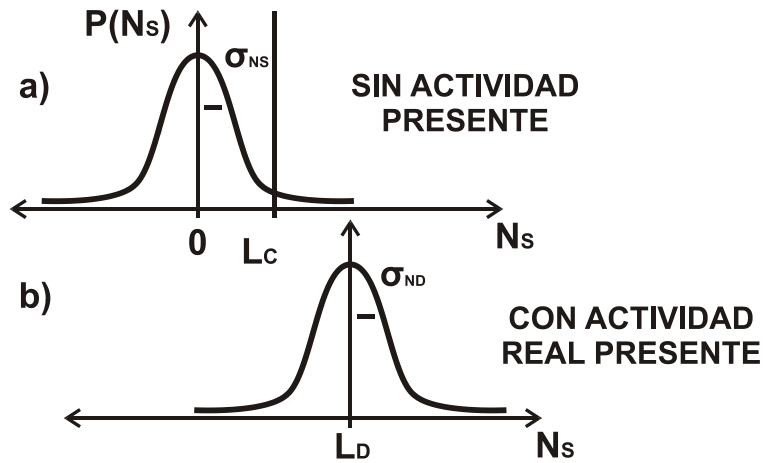


Figura 8: Las distribuciones esperadas para los recuentos netos N_s para los casos de (a) sin actividad presente, y (b) con actividad real presente.

Como la cadena de medición proporciona mediciones de tasa de conteo total (r_T) en cps es necesario hacer modificaciones a las ecuaciones anteriores.

No se puede asociar la desviación estándar σ con la raíz cuadrada de cualquier cantidad que no sea un número de conteos medido directamente. [6]

Por lo tanto la asociación no se aplica a tasas de conteo y debe aplicarse el siguiente criterio.

División por una constante: Si x cuentas se registran durante un tiempo t , entonces

$$r = \frac{x}{t}$$

El supuesto habitual es que el tiempo se mide con una incertidumbre muy pequeña, por lo que t puede considerarse una constante. Entonces se puede calcular la desviación estándar esperada en r correspondiente a la desviación estándar conocida en el número de conteos x .

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x}{t}$$

Si se tiene en cuenta la tasa de cuentas totales registradas por el detector durante un tiempo de medición t . Las expresiones anteriores resultan,

$$r = \frac{N_T}{t} \Rightarrow N_T = r * t \quad \wedge \quad \sigma_r = \frac{\sigma_{N_T}}{t} = \frac{\sqrt{N_T}}{t} = \frac{\sqrt{(r * t)}}{t} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{t}} \quad \begin{array}{l} N: \text{cuentas} \\ r: \text{tasa}[cps] \end{array}$$

Si sumamos el fondo ($B=N_B/t$), los limites para cuentas totales quedarían en,

$$r_{LC}[cps] = B[cps] + 2.326 \sqrt{\frac{B[cps]}{t_{medición}}} \quad \wedge \quad r_{LD}[cps] = B[cps] + \frac{2.706}{t_{medición}} + 4.653 \sqrt{\frac{B[cps]}{t_{medición}}}$$

El breve desarrollo de la estadística de conteo busca proporcionar herramientas para procesar datos reales de medición, observando cómo aplican los modelos estadísticos propuestos.

Aunque los valores de los umbrales de fuga todavía deben definirse, con el análisis de los límites de detectabilidad se da una idea del valor mínimo razonable que deberían tener.

Capítulo 3

3.1 Disposición de las cadenas de medición

Descripción del Sistema Adicional de Fugas del Agua del Moderador (SADFM)

El sistema se compone por dos subsistemas independientes de medición de actividad, para cada uno de los intercambiadores de calor del Moderador (ver Figura 9)

Cada subsistema cuenta con detectores de centelleo sólidos de Ioduro de Sodio (NaI) (ver 2.2) triplemente redundados, montados en soportes alrededor del caño del circuito secundario del intercambiador de calor.

Cada detector tiene asociado un Preamplificador (ver 2.2) que le proporciona energía para funcionar y conforma los pulsos que salen del detector. Los pulsos de los detectores llegan a 3 Ratemeter (ver 2.2) que cuentan los pulsos y transmiten esos datos generando una señal analógica compatible con la computadora de control de la CNE.

La selección, disposición y conexión de todos los equipos que integran el SADFM resultan del análisis de simulaciones, ensayos en Mockup, evaluación del equipamiento disponible en el mercado, optimización de la disponibilidad de la medición y restricciones debidas a la compatibilidad de las instalaciones preexistente en CNE.

Definición de señales y subsistemas del SADFM

Los nombres de las señales se definen en la siguiente tabla. La denominación se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en ISA-5.3-1983 y ANSI/ISA-5.1-2009.

Prefijo Señal	Descripción	Tipo señal	
RFT	Medición de actividad	Analógica 4-20mA	
YAR	Falla RM	Discreta. Contacto seco normal abierto, failsafe	1 = Cerrado, normal
			0 = Abierto, falla

Tabla 1: Definición de señales del SADFM.

Subsistemas.

- El Subsistema 100 está asociado a la cañería 30W72, la medición de actividad se denota RFT-100 y se expresa en cps. El Subsistema está compuesto por 3 detectores, RFT-101, RFT-102 y RFT-103.
- El Subsistema 200 está asociado a la cañería 30W73, la medición de actividad se denota RFT-200 y se expresa en cps. El Subsistema está compuesto por 3 detectores, RFT-201, RFT-202 y RFT-203.

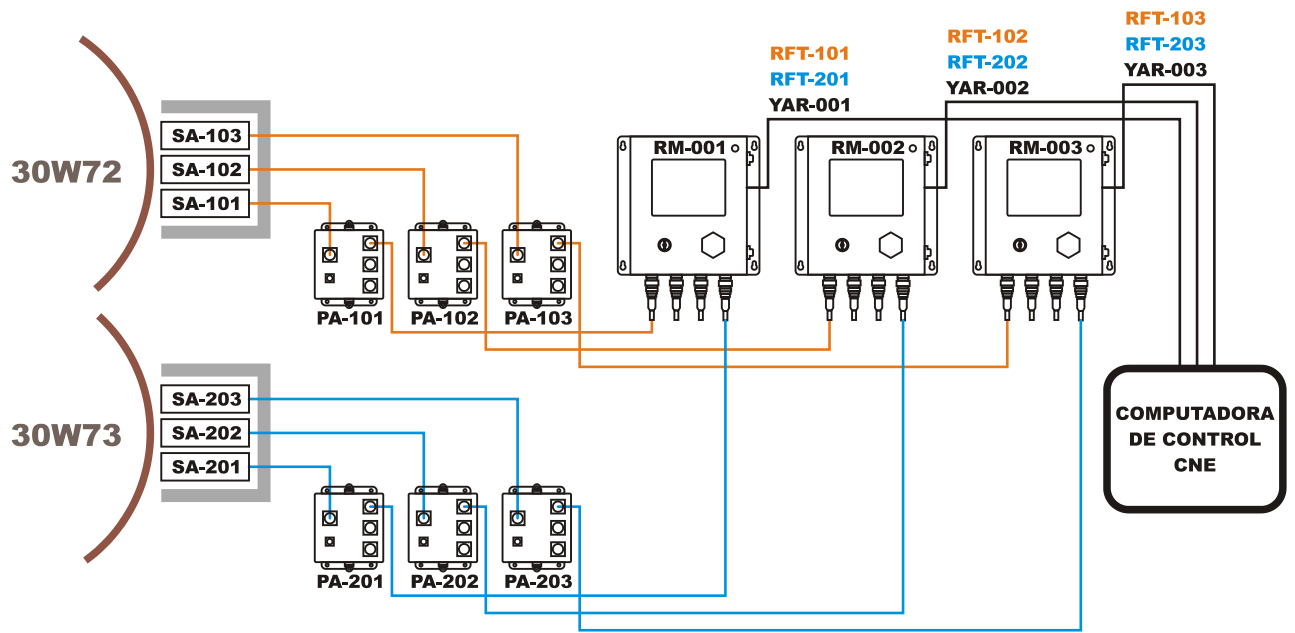


Figura 9: Arquitectura del SADFM.

Cada Ratemeter integra las cuentas de cada detector y genera una señal analógica de 4-20mA, el rango de la medición de actividad se configura desde su pantalla táctil utilizando la ecuación,

$$i_{OUT}[mA] = 4 + \frac{16}{d} \log \left(\frac{r[cps]}{s[cps]} \right) \quad \text{con} \quad \begin{matrix} d = 5 \\ s = 1 \end{matrix}$$

La configuración del rango de medición se fija en 5 décadas. Los valores límites quedan en 1cps=4mA y 100.000=20mA. La decisión de elegir este rango se fundamenta en la tasa máxima de fuga con reactor encendido y en los ensayos de laboratorio.

Información del fabricante y ensayos de laboratorio muestran que en caso de que las mediciones superen el valor máximo configurado (r_{max}), la corriente nunca superará los 20 mA. Y en caso de falla, la salida nunca será inferior a 4mA.

La computadora de control de la CNE convierte las señales de entrada analógica [mA] a señales de medición de actividad [cps] y aplica la lógica propuesta.

3.2 Evaluación de Lógicas

La Computadora de Control implementa una lógica 2 de 3 de cada subsistema. La lógica propuesta por CNEA tiene los propósitos de satisfacer el criterio de falla simple y aumentar la confiabilidad de la medición de actividad, de la generación de alarmas y el rechazo a la propagación de mediciones espurias.

Antes de evaluar las lógicas se definen los siguientes umbrales,

- UMBRAL_L. Valor de actividad en [cps] por debajo del cual se asume que el detector o el preamplificador asociado está en falla o con lectura errónea.

- UMBRAL_A. Valor de actividad en [cps] para reactor apagado, por encima del cual se asume que hay una posible fuga de agua pesada.
- UMBRAL_E. Valor de actividad en [cps] para reactor encendido, por encima del cual se asume que hay una posible fuga de agua pesada.

Estos valores de umbral se definirán en base a ensayos de planta y se ajustarán durante la puesta en marcha del Sistema.

Lógica propuesta para el SADFM

1. La computadora de control de la CNE evalúa la racionalidad/validez de las señales de medición de actividad de cada detector.

Una señal es racional/válida si es mayor al UMBRAL_L y si el Ratemeter asociado al detector no reporta falla.

Ejemplo para el Subsistema 100: RFT-101 es racional/válida si: $RFT-101 > UMBRAL_L$ y $YAR-001=1$

Antes de procesar la medición de un detector es necesario saber si el Ratemeter asociado no está en falla. La falla podría tener distintos orígenes,

- Interrupción de la energía eléctrica: como el lazo de corriente es activo, la falla no solo pondría en normal abierto al relé ($YAR-00X=0$, X: subsistema) sino que la medición de los dos detectores asociados sería 0mA.
- Desconexión de la señal de falla: Para asegurar que el sistema va a un estado seguro en caso de tener problemas con el cableado, se configura la señal de relé en normal abierto.
- Mediciones nulas: el Ratemeter da señal de falla cuando recibe una señal nula de algún detector por un período de tiempo determinado (configurable).

Si el Ratemeter funciona correctamente se procede a evaluar la medición del detector con el Umbral_L (debe definirse). Si la medición es menor al umbral, resulta prácticamente imposible (probabilidad muy pequeña) que la señal se corresponda a un valor normal de medición en las condiciones del sistema.

2. La medición de actividad para cada Subsistema se define como,
 - La mediana, si las tres señales de medición del conjunto son racionales/válidas. Para un conjunto de tres valores, la mediana es el valor central entre el máximo y el mínimo.
 - El máximo valor, si solo dos señales de medición del conjunto son racionales/válidas. Esto responde a tomar el valor más conservativo de las mediciones.
 - Incompetente, si solo una señal de medición del conjunto -o ninguna- es racional/válida. El SADFM entregará una medición válida ante falla simple (única) de alguno de los componentes que lo integran, con el objetivo de mejorar la disponibilidad de la medición aún en esas condiciones.

La mediana busca tomar un valor de medición real intermedio, descartando los valores muy altos o muy bajos por fluctuaciones estadísticas.

En caso de tener solo 2 mediciones válidas se toma el mayor valor, ya que es preferible dar una falsa alarma que no darla.

La medición incompetente implica que el sistema no puede funcionar (no resulta confiable) con una sola medición aun cuando sea válida, ya que existe una cierta probabilidad de que el detector este fallando. En este caso estaría fallando al menos 2 componentes del subsistema de medición y por eso resuelvo que se vuelve incompetente, esto es compatible con el requerimiento del criterio de falla única.

La disposición de los equipos en el SADFM asegura una medición válida ante una falla única. Si falla algún detector o su preamplificador asociado, el Subsistema de 3 detectores aun contará con 2 mediciones racionales/válidas.

Si en cambio falla un Ratemeter, se perderá la medición de los 2 detectores asociados a él. Como cada detector pertenece a un Subsistema, cada uno quedaría con 2 mediciones racionales/válidas.

Por estas razones solo se necesitan 3 Ratemeter para los 6 detectores.

3. Si la medición del Subsistema es competente, se compara la medición respecto a los umbrales de alarma, que responden al estado de potencia del reactor.

La medición competente significa que al menos 2 mediciones son válidas. Por lo cual se compara la mediana o el mayor entre dos mediciones al UMBRAL_A para reactor apagado o UMBRAL_E para reactor encendido. Si la medición resulta superior al umbral la lógica reportara alarma.

Los umbrales definen que es prácticamente imposible (probabilidad muy pequeña) que la medición del subsistema corresponda a un valor normal sin fuga.

4. La computadora de control reporta, mediante la visualización en Sala de Control,
 - Los resultados de la mediciones de actividad RFT-100 y RFT-200 para los casos de mediciones competentes.
 - El estado de alarmas ALARMA_SS100 y ALARMA_SS200 que alerta de posibles fugas del agua del de moderador en el agua de servicios.
 - La existencia de señales no válidas, indicando cuáles son esas señales y la condición que las vuelve no válidas. Esta información resulta útil para el diagnóstico de los componentes del sistema.
5. Se almacenan todas las variables definidas con fecha y hora.

Interpretación de la lógica propuesta

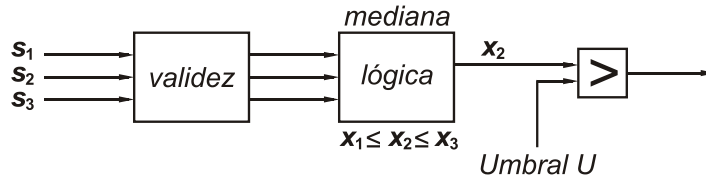
Caso 1: Lógica 2/3

Sean 3 señales válidas en un conjunto $S=\{s1, s2, s3\}$ y un umbral de disparo U .

Se aplica la mediana a los valores del conjunto S , es decir se ordenan en forma creciente y luego se toma el valor del medio de las tres.

Matemáticamente, aplicar la mediana implica armar el conjunto ordenado $X=\{x1, x2, x3\}$ donde se satisface $x1 \leq x2 \leq x3$ y luego elegir $x2$.

Luego, el algoritmo compara $x2$ con el umbral U para definir si se dispara una alarma o no.



Dos casos posibles:

- Si $x_2 > U$ entonces por propiedad transitiva x_3 también es mayor que U . Es decir, dos valores están por encima del umbral. Hay disparo 2 de 3.
- Si $x_2 < U$ entonces por propiedad transitiva x_1 también es menor que U . Es decir, dos valores están por debajo del umbral. No hay disparo con 2 de 3.

Conclusión: Utilizar la mediana permite satisfacer la lógica 2/3.

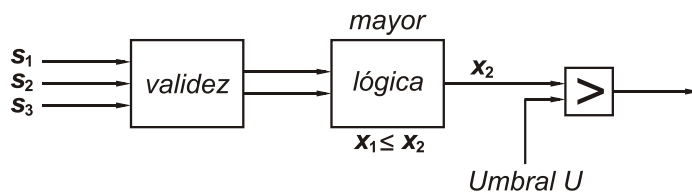
Caso 2: Lógica 1/2

Sean 2 señales válidas en un conjunto $S = \{s_1, s_2\}$ y un umbral de decisión U .

Se aplica la mediana a los valores del conjunto S , es decir se ordenan en forma creciente y luego se toma el valor máximo.

Matemáticamente, aplicar la mediana implica armar el conjunto ordenado $X = \{x_1, x_2\}$ donde se satisface $x_1 \leq x_2$ y luego elegir x_2 .

Luego, el algoritmo compara x_2 con el umbral U para definir si se dispara una alarma o no.



Dos casos:

- Si $x_2 > U$ entonces al menos una señal está por encima del umbral. Hay disparo 1 de 2.
- Si $x_2 < U$ entonces por propiedad transitiva x_1 también es menor que U . Es decir, dos valores están por debajo del umbral. No hay disparo.

Conclusión: Utilizar la mediana permite satisfacer la lógica 1/2.

3.3 Simulación de las Lógicas

Definido el procesamiento de las mediciones y conociendo la estadística involucrada en la medición de actividad, se puede analizar la lógica de votación propuesta mediante un programa que simule entradas, las procese y genere salidas.

Utilizando los tags de señales de la arquitectura propuesta (Figura 9), se realiza el programa de simulación en Labview.

Labview es un lenguaje de programación gráfico que fue desarrollado por National Instruments para ser utilizado típicamente en programas de adquisición, procesamiento y visualización de datos.

La parte fundamental de la simulación del SADFM es la programación de la lógica de votación de cada Subsistema, ya que será la misma que se aplique en la computadora de control de la CNE, independientemente del lenguaje de programación que se utilice.

Descripción del Sistema Adicional de Fugas del Agua del Moderador (SADFM)

En el código (ver Figura 10), se observan otros datos (string-rosa) que no responden a la lógica sino a información que se visualiza en la pantalla del operador (ver Figura 11).

Los datos de cada sub-sistema (RFT-X0Y, X=Subsistema Y=Detector) se ordenan en un vector (array 1D) que se procesa en un “For Loop” para determinar su racionalidad/validez.

Allí se compara cada valor con el Umbral_L y luego con un “AND” se verifica que el Ratemeter asociado a cada medición no se encuentra en falla. La salida de datos del “For Loop” es condicional y en caso de irracionalidad el valor se elimina del vector.

Las líneas naranjas más gruesas representan el flujo de datos del vector, las más finas un valor individual. Las líneas verdes continuas representan el flujo de un vector con valores “true or false”, las punteadas solo un valor individual (ver Figura 10)

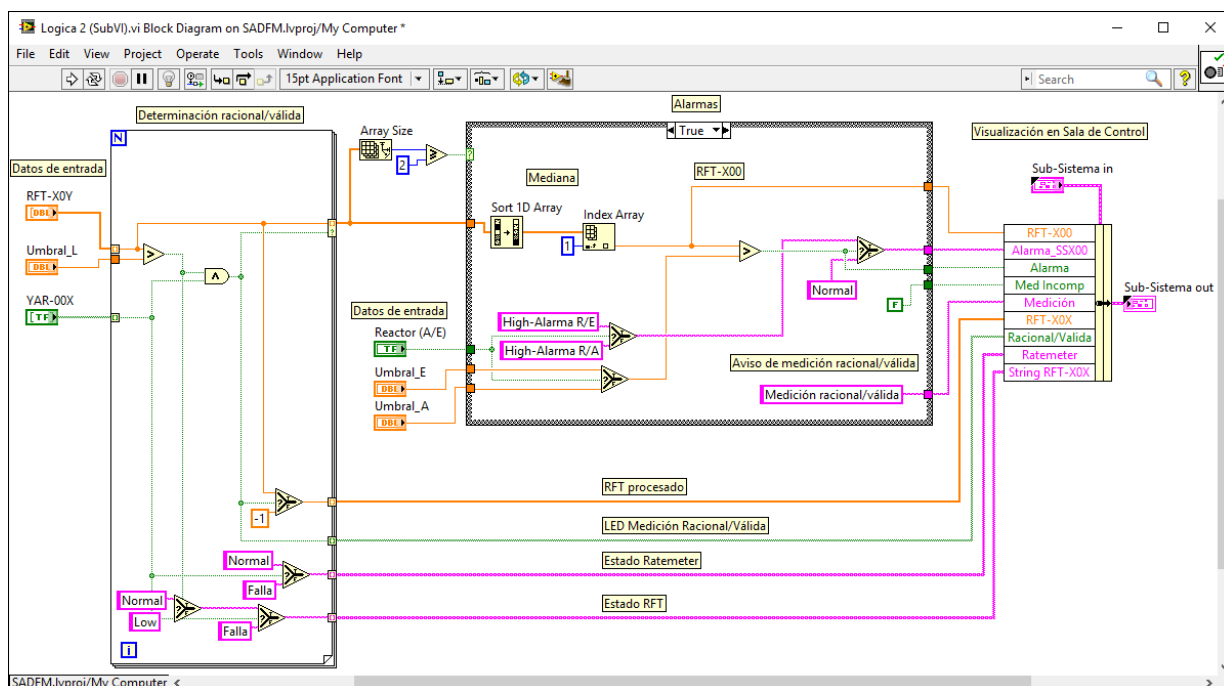


Figura 10: Diagrama de bloques para evaluación la lógica de votación en Labview.

Los datos de entrada corresponden a la adquisición de las 3 mediciones por subsistema, a las 3 señales discretas de falla de cada RM y al valor del UMBRAL_L. Cada medición se compara con el umbral L y en función del estado del Ratemeter se informa el estado de cada medición como normal, baja (“low”) o falla.

Si todos los datos son válidos, el tamaño del vector será 3 (>2) y se ejecutara el caso “true” en el “Case Structure”. Allí se ordenan los datos en forma creciente y se toma la mediana, que sale como RFT-X00 (X: subsistema). Se asigna un texto indicando que la medición resultó “Medición racional/válida”.

En función del estado del reactor se compara la mediana con el Umbral_A o E y se emite el mensaje de medición “normal” o “alarma” (High-Alarma R/E o A).

Si solo dos datos son válidos, se ejecutará el mismo caso del “Case Structure”, y ahora el valor utilizado es el mayor de los dos valores, que se compara con el umbral (A o E).

Si solo un dato es válido, se ejecutará el caso “false” del “Case Structure” y el valor RFT-X00 será -1 y se emitirá un mensaje de “medición incompetente”. Para el estado de alarma se asigna un texto indicando “error”.

Simulador

Para la simulación se realiza una “pantalla del operador” (ver Figura 11), que visualiza toda la información que podría verse en la sala de control y un “panel de control” (color ámbar, ver Figura 12) que ajusta las entradas del generador de datos.

El programa de simulación requiere un generador de datos, que en este caso, serán valores que siguen una distribución normal y que representan las mediciones de los detectores. El único parámetro necesario para generarlos es el valor de la media ($\sigma = \text{raíz}(\text{media})$).

La generación de datos simula valores de medición de actividad en [cps] provenientes de cada detector y un filtro que puede configurarse sólo en el Ratemeter (Filtro Time-mode). La computadora de control que adquiere los datos, no recibe ninguna señal extra que indique que filtro utiliza el Ratemeter.

En esta simulación sólo se tiene en cuenta el filtro Time-mode (promedio móvil) como una variable en la medición. Este filtro puede ahorrar recursos en la computadora de control y permitiría reducir la variabilidad en la medición.

Simulaciones

1. Visualización en “pantalla del operador” de las mediciones de cada detector.

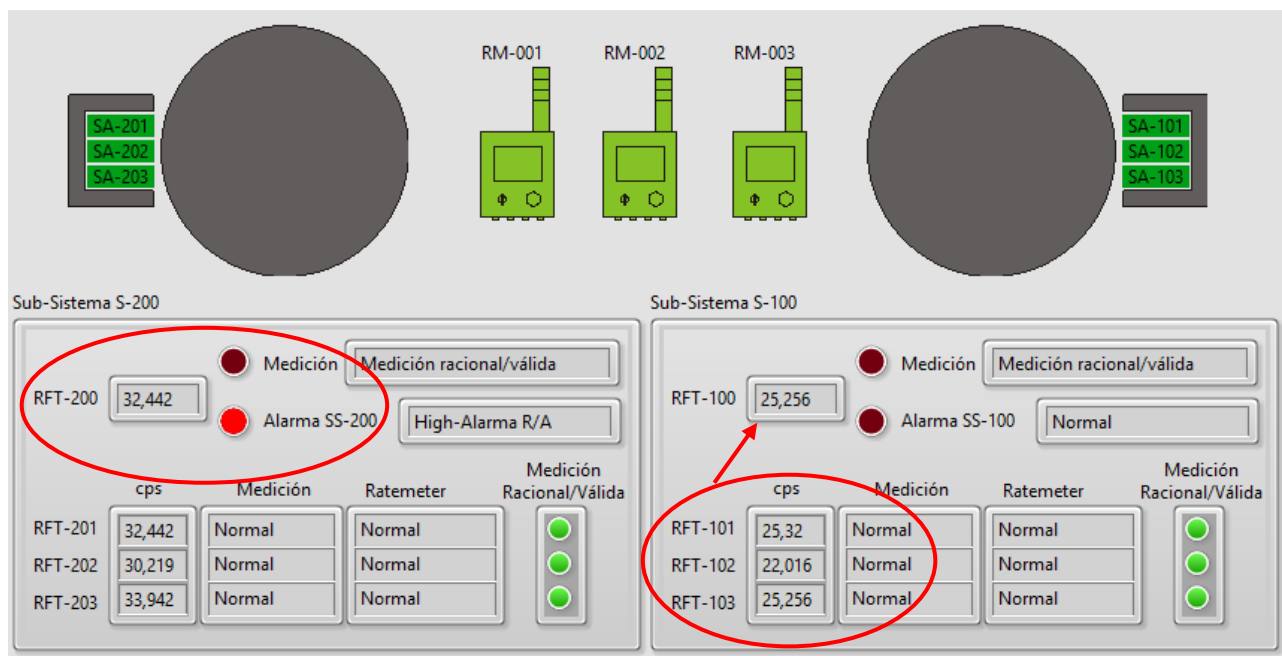


Figura 11: Pantalla del Operador. Evaluación de lógicas en Labview.

En la figura 11 se observan las mediciones de los 2 subsistemas y como el simulador toma la mediana de cada grupo y la visualiza en la parte superior.

Para cada subsistema se observa el estado de la medición (normal), los Ratemeter (normal) y si la medición es racional/válida.

Los Ratemeter tienen color verde para el funcionamiento normal y en rojo para el estado de falla (ver Figura 13), los detectores tienen verde para medición “racional/valida” y roja para lo contrario (ver Figura 15).

Se observa que en el subsistema 200 se activo la alarma porque la mediana supero el UMBRAL_A. (ver Figura 12)

Figura 12: Panel de Control de entradas. Evaluación de lógicas en Labview.

En el panel de control se definen las entradas para el generador de datos, el estado de cada Ratemeter (cada botón representa el estado de relé YAR), el estado de operación del reactor (encendido o apagado), los valores de fondo para cada estado y los umbrales L, A y E. Además se puede definir la configuración del filtro Time-mode del Ratemeter, con los parámetros de ancho de ventana (W) y el intervalo de adquisición del equipo.

2. Falla del Ratemeter. Lógica 2 de 3 y Medición incompetente.

Se prueba la lógica con la falla del Ratemeter 1. Los detectores asociados indican falla y se visualiza que cada detector cambio a calor rojo al igual que el Ratemeter. Con sólo dos mediciones la lógica toma el mayor e indica que la medición es racional/válida. (ver Figura 13).

Cuando la falla se extiende a 2 Ratemeter, la medición para cada subsistema se declara incompetente y el estado de alarma indica error (ver Figura 14).

3. Medición que no supera el UMBRAL_L.

Si la medición es menor al umbral, se visualiza medición baja (“Low”) y no se tiene en cuenta en la elección de la mediana. Si existen 2 mediciones que no superan el umbral_L el sistema se declara incompetente (ver Figura 15).

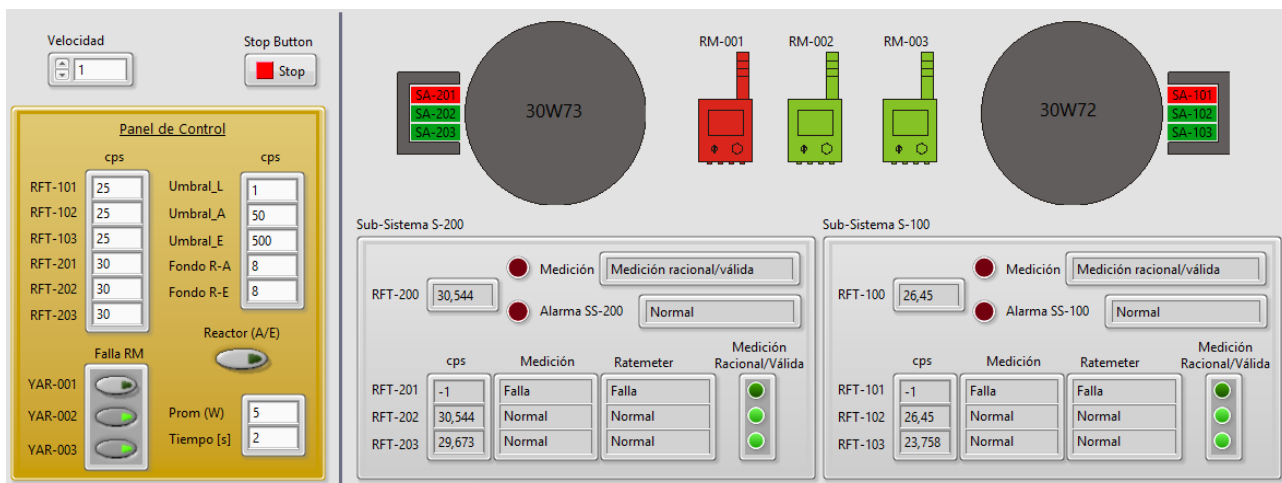


Figura 13: Falla del Ratemeter 1 (RM-001). Lógica 2 de 3.

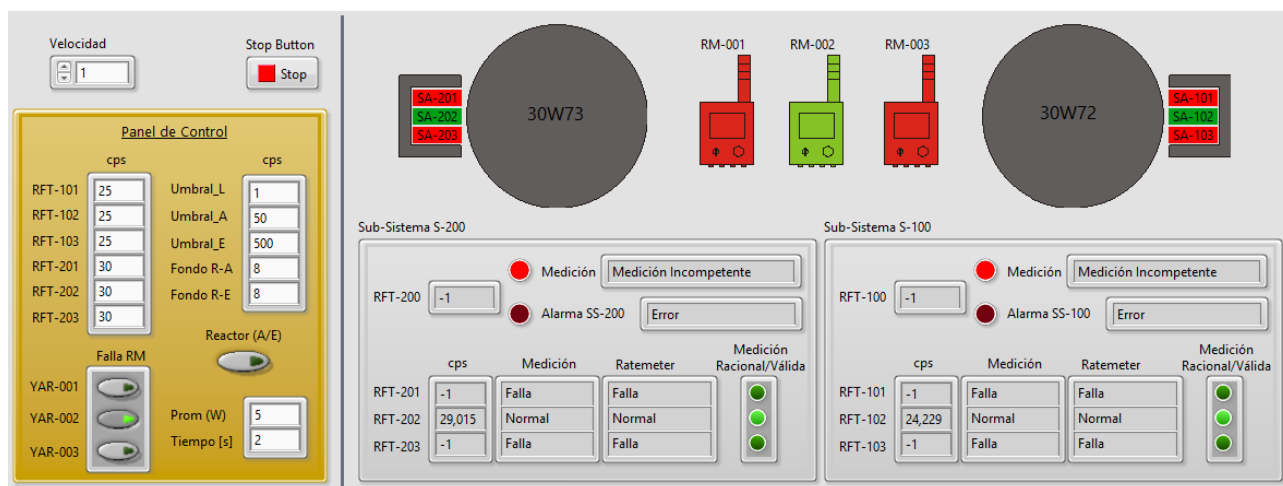


Figura 14: Falla del Ratemeter 1 y 3 (RM-001 y 003). Medición Incompetente.

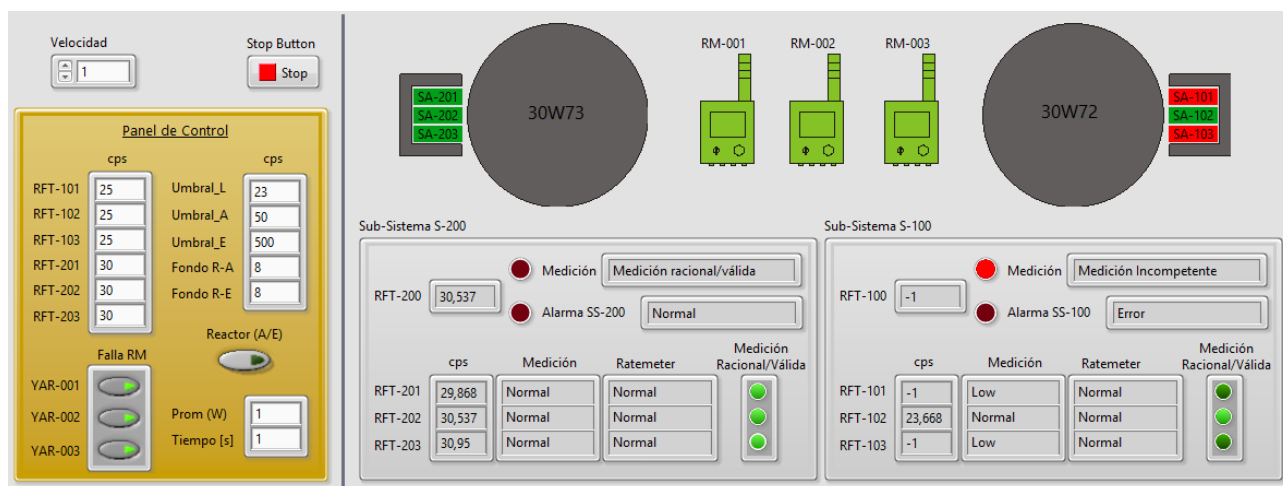


Figura 15: Medición menor al UMBRAL_L. Medición Incompetente.

4. Efecto de la configuración del filtro Time mode en el Ratemeter.

Para analizar el efecto en la medición se agregan al simulador gráficos de tendencia.

En los gráficos de detectores (RFT-20X y RFT-10X) se visualizan las mediciones de los tres detectores, color azul para el primero, roja para el segundo y gris para el tercero.

En los gráficos de subsistema (RFT-200 y 100) se visualizan la mediana, la media, los Umbrales A/E y L y los límites de detectabilidad rLC y rLD (ver Capítulo 2). Los límites permitirán establecer valores de prueba para los umbrales.

Si se aumenta el tiempo de medición podría contar (integrar) más pulsos en mayor cantidad de tiempo. La medición minimizaría las fluctuaciones estadísticas en relación a,

$$\sigma_r = \frac{\sigma_c}{t} = \frac{\sqrt{c}}{t} = \frac{\sqrt{(r * t)}}{t} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{t}} \quad \begin{array}{l} c: \text{cuentas} \\ r: \text{tasa}[cps] \end{array}$$

Como el tiempo de medición cambia, los umbrales rLC y rLD disminuirán (ver Capítulo 2).

Sin embargo la computadora de control adquiere datos cada 2s, por lo cual si se simulara un tiempo de integración de 10s, el operador observaría cambios en la medición cada 10s y los gráficos serían como “escalonados” ya que habría 5 datos seguidos prácticamente iguales (ver Figura 16).

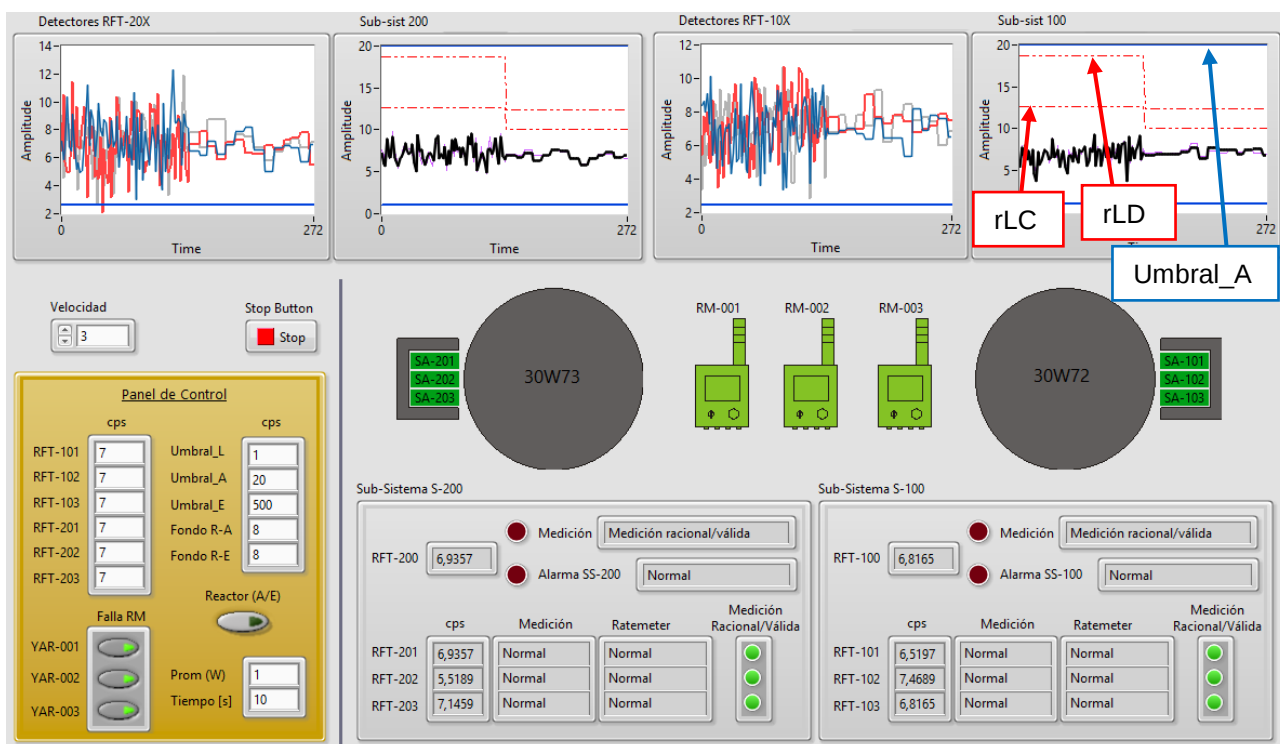


Figura 16: Cambio en la variabilidad al cambiar el tiempo de integración de 2s a 10s.

Con el promedio móvil podría tener el mismo cambio en la variabilidad de las mediciones. Para un ancho de ventana $W=5$ y un tiempo de integración de 2s el desvío estándar es igual al calculado anteriormente (ver Figura 17).

$$\sigma_r = \frac{\sigma_c}{\sqrt{W}} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{t} \cdot \sqrt{W}} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{t \cdot W}} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{2 * 5}} \quad \begin{array}{l} c: \text{cuentas} \\ r: \text{tasa [cps]} \end{array}$$

Como el SADFM debe dar alarma lo más rápido posible, sería conveniente utilizar un tiempo de integración similar al de adquisición de datos de la computadora de control.

La configuración de W y el tiempo de integración se determinarán en la puesta en marcha del SADFM. Cabe destacar que dichos valores deberán adecuarse a las 2 condiciones de fuga posible (reactor encendido y apagado).

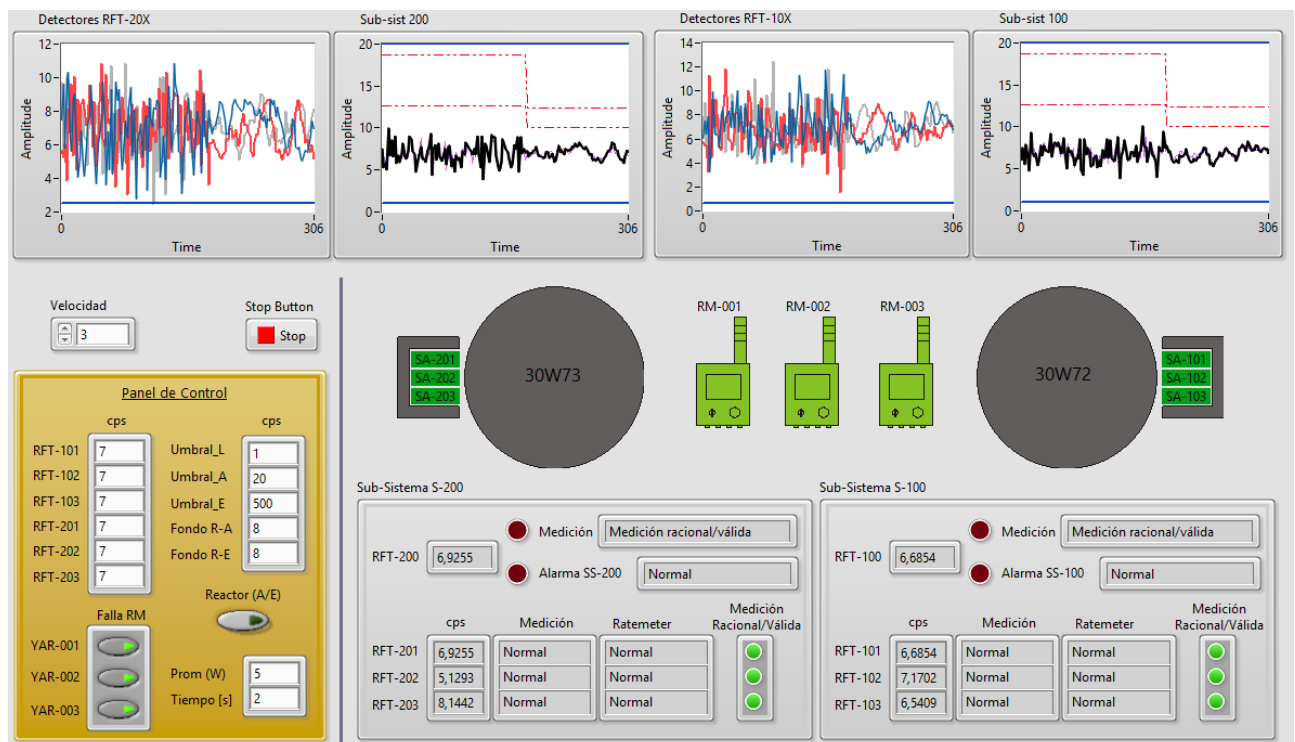


Figura 17: Cambio en la variabilidad al cambiar el ancho de ventana W de 1 a 5.

Capítulo 4

4.1 Validación del sistema a implementar: Sistema de adquisición

Para la validación del SADFM se realizaron ensayos con todas las cadenas de medición dispuestas en la configura

ción analizada en el capítulo anterior. Para lograrlo se desarrolló un Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos, que visualiza, procesa y almacena los datos provenientes de cada Ratemeter (ver Figura 18 y 19).

Los ensayos buscan,

- Poder aplicar la estadística de conteo a datos reales.
- Determinar el efecto del blindaje en la medición de actividad, en el rango de medición del detector.
- Verificar la operatividad de cada una de las cadenas de medición mediante la visualización local y remota de actividad.
- Verificar la operatividad del sistema ante distintos tipos de falla.

El sistema de adquisición se compone de la siguiente manera.

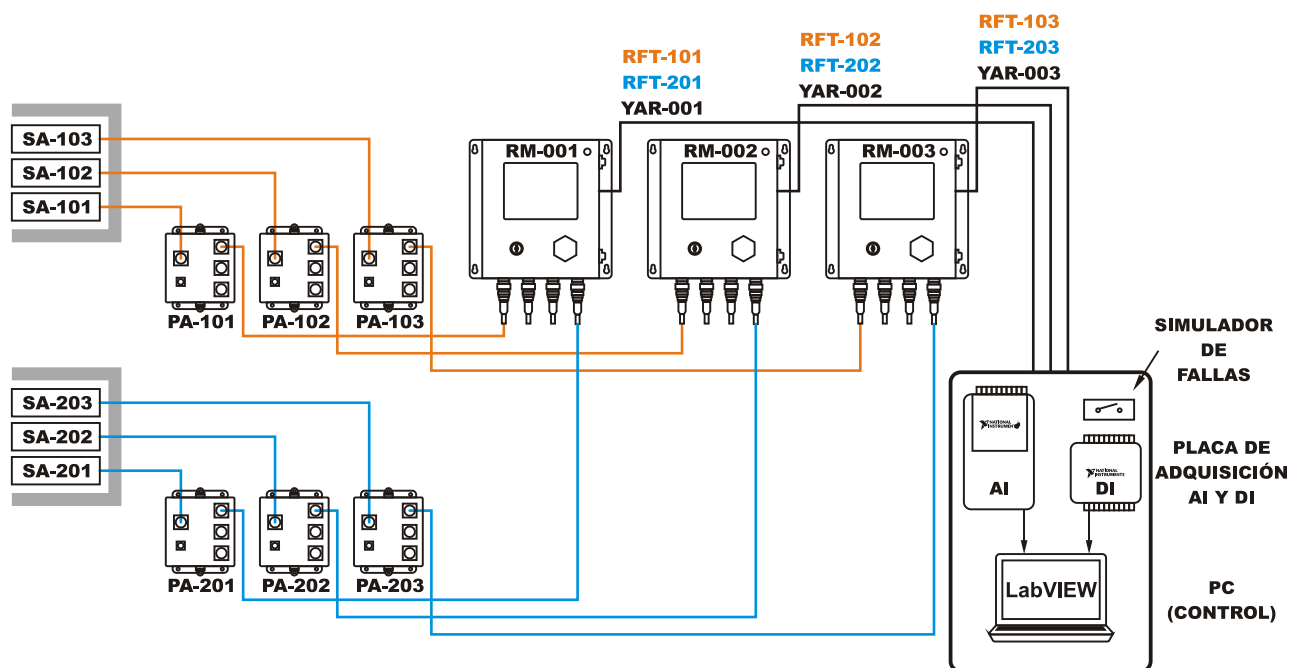


Figura 18: Esquema del Sistema de adquisición.

Labview permite modificar fácilmente el simulador para poder adquirir datos de las placas de adquisición (de National Instrument). La configuración de las placas se puede lograr mediante bloques de configuración.

Como los datos de varios ensayos fueron obtenidos utilizando un programa de adquisición más completo, en esta parte de validación del sistema se procede a leer con el simulador las mediciones almacenadas por dicho programa.

Las mediciones y cálculos fueron visualizados de forma online y almacenados en archivos compatibles con Excel (formato TDMS nativo de Labview).

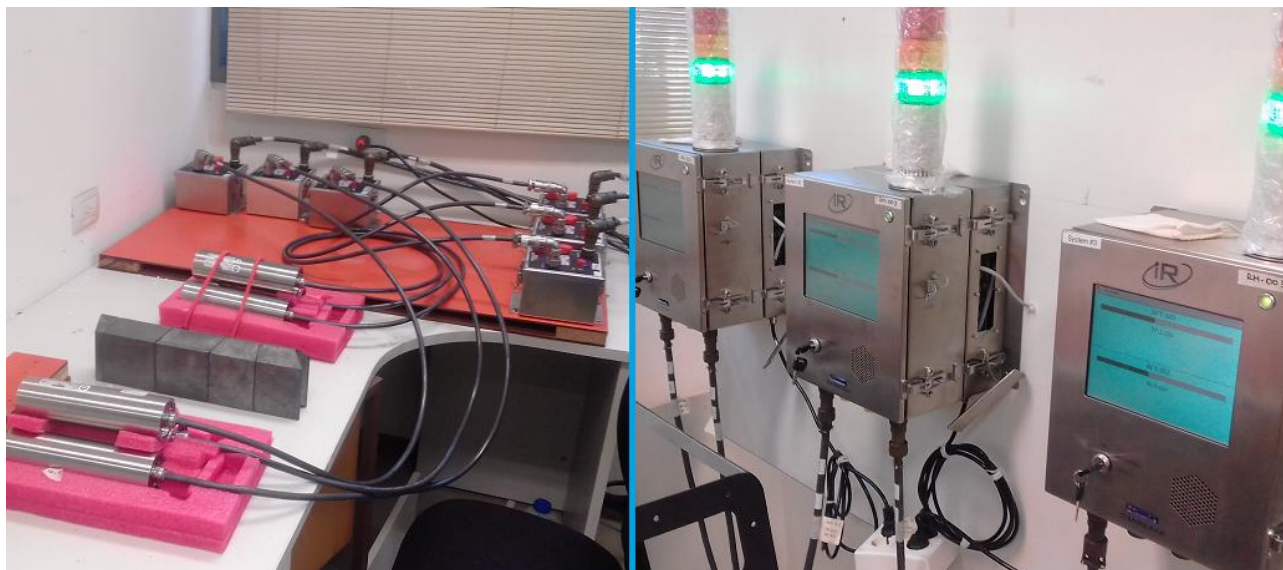


Figura 19: Sistema de adquisición en Laboratorio de CNEA-CAC.

A continuación se procede al procesamiento y análisis de estos archivos para obtener datos operativos del SADFM.

4.2 Mediciones de fondo

Medición de fondo en laboratorio con blindaje lateral y frontal y sin filtro de datos

El ensayo consiste en medir fondo natural con 3 detectores sin blindaje (Sub-sistema RFT-100) y 3 detectores con blindaje (Sub-sistema RFT-200) (ver Figura 19 y 20). El Ratemeter proporciona mediciones sin filtro y con un tiempo de integración de 10 s.

Como se trata de una medición de fondo, se procede a analizar los datos en una hoja de cálculo para ver en detalle los gráficos y el efecto del blindaje en las mediciones.



Figura 20: Sistema de adquisición.

Laboratorio CAC 2018/09/13- 17:22 hs

Datos 939

Duración: 2181 s

Detector	Media	Max	Min	S
RFT-101	3,777	5,824	2,351	0,604
RFT-102	3,606	5,579	2,002	0,673
RFT-103	4,078	6,065	2,469	0,685
RFT-201	55,802	61,770	49,616	2,530
RFT-202	59,131	66,186	53,362	2,606
RFT-203	59,593	66,664	52,406	2,520

Mediana

RFT-100	3,807	5,540	2,469	0,464
RFT-200	58,378	63,514	53,498	1,864

Media

RFT-100	3,820	5,105	2,548	0,403
RFT-200	58,175	63,174	54,275	1,480

Si las mediciones siguieran una distribución Gaussiana

↓

$x = x_e$	σ	$S/\sigma * 100$
0,615	0,615	98,211
0,600	0,600	112,078
0,639	0,639	107,271
2,362	2,362	107,117
2,432	2,432	107,153
2,441	2,441	103,209

	con blindaje	sin blindaje
Fondo asumido [cps]	5	60
Tiempo de med [s]	10	10
Umbral r LC	65,698	6,645
Umbral r LD	71,668	8,561

Tabla 2: Resultados de la Medición de fondo en laboratorio con blindaje lateral y frontal y sin filtro de datos.

Se aplico la estadística de conteo expuesta en el capítulo 2 a las mediciones reales.

La estadística de conteo aplicada no busca controlar el funcionamiento normal de los equipos, ya que excede los alcances de este trabajo y además los equipos cuentan con una calibración de fábrica. La idea es mostrar con datos reales como se ajustan las mediciones al modelo propuesto en el Capítulo 2 (ver Figura 7).

Para los detectores del Subsistema 200 (RFT-201 al 203), se observa que las medias de cada detector están entre 55,8 y 59,5 cps, lo cual significa una diferencia máxima del 6,8%. Análogamente para el subsistema 100 la diferencia es del 13,1% (ver Tabla 2). Esto puede atribuirse a la disposición de los equipos, los detectores actúan como un blindaje respecto del otro, y a una diferencia en la eficiencia de cada detector, que el fabricante expone en la hoja de calibración.

La diferencia entre el desvío muestral (S) y el desvío poblacional (σ : valor esperable) es entre 2 y 12%, lo que muestra como ajustan las mediciones reales con el modelo estadístico propuesto (Gaussiano). También podría ser un indicio de cómo varían las mediciones reales con respecto a las simulaciones.

Con los resultados de más de 10min de mediciones se elige un valor de fondo conservativo de $B=60$ cps para establecer los límites rLC y rLD. Como se analizo en el Capítulo 2, los límites solo aplican a un solo detector.

Como la generación de alarmas depende de la mediana, no se puede aplicar el concepto de rLD en la medición, pero su valor da una referencia para dichos umbrales.

Con los datos del ensayo se calculó que valores tendrían las mediciones de cada subsistema si se utiliza la media en lugar de mediana. Los resultados no difieren demasiado, pero muestran respecto a las mediciones de cada detector una gran reducción de la variabilidad. En el caso de la mediana para el subsistema 100, el desvío resulta $s=0,464$ mientras que para los detectores individuales el valor oscila entre 0,604 y 0,685 (ver Tabla 2).

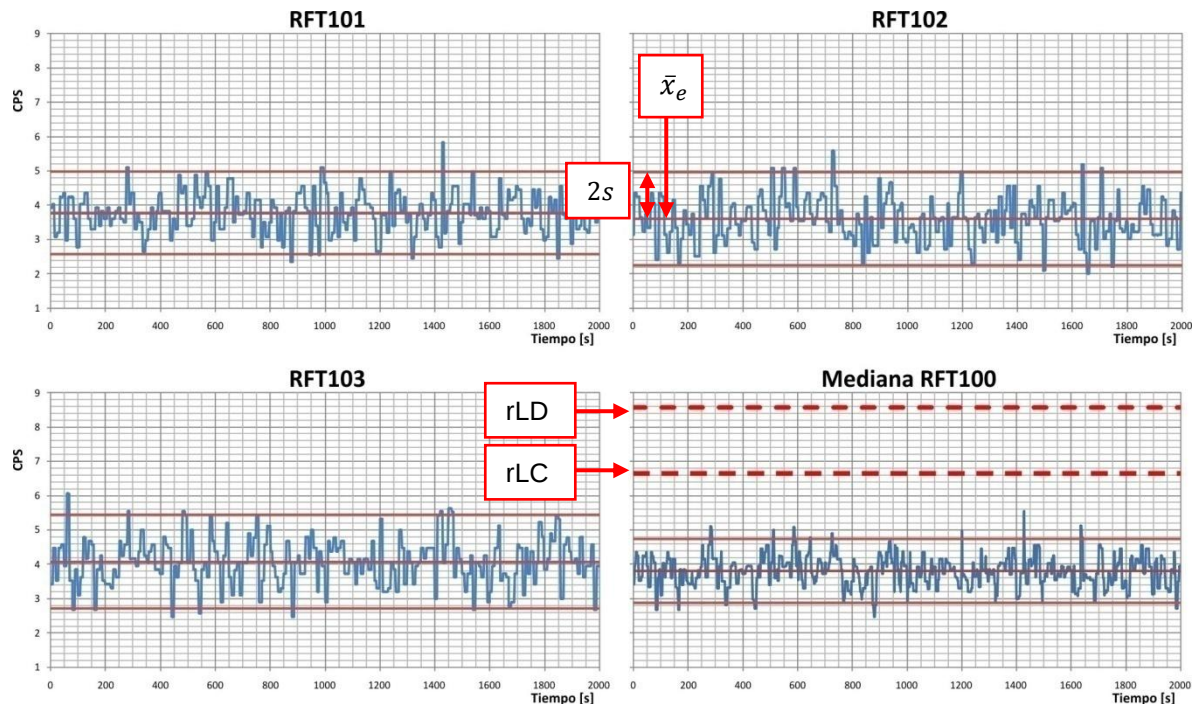


Figura 21: Evolución temporal del Subsistema 100. Medición de fondo en laboratorio.

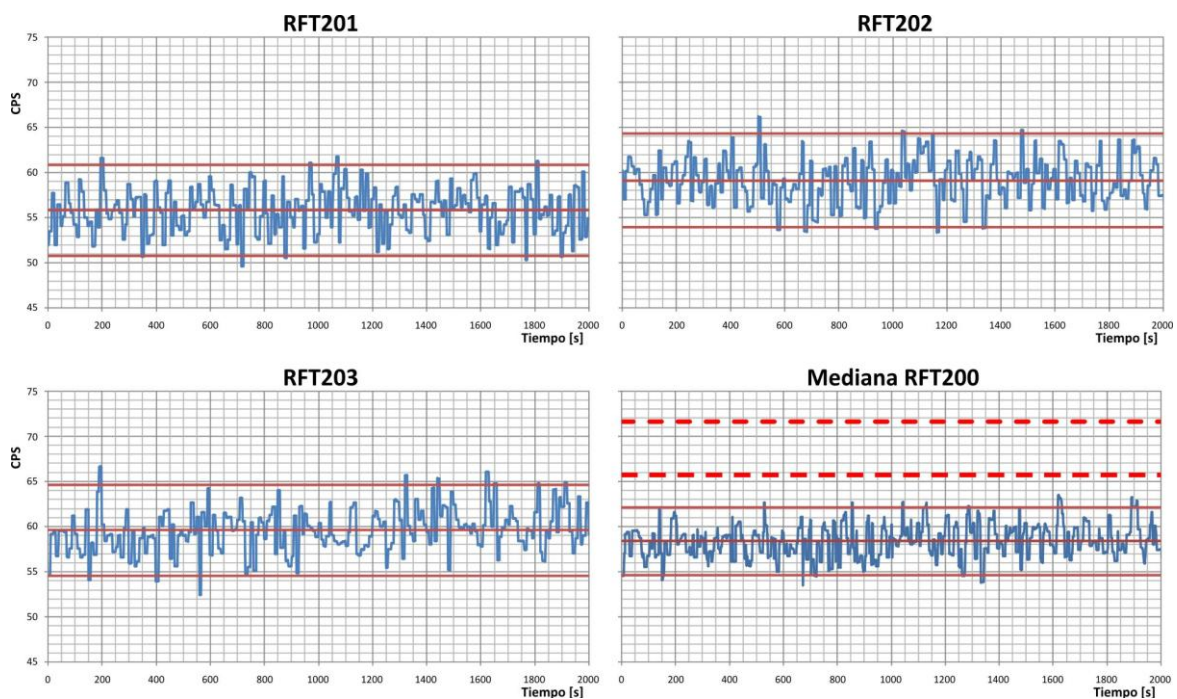


Figura 22: Evolución temporal del Subsistema 200. Medición de fondo en laboratorio.

La evolución temporal de los detectores sin blindaje muestra una variación como “escalonada”, esto se debe a la diferencia entre la ventana de integración y el período de adquisición explicado en el Capítulo 3 (ver Figura 21 y 22). El Ratemeter actualiza la medición cada 10s pero se adquiere cada 2s, por lo que en la tabla de datos aparecen 5 datos prácticamente iguales (la pequeña diferencia se da por el ruido de la señal).

Analizando la mediana entre los subsistemas, se observa que el blindaje (50mm de Pb) puede atenuar la radiación gamma (en el intervalo de 70keV a 2,55MeV) de fondo en más de 15 veces ($58,378/3,807=15,33$). Esta atenuación permite límites de detección más bajos y aislar el sub-sistema de la presencia de actividad ocasional externa en la sala de servicios.

El ensayo explica la importancia del blindaje en los detectores, con un menor fondo puedo detectar más fácilmente una fuga.

Medición de fondo en CNE con blindaje lateral y con filtro de datos

El ensayo se realiza con el SADFM instalado en planta en su configuración definitiva. Se mide fondo natural con los 6 detectores (Sub-sistema RFT-100 y Sub-sistema RFT-200) blindados (ver Figura 23). Los Ratemeter proporcionan mediciones con un tiempo de integración de 2 segundos y un filtro de promedio móvil de ancho de ventana $W=5$.

En la Figura 23 se observa que cada cadena a través de su Ratemeter tiene visualización local del valor de actividad on-line, lo que permite verificar la operatividad de la cadena. También permite realizar modificaciones en su configuración y ajustes durante la puesta en marcha.

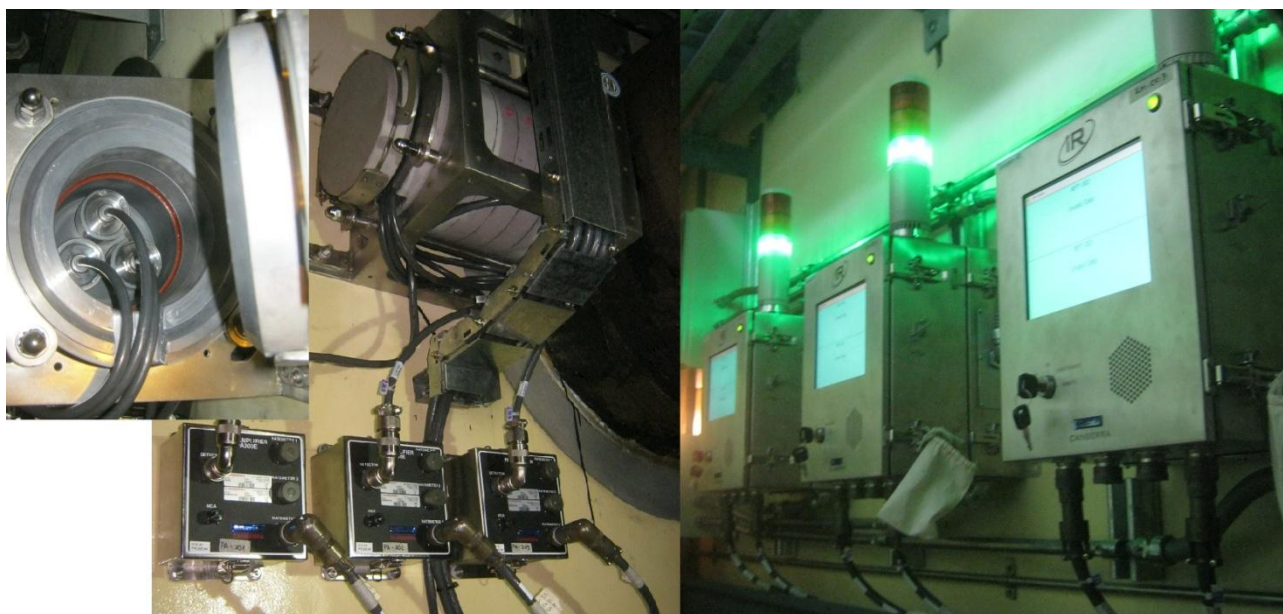


Figura 23: Instalación definitiva del SADFM en CNE.

Datos 488
Duración: 994 s

Detector	Media	Max	Min	S
RFT-101	5,879	7,565	3,438	0,750
RFT-102	5,725	9,178	3,758	0,755
RFT-103	6,156	8,297	4,176	0,823

Valor esperable

$x = x_e$	σ
0,767	0,767
0,757	0,757
0,785	0,785

RFT-201	6,412	8,780	4,357	0,778
RFT-202	6,122	8,957	3,949	0,792
RFT-203	6,065	8,254	3,573	0,875

0,801	0,801
0,782	0,782
0,779	0,779

Mediana

RFT-100	5,931	7,916	4,486	0,555
RFT-200	6,194	8,028	4,547	0,537

Media

RFT-100	5,920	7,798	4,715	0,480
RFT-200	6,200	7,862	4,868	0,479

	con blindaje
Fondo asumido [cps]	7
Tiempo de med [s]	10
Umbral LC	8,946
Umbral LD	11,164

El promedio de las medianas confirma un fondo de 6 cps en el recinto donde se instaló el SADFM. Lo que resulta más favorable que la condición de fondo esperable de 8 cps.

Aunque la ventana de detección está libre, se puede observar en los datos el efecto blindante del caño de 30 pulgadas con agua de servicios. Respecto del ensayo anterior, cuya mediana del sub-sistema RFT-100 es 3,8 cps, el caño resulta comparable con el blindaje de 50mm de Pb utilizados en las mediciones de laboratorio.

4.3 Prueba LED del detector y falla de Ratemeter

Prueba con LED interno en laboratorio, con blindaje lateral y frontal y con filtro de datos

El ensayo consiste en medir fondo natural con los 6 detectores con su blindaje correspondiente y utilizar la prueba LED de los detectores RFT-101 y 102 para simular una medición espuria en el sub-sistema 100. El test LED se configura en 1500 cps desde el Ratemeter y las mediciones tienen un tiempo de integración de 2 segundos y un filtro de promedio móvil de W=5

Utilizando los datos del ensayo anterior se configura en el simulador un fondo de 7cps, un UMBRAL_A = 20cps (mayor a rLD) y un UMBRAL_L = 2 cps.

El valor del UMBRAL_L se eligió proponiendo que las cuentas de fondo siguen una distribución gaussiana y que existe una probabilidad menor al 3% que una medición sea menor a dicho umbral.

En los gráficos de tendencia se evalúa también el uso de la media en la lógica de votación.

Cuando se activa el test LED (ver Figura 24) se observa como la medición RFT-101 en el gráfico de tendencia cambia abruptamente y marca un valor en torno a las 1600cps. Al utilizar la mediana en la lógica el subsistema 100 no reporta alarma.

Solo cuando se activa el LED del RFT-102 la mediana (ver Figura 25) presenta una medición que supera el UMBRAL_A y por consiguiente el sistema lo reportaría como una alarma de fuga.

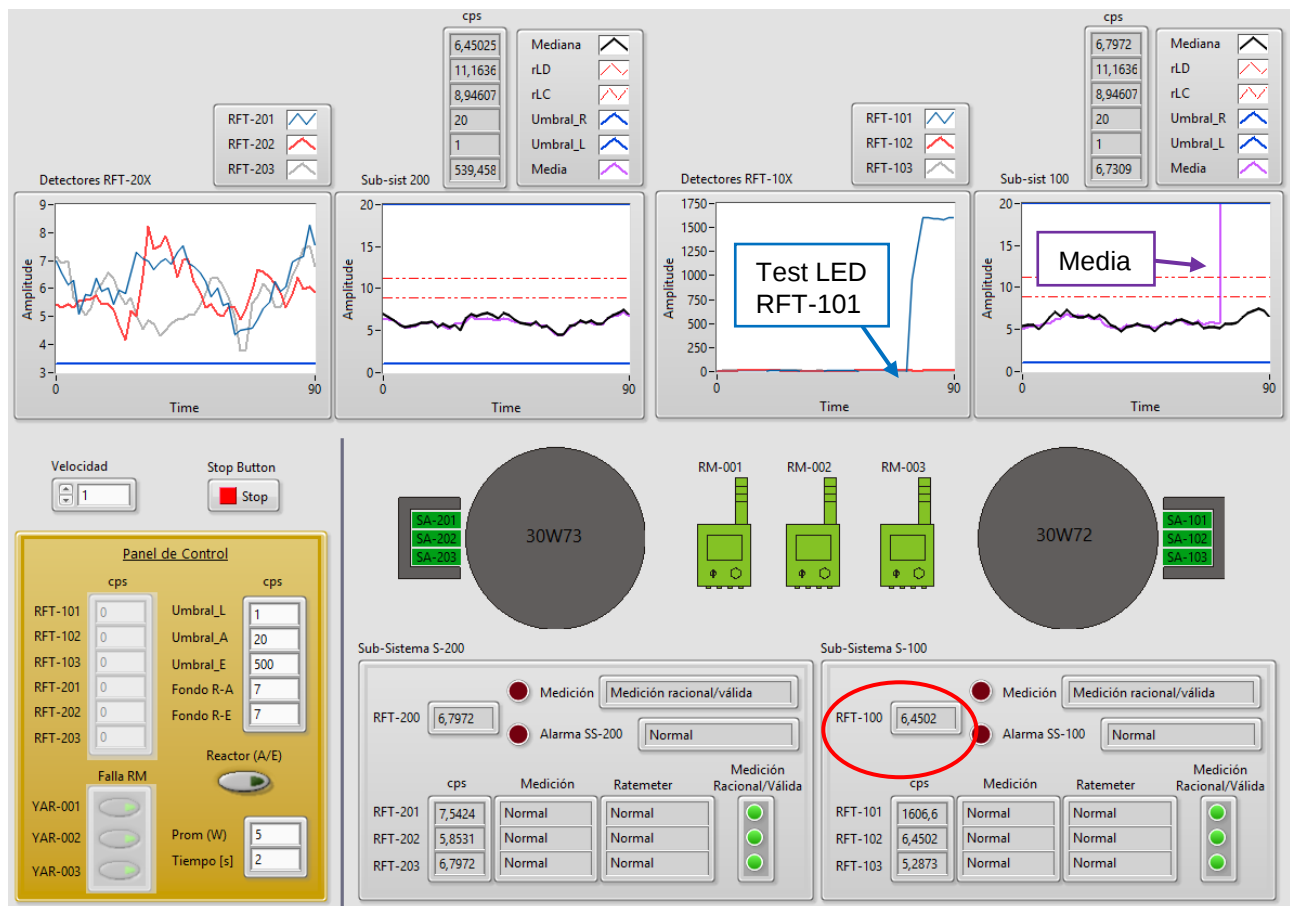


Figura 24: Ensayo LED del detector SA-101.

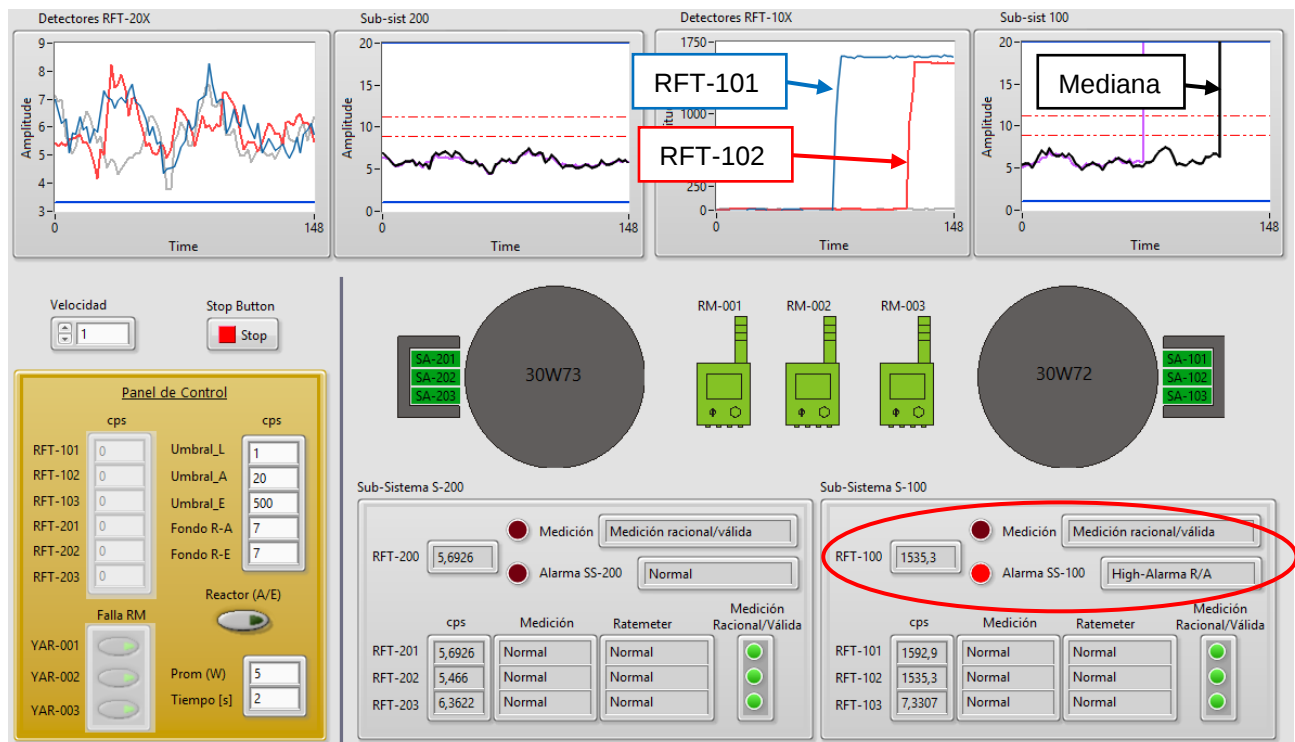


Figura 25: Ensayo LED del detector SA-102.

En el grafico de tendencia puede verse el efecto de haber utilizado la media (línea morada, ver Figura 24) en lugar de la mediana. El sistema si reportaría alarma ya que el promedio de las 3 mediciones resulta superior al Umbral de alarma establecido. También se deduce que si existe una fuga 2A y 1 de los detectores falla, dando mediciones muy bajas, la media aunque reporte fuga seria menor a la real.

Prueba con LED y falla de Ratemeter en CNE con blindaje lateral y con filtro de datos

El ensayo se realiza con el SADFM instalado en planta en su configuración definitiva, y se mide fondo natural con los 6 detectores (Sub-sistema RFT-100 y Sub-sistema RFT-200) blindados (ver Figura 23). Se utiliza el test LED para simular medición espuria en los detectores RFT-201 y 202. Luego se apagan (llave en off) los Ratemeter 002 y 003 para simular una falla.

Los Ratemeter proporcionan mediciones con un tiempo de integración de 2 segundos y un filtro de promedio móvil de ancho de ventana W=5.

El test LED tiene un efecto en el Subsistema 200 análogo al analizado en el Subsistema 100 del ensayo anterior. Al igual que el uso de la media y la mediana en la lógica.

Al apagar el Ratemeter 003 (ver Figura 26), las señales analógicas correspondientes a las mediciones de los detectores asociados, se vuelven 0mA y las cuentas llegan a valores próximos a cero. Como los detectores pertenecen a subsistemas diferentes la medición de cada subsistema es competente.

Cuando se apagan los Ratemeter 002 y 003 (ver Figura 27), los 2 subsistemas se declaran incompetentes y el estado de alarma marca error. La medición no resulta confiable.

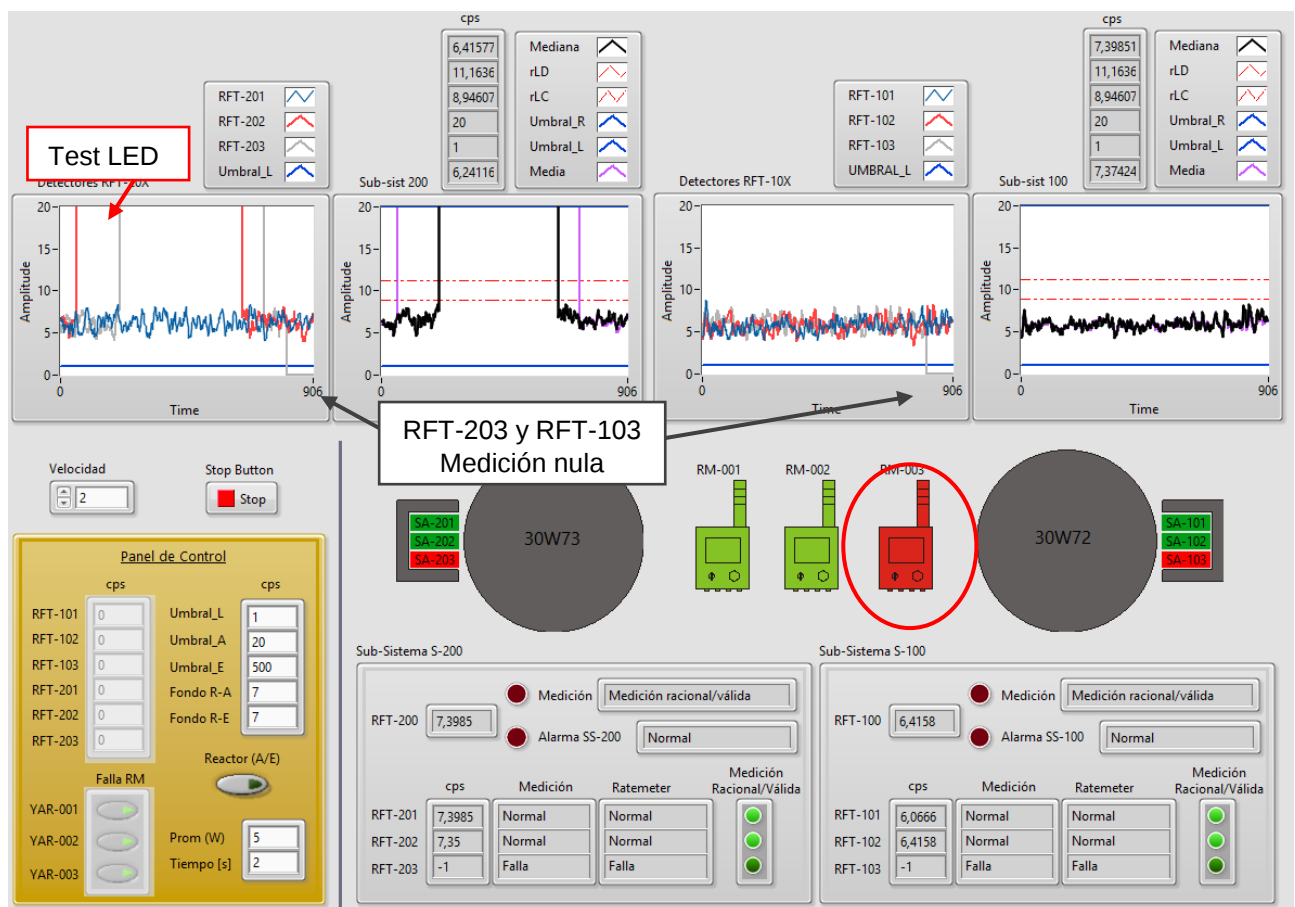


Figura 26: Ensayo Falla Ratemeter 003.



Figura 27: Ensayo Falla Ratemeter 002 y 003.

Conclusiones

Los ensayos realizados con el simulador adaptado a la adquisición de datos reales, permitieron comprobar que los componentes del Sistema Adicional de Medición de Fugas del Moderador y la lógica propuesta para votación de la redundancia funcionan adecuadamente y de acuerdo a lo previsto.

Asimismo la implementación de la mediana en la lógica de votación cumple la lógica 2 de 3 cuando hay 3 señales válidas y 1 de 2 cuando algún componente esta en falla, cumpliendo con el criterio de falla única.

Los ensayos no sólo permitieron comprobar el funcionamiento de todos los equipos, sino que aportaron datos reales de fondo para diversos lugares. Los datos demuestran que el recinto donde se instaló el SADFM tiene una tasa de fondo comparable al que se midió en el laboratorio de CNEA-CAC.

Se verificó que el blindaje reduce el nivel de fondo a valores menores a los esperados, permitiendo reducir el valor del umbral y detectar fugas más pequeñas.

También se logró medir la reducción de la variabilidad por la utilización de la mediana en la implementación de la lógica propuesta. Y como influye la configuración del filtro de promedio móvil en el Ratemeter.

Bibliografía

- [1] Izraelevitch, Centelleadores. 2012.
<http://instrumentacion.ecfm.usac.edu.gt/escaramujo/documentos/izraelevitch.pdf>
- [2] Model MD55EV1 Extended Range Scintillation Detector. Canberra Industries Inc. 2005.
- [3] PA300E Preamplifier-User's Manual. Canberra Industries Inc. 2009.
- [4] iR7040 Intelligent Ratemeter-User's Manual. Canberra Industries Inc. 2012.
- [5] Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, 2010.
- [6] IN-CAP-002-004. Procesamiento de mediciones, lógicas de decisión y alarmas del SADFM.
- [7] IN-CAP-001-003. Ensayo operativo de cadena de medición gamma para mockup del SADFM.