

# Uso de Nuevas Tecnologías para el Diseño, Modernización y Automatización de Sistemas y Procesos Relacionados con Aplicaciones Nucleares

*Informe técnico de la reunión de expertos,  
27–29 de enero de 2014, La Habana, Cuba*



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

USO DE NUEVAS TECNOLOGIAS PARA  
EL DISEÑO, MODERNIZACIÓN Y  
AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS Y  
PROCESOS RELACIONADOS CON  
APLICACIONES NUCLEARES

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

|                        |                     |                       |
|------------------------|---------------------|-----------------------|
| AFGANISTÁN             | FEDERACIÓN DE RUSIA | OMÁN                  |
| ALBANIA                | FIJI                | PAÍSES BAJOS          |
| ALEMANIA               | FILIPINAS           | PAKISTÁN              |
| ANGOLA                 | FINLANDIA           | PALAU                 |
| ANTIGUA Y BARBUDA      | FRANCIA             | PANAMÁ                |
| ARABIA SAUDITA         | GABÓN               | PAPUA NUEVA GUINEA    |
| ARGELIA                | GEORGIA             | PARAGUAY              |
| ARGENTINA              | GHANA               | PERÚ                  |
| ARMENIA                | GRECIA              | POLONIA               |
| AUSTRALIA              | GUATEMALA           | PORTUGAL              |
| AUSTRIA                | GUYANA              | QATAR                 |
| AZERBAIYÁN             | HAÍTÍ               | REINO UNIDO DE        |
| BAHAMAS                | HONDURAS            | GRAN BRETAÑA E        |
| BAHREIN                | HUNGRÍA             | IRLANDA DEL NORTE     |
| BANGLADESH             | INDIA               | REPÚBLICA ÁRABE SIRIA |
| BARBADOS               | INDONESIA           | REPÚBLICA             |
| BELARÚS                | IRÁN, REPÚBLICA     | CENTROAFRICANA        |
| BÉLGICA                | ISLÁMICA DEL        | REPÚBLICA CHECA       |
| BELICE                 | IRAQ                | REPÚBLICA DE MOLDOVA  |
| BENIN                  | IRLANDA             | REPÚBLICA DEMOCRÁTICA |
| BOLIVIA, ESTADO        | ISLANDIA            | DEL CONGO             |
| PLURINACIONAL DE       | ISLAS MARSHALL      | REPÚBLICA DEMOCRÁTICA |
| BOSNIA Y HERZEGOVINA   | ISRAEL              | POPULAR LAO           |
| BOTSWANA               | ITALIA              | REPÚBLICA DOMINICANA  |
| BRASIL                 | JAMAICA             | REPÚBLICA UNIDA       |
| BRUNEI DARUSSALAM      | JAPÓN               | DE TANZANÍA           |
| BULGARIA               | JORDANIA            | RUMANIA               |
| BURKINA FASO           | KAZAJSTÁN           | RWANDA                |
| BURUNDI                | KENYA               | SAN MARINO            |
| CAMBOYA                | KIRGUISTÁN          | SANTA SEDE            |
| CAMERÚN                | KUWAIT              | SENEGAL               |
| CANADÁ                 | LESOTHO             | SERBIA                |
| CHAD                   | LETONIA             | SEYCHELLES            |
| CHILE                  | LÍBANO              | SIERRA LEONA          |
| CHINA                  | LIBERIA             | SINGAPUR              |
| CHIPRE                 | LIBIA               | SRI LANKA             |
| COLOMBIA               | LIECHTENSTEIN       | SUDÁFRICA             |
| CONGO                  | LITUANIA            | SUDÁN                 |
| COREA, REPÚBLICA DE    | LUXEMBURGO          | SUECIA                |
| COSTA RICA             | MADAGASCAR          | SUIZA                 |
| CÔTE D'IVOIRE          | MALASIA             | SWAZILANDIA           |
| CROACIA                | MALAWI              | TAILANDIA             |
| CUBA                   | MALÍ                | TAYIKISTÁN            |
| DINAMARCA              | MALTA               | TOGO                  |
| DJIBOUTI               | MARRUECOS           | TRINIDAD Y TABAGO     |
| DOMINICA               | MAURICIO            | TÚNEZ                 |
| ECUADOR                | MAURITANIA          | TURKMENISTÁN          |
| EGIPTO                 | MÉXICO              | TURQUÍA               |
| EL SALVADOR            | MÓNACO              | UCRANIA               |
| EMIRATOS ÁRABES UNIDOS | MONGOLIA            | UGANDA                |
| ERITREA                | MONTENEGRO          | URUGUAY               |
| ESLOVAQUIA             | MOZAMBIQUE          | UZBEKISTÁN            |
| ESLOVENIA              | MYANMAR             | VANUATU               |
| ESPAÑA                 | NAMIBIA             | VENEZUELA, REPÚBLICA  |
| ESTADOS UNIDOS         | NEPAL               | BOLIVARIANA DE        |
| DE AMÉRICA             | NICARAGUA           | VIET NAM              |
| ESTONIA                | NÍGER               | YEMEN                 |
| ETIOPÍA                | NIGERIA             | ZAMBIA                |
| EX REPÚBLICA YUGOSLAVA | NORUEGA             | ZIMBABWE              |
| DE MACEDONIA           | NUEVA ZELANDIA      |                       |

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS  
PARA EL DISEÑO, MODERNIZACIÓN  
Y AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS  
Y PROCESOS RELACIONADOS CON  
APLICACIONES NUCLEARES

INFORME TÉCNICO DE LA REUNIÓN DE EXPERTOS,  
27–29 DE ENERO DE 2014, LA HABANA, CUBA

## DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor, que ahora incluyen la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Para la utilización de textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, impresas o en formato electrónico, deberá obtenerse la correspondiente autorización, y por lo general dicha utilización estará sujeta a un acuerdo de pago de regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta  
Sección Editorial  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
P.O. Box 100  
1400 Viena (Austria)  
fax: +43 1 2600 29302  
tel.: +43 1 2600 22417  
correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
<http://www.iaea.org/books>

Para obtener más información sobre esta publicación, sírvase dirigirse a:

Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nuclear del OIEA en Seibersdorf (NSIL),  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
P.O. Box 100  
1400 Viena (Austria)  
Correo electrónico: [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)

USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL DISEÑO, MODERNIZACIÓN Y  
AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS Y PROCESOS RELACIONADOS CON  
APLICACIONES NUCLEARES

OIEA, VIENA, 2016

IAEA-TECDOC-1765/S

ISBN 978-92-0-303915-4

© OIEA, 2016

Impreso por el OIEA en Austria

Abril de 2016

## **PREFACIO**

Durante los últimos años el Organismo Internacional de Energía Atómica ha organizado una serie de proyectos de cooperación técnica orientados a ampliar y fortalecer las capacidades de los laboratorios que trabajan con instrumentación nuclear, así como a desarrollar prototipos de instrumentos e interfaces que permitan dar respuesta a diferentes necesidades de las aplicaciones nucleares en la región de América Latina y el Caribe (RLA).

La introducción de tecnologías avanzadas para el diseño de instrumentación, interfaces y dispositivos especializados, así como para realizar trabajos de automatización de sistemas o procesos relacionados con aplicaciones nucleares, ha permitido hacer un mejor uso de la instrumentación disponible. Los trabajos de reparación y modernización constituyen una alternativa para contrarrestar la falta de servicios de mantenimiento por parte de los proveedores de equipos que exceden el tiempo de vida útil previsto por los fabricantes (obsolescencia planificada). Los diseños especializados no solo permiten resolver necesidades específicas, sino que con frecuencia contribuyen a reducir los costos y los plazos de ejecución de los trabajos.

Una reunión de expertos fue realizada en el marco del proyecto regional RLA1011 (Apoyo a la Automatización de Sistemas y Procesos en Instalaciones Nucleares) para preparar un informe técnico que brindase recomendaciones a los estados miembros del OIEA sobre el estado actual de desarrollo de varias tecnologías avanzadas y sus principales campos de aplicación, incluyendo ejemplos de trabajos realizados en la región en el marco de este proyecto. El oficial técnico del OIEA a cargo de dirigir esta reunión y de elaborar el informe fue el Sr. R. Padilla Álvarez del Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nuclear del OIEA en Seibersdorf (NSIL).

## *NOTA EDITORIAL*

*El presente informe fue redactado en español y no ha sido editado por el personal de los servicios editoriales del OIEA.*

*Aunque se ha puesto gran cuidado en mantener la exactitud de la información contenida en esta publicación, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso.*

*El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o el trazado de sus fronteras.*

*La mención de nombres de determinadas empresas o productos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.*

## ÍNDICE

|   |            |
|---|------------|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1          |
| 2. TECNOLOGÍAS Y CAMPOS DE APLICACIÓN .....   | 2          |
| <b>2.1. Desarrollo de sistemas con Instrumentación Virtual .....</b>  | <b>2</b>   |
| <b>2.2. Micro-controladores .....</b>   | <b>4</b>   |
| <b>2.3. Controladores lógicos programables.....</b>   | <b>6</b>   |
| <b>2.4. Dispositivos en base a FPGA .....</b>   | <b>8</b>   |
| <b>2.5. Complementariedad de las tecnologías y sistemas híbridos.....</b>   | <b>10</b>  |
| <b>2.6. Gestión de calidad en el desarrollo, en la validación y en la verificación de software .....</b>  | <b>10</b>  |
| 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 13         |
| <b>3.1. Recomendaciones al OIEA .....</b>   | <b>13</b>  |
| <b>3.2. Recomendaciones a los países miembros del OIEA.....</b>   | <b>14</b>  |
| 4. INFORMES TÉCNICOS: TRABAJOS DE DESARROLLO REALIZADOS EN LOS MARCOS DEL PROYECTO RLA1011.....   | 15         |
| <b>Impulsímetro Digital con ajuste automatico del intervalo de acumulación de conteo para mejorar el control en la etapa de arranque de Reactores de Investigación.....</b> | <b>16</b>  |
| <b>Sistema de Control Alternativo para el Accionamiento de parada de emergencia con Inyección de Boro en la Central Nuclear Atucha II.....</b>                              | <b>26</b>  |
| <b>Implementación de Sistema de Monitoreo Radiológico para Instalaciones Radiactivas y Nucleares en Chile. ....</b>   | <b>50</b>  |
| <b>Sistema automático de captación de imágenes para portales de monitoreo radiológico de control de ingreso/salida a instalaciones nucleares .....</b>                      | <b>60</b>  |
| <b>Automatización del sistema de apertura a exposición de la fuente de Cs-137 en el Laboratorio de Referencia Dosimétrica de San José, Costa Rica.....</b>                  | <b>70</b>  |
| <b>Sistema de adquisición y transmisión remota de datos para una red de sensores de Radón.....</b>  | <b>74</b>  |
| <b>Automatización de la plataforma móvil del laboratorio secundario de calibración dosimétrica en Montevideo Uruguay.....</b>   | <b>80</b>  |
| <b>Automatización del Laboratorio de Patrones Secundarios en Quito - Ecuador .....</b>  | <b>86</b>  |
| <b>Aplicación de la metodología de verificación y validación de software en la adquisición de datos y control de una Liofilizadora .....</b>                                | <b>92</b>  |
| <b>Implementación de sistema de monitoreo para medir nivel de tasa de dosis de radiación ionizante en área de trabajo con detector GM y LabVIEW .....</b>                   | <b>102</b> |
| <b>Integración de un espectrofotómetro UV-VIS y un instrumento de medición de espesor en un Sistema de Medición de Dosis Absorbida .....</b>                                | <b>107</b> |
| LISTADO DE ABREVIATURAS UTILIZADAS EN EL INFORME.....   | 117        |
| LISTADO DE SIGLAS UTILIZADAS EN EL INFORME .....  | 119        |

RELACIÓN DE EXPERTOS QUE CONTRIBUYERON A LA REDACCIÓN DEL  
INFORME.....121

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han llevado a cabo una serie de proyectos de cooperación técnica en la región de América Latina y el Caribe orientados a ampliar y fortalecer las capacidades de los laboratorios que trabajan con instrumentación nuclear, a implementar diferentes actividades de gestión de la calidad para la aplicación de las normas ISO 9001, y a desarrollar prototipos de instrumentos e interfaces que permitan dar respuesta a necesidades específicas de las aplicaciones nucleares con menores costos para las instituciones con recursos financieros limitados.

En los últimos seis proyectos regionales ARCAL ejecutados entre 1999 – 2013 relacionados con estos temas participaron entre 11 y 18 países. Como resultado, se incrementó el número de laboratorios de instrumentación en la región y se reconocieron seis centros regionales en Argentina, Brasil, Cuba, México, Perú y Venezuela. Las actividades realizadas en estos proyectos contribuyeron, en muchos casos de forma decisiva, al sostenimiento de las labores de mantenimiento de la instrumentación nuclear en varios países de la región y crearon las premisas para motivar e incentivar la colaboración entre laboratorios de la región con diferente grado de desarrollo y necesidades. Algunos laboratorios de la región tienen la capacidad técnica para la transferencia de tecnología como apoyo a otros países en proyectos relacionados con instrumentación nuclear, así como para asimilar los avances continuos de diferentes tecnologías.

El proyecto RLA1011 (*Apoyo a la Automatización de Sistemas y Procesos en Instalaciones Nucleares*) surgió como una continuación lógica del proyecto RLA4022 (*“Actualización de conocimientos, introducción de nuevas técnicas y mejora de la calidad de las actividades de instrumentación nuclear”*). El objetivo principal del proyecto fue fortalecer las capacidades regionales para la automatización de procesos o sistemas relacionados con las aplicaciones nucleares e incluir herramientas que permitiesen cumplir con los requisitos de calidad requeridos para estos sistemas, con el fin de mejorar y aumentar su rendimiento, capacidad y fiabilidad.

La introducción de tecnologías avanzadas para el diseño de instrumentación permite apoyar los trabajos de reparación y modernización de la instrumentación disponible con diseños que constituyen una alternativa económicamente viable para extender su vida útil. Esto resulta de gran importancia para el caso de equipos que por haber excedido el tiempo de vida útil prevista por los fabricantes (obsolescencia planificada) no cuentan con servicios de mantenimiento o de suministro de piezas de repuesto.

La automatización de sistemas o procesos relacionados con aplicaciones nucleares no es solo una forma de aumentar la eficiencia de funcionamiento de los mismos, sino que en muchos casos constituye una garantía de seguridad de su operación. La utilización de dispositivos avanzados complejos y sistemas de supervisión y control no dependientes de software para su funcionamiento son opciones cada vez más preferidas por ser más fácil la validación de su robustez y mayor el tiempo entre fallas.

La adopción de procedimientos para la validación de software desarrollado para aplicaciones relacionadas con la modernización de equipos o con la automatización de procesos, así como para el diseño de dispositivos electrónicos complejos constituye una herramienta que permite reducir los costos derivados de la falta de análisis, especificaciones, planificación, pruebas, configuración y documentación. Las acciones de garantía de calidad en la verificación y validación de software contribuyen además a elevar la robustez y la seguridad de los sistemas desarrollados.

En los marcos del proyecto RLA1011 (2012-2013) se realizaron diferentes trabajos de modernización de equipos o de automatización de procesos y sistemas fueron realizados en los países participantes. Estos trabajos constituyeron los primeros resultados de los esfuerzos realizados para introducir varias tecnologías avanzadas en la región.

Se realizó una reunión de expertos para preparar el presente informe técnico, con el objetivo de brindar recomendaciones a los estados miembros del OIEA en la región sobre el estado actual de desarrollo de varias de estas tecnologías avanzadas y sus principales campos de aplicación, incluyendo ejemplos de varios trabajos realizados en la región. La reunión técnica contó con la participación de 8 participantes de siete países (Argentina, Chile, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Perú y Venezuela), cuyos datos se muestran en el Anexo 1. El oficial técnico del OIEA a cargo de dirigir esta reunión y de redactar el informe a partir de las contribuciones recibidas fue el Sr. R. Padilla Álvarez, del Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nuclear del OIEA en Seibersdorf (NSIL).

## **2. TECNOLOGÍAS Y CAMPOS DE APLICACIÓN**

Diferentes tecnologías han surgido y evolucionado durante los últimos años, que pueden ser utilizadas para la solución de una amplia gama de problemas relacionados con la modernización y extensión de la vida útil de equipos y componentes, así como para la automatización de sistemas y procesos complejos.

Cada una de estas tecnologías tiene una serie de características específicas que las hacen una opción ventajosa para ciertas aplicaciones, así como limitaciones inherentes a su concepción, diseño y funcionalidades. Las siguientes secciones describen las tecnologías que con más frecuencia se utilizan en el diseño de instrumentación o de automatización de sistemas para aplicaciones nucleares. Algunos ejemplos de los trabajos realizados en los marcos del proyecto RLA1011 utilizando estas tecnologías se describen en detalle en los informes técnicos que se brindan en el anexo 4 de este informe técnico. Un listado de abreviaturas comúnmente utilizadas en idioma Inglés, así como algunas siglas en idioma Español se brinda al final de este informe para facilitar la lectura. Los textos que corresponden a una traducción se muestran en cursiva.

### **2.1. DESARROLLO DE SISTEMAS CON INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**

El concepto de instrumentación virtual surge en la década de los 80 para denotar el uso de computadores personales (*PC – Personal Computers*) en calidad de “instrumentos” para la medición de diferentes tipos de señales, tales como temperatura, presión y caudal, entre otras. Sin embargo, el concepto de instrumentación virtual no se limita a la simple medición de señales específicas, sino que involucra también el procesamiento, análisis, almacenamiento y distribución de información derivada de las mismas. El instrumento virtual también involucra la utilización de una interfaz hombre-máquina (*HMI – human machine interface*) para la toma de decisiones, la realización de funciones de análisis y procesamiento de señales, el almacenamiento de datos y la comunicación e intercambio de información y/o señales de control con otros equipos y dispositivos.

El diseño de dispositivos y sistemas electrónicos para el control de procesos tradicionalmente involucraba combinar diferentes competencias técnicas, tanto para el desarrollo de software como para la interconexión de sensores, dispositivos de transferencia, almacenamiento de datos y actuadores. Los lenguajes de programación gráfica surgieron como una alternativa para integrar en una herramienta única estas competencias y facilitar los trabajos de automatización de procesos industriales. Estas herramientas permiten reducir los costos y los períodos de tiempo requeridos para el diseño, pruebas de verificación y producción de los sistemas. Diferentes paquetes de programas surgieron para el diseño de instrumentos virtuales utilizando programación gráfica, tales como LabVIEW, DasyLab y Agilent VEE, entre otros.

La programación gráfica parte del concepto de programación modular y estructurada y se realiza utilizando un panel en el cual se colocan objetos gráficos (bloques funcionales) que representan los diferentes objetos, dispositivos u operaciones que se pretende interconectar en forma de un diagrama que representa el flujo de procesamiento de las señales. Se utilizan símbolos gráficos en lugar de

lenguaje textual para describir funciones y procedimientos. Los archivos generados se denominan Instrumentos Virtuales (*VI – Virtual Instruments*).

Un instrumento virtual es un módulo o sistema de software que presenta al usuario un panel de control (interfaz de usuario) que le permite realizar una serie de acciones similares a las que se realizan con un instrumento físico, apoyándose en elementos de hardware accesibles en el ordenador personal (PC). Los instrumentos virtuales generados pueden servir para simular procesos o para ser interconectados a sensores, instrumentos, equipos o actuadores a través de las interfaces comunes a los PCs.

### ***2.1.1. Ventajas y limitaciones***

El uso de lenguajes gráficos de programación ha favorecido el desarrollo de nuevos instrumentos no solo para la adquisición de datos sino también para la automatización de procesos complejos.

La programación gráfica brinda una gran flexibilidad para acometer trabajos de naturaleza diversa y evitar las limitaciones inherentes al uso de tecnologías específicas. Diferentes instrumentos virtuales pueden ser re-diseñados para nuevas aplicaciones y funcionalidades utilizando los mismos sensores y actuadores escogidos con anterioridad para las aplicaciones originales.

El proceso de programación implica una considerable componente intuitiva, y los errores que puedan cometerse suelen ser detectados con facilidad lo que permite iniciar su gestión rápidamente.

Estas ventajas han conducido a que el uso de la programación gráfica se haya generalizado en gran parte de los laboratorios, institutos y centros que desarrollan instrumentación para aplicaciones pacíficas de la energía nuclear.

El uso de instrumentación virtual implica una serie de limitaciones, entre las cuales se encuentran:

- Presupone el uso de recursos del ordenador y limita la utilización del mismo para otras funciones.
- Por lo general, los costos de las licencias de uso son considerables y los plazos de validez limitados.
- Las funcionalidades se ofrecen en diferentes paquetes adicionales, los cuales deben ser adquiridos en caso de necesidad.
- Los desarrollos realizados no son siempre portables (utilizables) entre diferentes versiones de una misma plataforma o entre diferentes plataformas.
- Los instrumentos virtuales están expuestos a los errores o vulnerabilidades inherentes a los sistemas operativos del PC, incluidos los virus informáticos.

### ***2.1.2. Principales aplicaciones de los instrumentos virtuales***

Las instituciones de la región aún cuentan con un considerable número de equipos y sistemas que suelen ser considerados como obsoletos, pero que aún son funcionales. Una gran parte de los módulos o componentes que integran estos sistemas no pueden ser reparados por la carencia de piezas de repuesto, cuya producción ha sido descontinuada. El diseño de instrumentos virtuales que reemplacen estos componentes es una alternativa para la extensión de la vida útil de los sistemas, así como para mejorar o ampliar sus funcionalidades.

Los instrumentos virtuales pueden ser diseñados para la automatización de procesos, experimentos y ensayos. La integración de varios detectores/sensores a un instrumento virtual puede servir para crear nuevas funcionalidades, las cuales dependan del procesamiento de diferentes señales complementarias.

La facilidad para replicar instrumentos virtuales puede ser utilizada para disminuir los costos en la conformación de redes territoriales o nacionales. La utilización de instrumentos virtuales en cada una de las estaciones haría necesaria solo la adquisición de los sensores y/o detectores para éstas.

## **2.2. MICRO-CONTROLADORES**

Los micro-controladores ( $\mu C$  – *micro-controllers*) son considerados como un sistema autónomo con un procesador, unidad de memoria y dispositivos periféricos. Los  $\mu C$  pueden trabajar de forma independiente o pueden ser parte de un sistema más complejo (estar *embebidos* en un sistema más complejo). El tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos en cada micro-procesador son específicos para cada modelo, por lo que para cada aplicación deben tomarse en cuenta estas características para su selección. Los microcontroladores ejecutan de forma secuencial una serie de instrucciones previamente escritas en lenguajes de programación.

Los microcontroladores se diferencian por una serie de características, tales como la arquitectura, la tecnología empleada en su fabricación, la capacidad de procesamiento complejo, el ancho de palabra de procesamiento, la longitud del bus interno/externo y las entradas y salidas disponibles. Entre los dispositivos periféricos embebidos se incluyen los conversores análogo-digitales (*ADC – Analog to digital converter*), los conversores digital analógicos (*DAC – Digital to analog converter*), los moduladores de ancho de pulso (*PWM – Pulse width modulator*), temporizadores y puertos de comunicaciones, entre otros.

### **2.2.1. Ventajas y limitaciones**

Los micro-controladores reúnen una serie de características que los hacen ser preferidos para algunas aplicaciones.

- Los modelos de reciente generación tienen características tan avanzadas como para ser utilizados en tareas complejas, tales como supervisión de sensores, adquisición y procesamiento de datos, control automático, entre otras aplicaciones.
- Los bajos requisitos de consumo de algunos  $\mu C$  los hacen especialmente útiles para crear dispositivos portátiles con gran autonomía en consumo de energía.
- Existen plataformas de desarrollo estandarizadas, con disponibilidad de funciones particulares que sirven para solventar diferentes necesidades. Estas plataformas permiten combinar dispositivos de diferentes fabricantes.
- Los  $\mu C$  pueden ser programados utilizando lenguajes de diferente nivel, desde ensamblador hasta los de alto nivel, tales como C, Java, Python u otros. Esta posibilidad brinda una gran versatilidad para escoger el lenguaje de programación en dependencia de las características esperadas, así como para simplificar los trabajos de programación de algoritmos complejos.
- La disponibilidad de diferentes tamaños y funciones brinda una amplia gama de posibilidades para las diversas necesidades de los proyectos de desarrollo. Contar con diferentes puertos de comunicación facilita la integración con otros sistemas y dispositivos.
- Los micro-controladores pueden abordar tareas de control y procesamiento de forma autónoma, sin requerir el uso de un PC. En algunos casos pueden incluso ejecutar sistemas operativos (Unix-Like).

Como toda tecnología, algunas de las características de los  $\mu\text{C}$  conllevan a ciertas limitaciones.

- La principal limitación de los micro-controladores radica en que la ejecución de las instrucciones se realiza de forma secuencial, lo cual impide la realización de tareas de forma simultánea en procesos que requieren tiempos de ejecución cortos.
- La dificultad para evaluar la fiabilidad de un paquete de software hace que los micro-controladores no sean fácilmente validados en los procesos de licenciamiento de sistemas críticos, tales como los sistemas de protección en instalaciones nucleares, en aeronáutica o en cualquier otro donde existan altos requerimientos de seguridad.
- La realización de proyectos basados en micro-controladores requiere de varias competencias técnicas, que incluyen el conocimiento de diferentes lenguajes de programación y de la arquitectura propia del micro-controlador para optimizar los programas, así como de ingeniería electrónica para poder adaptar los puertos de entrada y salida a los requisitos específicos de la aplicación.

### **2.2.2. Principales aplicaciones**

Los  $\mu\text{C}$  son utilizados en un sinnúmero de aplicaciones, entre las que se pueden mencionar sistemas de control de motores, dispositivos de comunicación, dispositivos médicos, instrumentos portátiles, sistemas de control automático de operación de maquinaria, interfaces a PC, conexión a buses de comunicación de datos a nivel industrial y en otros subsistemas de comunicación.

Diferentes plataformas para el desarrollo de dispositivos incluyen un  $\mu\text{C}$  para las funciones de procesamiento, lo cual permite reducir los costos de estos trabajos y los tiempos de ejecución.

### **2.2.3. Tendencias actuales de desarrollo**

Existen varias tendencias concurrentes en el desarrollo de micro-controladores. Para mejorar su desempeño, se incorporan en su circuito integrado una serie de bloques de otras tecnologías (*SoC - System on a Chip*), tales como núcleos de lógica programable dedicada, funciones para procesamiento digital de señales (*DSP - Digital Signal Processing*), sistemas operativos de arranque (*RTOS - Real Time Operating System*), o incluso diferentes micro-procesadores en el mismo circuito integrado (*MPSoC - Multiprocessor System on Chip*).

Otra tendencia es la de incorporar funcionalidades para proporcionar ventajas en la etapa de desarrollo del software de aplicación, tales como programación en el sistema (*ISP - In-System Programming*), depurador (*debug*) en tiempo de ejecución y depurador de código fuente.

Para la solución de problemas complejos se producen plataformas de desarrollo con hardware y software abierto, el uso de las cuales permiten utilizar la experiencia existente y los bloques de software ya desarrollados con anterioridad, lo cual redundará en una reducción significativa de costos y tiempos de ejecución.

La inclusión de diferentes puertos y protocolos de comunicación, tales como RS-232, RS-485, CanBus, I2C, SPI (Serial Peripheral Interface), Ethernet, GPIB y USB, entre otros, permite una gran flexibilidad para la transferencia de datos con otros dispositivos.

## **2.3. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES**

### ***2.3.1. Generalidades***

Los controladores lógicos programables (*PLC – Programmable Logic Controllers*) son dispositivos implementados en base a la utilización de micro-controladores que disponen de distintos tipos de entradas y salidas digitales y/o analógicas, además de otros módulos funcionales internos que permiten ser programados a través de lenguajes de alto nivel. Estas características permiten que puedan ser adaptados al campo de aplicación específica y a las necesidades del usuario.

Los PLC se utilizan para la automatización/control de procesos que no requieran algoritmos extremadamente complejos, y en general en procesos que están compuestos por operaciones secuenciales. Los hay de distinta complejidad, y en general vienen en forma modular, permitiendo que se configure su estructura agregando el tipo y cantidad de entradas y salidas necesarias para la aplicación específica.

El funcionamiento de estos dispositivos está basado en la ejecución de una secuencia de instrucciones que ha sido programada previamente (es decir, se ejecuta un programa de software). El lenguaje de alto nivel utilizado para su programación hace que este tipo de dispositivos pueda ser programado por personal técnico con conocimientos orientados al proceso a controlar y no es necesario que dispongan de conocimientos profundos sobre tecnologías digitales y programación de software.

Al disponer de puertos de comunicación serial con protocolos normalizados para la transmisión de datos, los PLC pueden utilizarse en combinación con un computador personal durante la etapa de desarrollo, lo cual facilita su programación. El uso del computador para el control del proceso puede hacer más amigable la interfaz con el operador.

### ***2.3.2. Principales características***

Los PLCs reúnen una serie de características comunes, entre las que se pueden enumerar:

- Disponibilidad de entradas y salidas tanto digitales como analógicas.
- Utilización de puertos de comunicación serie estandarizados.
- Para transmisiones a largas distancias se dispone de entradas y salidas de corriente.
- Se utilizan entradas y salidas opto-acopladas para evitar interferencias electromagnéticas.
- Disponen de salidas de contactos secos que realizan funciones similares a los de los relés.
- Contadores internos pueden ser utilizados para realizar acciones dirigidas por temporizadores o acumulación de eventos.
- Módulos de Control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) permiten reaccionar a eventos de diferente naturaleza.
- La capacidad de cómputo puede ser utilizada para la resolución de operaciones lógicas y aritméticas elementales.

### **2.3.3. Ventajas y limitaciones**

A continuación se resaltan las principales ventajas de utilizar este tipo de dispositivos:

- La robustez en su diseño permite utilizarlos en ambientes industriales sin mayores precauciones, ya que son bastante inmunes a las interferencias electromagnéticas y a condiciones ambientales adversas. También el tipo de protección prevista para sus entradas y salidas contribuyen a la robustez de funcionamiento.
- Su diseño modular permite que sean combinados con distintos tipos y cantidades de entradas y salidas para satisfacer las necesidades de la aplicación específica.
- El alto nivel del lenguaje utilizado para su programación (*ladder*) permite que sean programados por personal cuyos conocimientos están orientados al proceso a controlar/automatizar, aun cuando no cuenten con conocimientos específicos en electrónica digital y programación de software de nivel básico.
- La amplia difusión y disponibilidad en el mercado como productos de estantería (*COTS - Commercial Off The Shelf*) permite implementar los sistemas deseados sin necesidad de desarrollar un hardware específico, reduciendo el tiempo y costo de implementación.
- La integración con otros dispositivos del mismo tipo permite lograr arquitecturas redundantes capaces de satisfacer las demandas de alta confiabilidad y disponibilidad requeridas por ciertos procesos críticos. La existencia de dispositivos de control que realizan la misma función de forma paralela (redundancias) asegura que aún en caso de que uno de estos dispositivos falle, la acción de control requerida sea realizada por otro (confiabilidad). Al disponer de una multiplicidad de dispositivos pueden diseñarse esquemas lógicos para la toma de decisiones que permitan garantizar la disponibilidad del proceso sin afectar su seguridad.
- Su bajo costo permiten acometer tareas de automatización/control con una relación costo/beneficio favorable.

Los PLCs tienen una serie de características que limitan su utilización en algunas aplicaciones. Entre estas limitaciones se encuentran las siguientes:

- Se requiere desarrollar algoritmos de gran complejidad, ya que los bloques funcionales internos están orientados a funciones simples.
- El tipo de entradas y salidas estándar disponibles no permiten que los PLC sean utilizados en casos de señales con características especiales en cuanto a forma, tiempo de duración o nivel de referencia.
- Al estar basado su funcionamiento en la ejecución de un programa secuencial de operaciones, su aplicación en casos donde es importante reducir el tiempo de respuesta no es recomendable.

### **2.3.4. Principales aplicaciones**

Además de las amplias aplicaciones industriales en las que se ha extendido el uso de estos dispositivos, en el ámbito nuclear los PLCs son utilizados en la automatización y/o control de los siguientes procesos:

- Movimiento de los bancos utilizados para calibración de detectores nucleares en Laboratorios Secundarios de Calibración Dosimétrica.

- Sistemas de ventilación en instalaciones nucleares.
- Transferencia de muestras a puntos de irradiación en reactores nucleares (sistemas de guías neumáticas).
- Movimiento de carros contenedores de productos en las plantas de irradiación industriales.
- Lógica de enclavamiento para restricción del acceso u operación de instalaciones nucleares (movimiento de barras).
- Control de variables tales como nivel de líquidos, temperatura, velocidad en procesos en laboratorios nucleares.
- Apertura y cierre de irradiadores en aplicaciones de medicina nuclear.

Actualmente la utilización de PLC en aplicaciones nucleares se orienta al control de procesos sencillos que no requieren niveles de seguridad elevados, recurriéndose a otras tecnologías más complejas (FPGA, micro-controladores y software) cuando es necesario resolver algoritmos más complejos.

## **2.4. DISPOSITIVOS EN BASE A FPGA**

Los FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) son dispositivos semiconductores que contienen bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' mediante un lenguaje de descripción de hardware especializado (*HDL – Hardware Description Language*). Los FPGA surgieron como una evolución de los CPLD (Complex Programmable Logic Device) e incorporan una mayor densidad de integración de componentes, así como una arquitectura de diseño más flexible.

La arquitectura de los CPLDs es más rígida y consiste en una o más sumas de productos programables cuyos resultados van a parar a un número reducido de biestables síncronos (también denominados flip-flops). La arquitectura de las FPGAs, por otro lado, se basa en un gran número de pequeños bloques utilizados para reproducir sencillas operaciones lógicas, que cuentan a su vez con biestables síncronos. La enorme libertad disponible en la interconexión de dichos bloques confiere a las FPGAs una gran flexibilidad.

Esta lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una compuerta lógica o un sistema combinacional hasta las realizadas por algoritmos complejos. En la mayoría de las FPGAs se pueden encontrar funciones de alto nivel (tales como sumadores y multiplicadores) embebidas en la propia matriz de interconexiones, así como bloques de memoria. Estos dispositivos pueden ser reprogramados en campo siempre que sea necesario modificar su funcionalidad, eliminando la necesidad de retirar el dispositivo de la tarjeta o realizar un nuevo diseño del sistema. Debido a la posibilidad de reprogramación, un producto basado en un FPGA puede ser actualizado con nuevas características sin que para ello se requiera el reemplazo de componentes. Sistemas complejos, tales como microprocesadores, procesadores digitales de señales y diferentes dispositivos periféricos, pueden ser integrados en un solo FPGA y reducir considerablemente el tamaño de los circuitos impresos.

### **2.4.1. Ventajas y limitaciones.**

A continuación se resaltan las principales ventajas de utilizar este tipo de dispositivos:

- Los desarrollos basados en un FPGA pueden ser actualizados con nuevas características sin que para ello se requiera el reemplazo de componentes.

- Los tiempos de desarrollo se reducen debido a la rapidez con que se pueden obtener y probar prototipos.
- El alto nivel de integración de esta tecnología permite combinar en un solo FPGA sistemas complejos, lo cual permite reducir considerablemente el número de componentes, las dimensiones y consecuentemente aumentar la fiabilidad, así como disminuir el consumo y la disipación de potencia.
- Las avanzadas herramientas de desarrollo suministradas por los fabricantes permiten resolver funciones sumamente complejas.
- Existen productos en el mercado basados en FPGA donde el fabricante permite al usuario la reprogramación del dispositivo, lo que facilita la implementación de nuevas funcionalidades específicas.
- Los FPGA representan una excelente opción cuando la diversidad en el diseño de dispositivos redundantes es requerido para sistemas de alto nivel de seguridad.

El desarrollo de dispositivos basados en FPGA tiene una serie de limitaciones, tales como:

- Las series de FPGA de características más altas y con mayores densidades de recursos lógicos son de alto costo.
- Se debe prestar especial atención a los requerimientos para garantizar la integridad de las señales cuando se realiza el diseño de los circuitos impresos. En particular, se deben prever los problemas asociados a la disipación, las interferencias mutuas, los lazos de tierra y otros fenómenos no deseados.
- El diseño de dispositivos para sistemas críticos requiere la utilización de herramientas de diseño verificadas y validadas.
- La alta densidad de conectores en los encapsulados requiere de métodos especializados de montaje y soldadura.

#### ***2.4.2. Principales campos de aplicación.***

Los FPGA se han empleado con éxito en el procesamiento digital de señales, en imaginología, reconocimiento de patrones, criptografía, bioinformática, matemática computacional, emulación de hardware en prototipos de circuitos integrados para aplicaciones específicas (*ASIC - Application-Specific Integrated Circuit*).

La disminución de los costos debido al incremento en el volumen de su producción hace que estos dispositivos puedan ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones.

Existen FPGA capaces de procesar señales analógicas y digitales de forma directa (*mixed signal FPGA*). Estos dispositivos contienen múltiples periféricos, tales como bloques de memoria flash, conversores análogo-digitales (ADC), entradas digitales con tolerancia a valores no convencionales y salidas que soportan altas corrientes de carga. Estas características proporcionan al usuario flexibilidad e integración para desarrollar una gran variedad de aplicaciones.

### **2.4.3. Tendencias actuales de desarrollo.**

Una de las tendencias actuales es la de integrar los bloques tradicionales de FPGA con microprocesadores y diferentes dispositivos periféricos asociados para formar sistemas en un solo circuito integrado (SOC - *System on Chip*). Esta integración facilita a los desarrolladores de software para microprocesadores incorporar la tecnología de FPGA en el desarrollo de sistemas híbridos.

## **2.5. COMPLEMENTARIEDAD DE LAS TECNOLOGÍAS Y SISTEMAS HÍBRIDOS**

Además de realizar proyectos basados en alguna de las tecnologías descritas, pueden realizarse diseños en los cuales se combinen diferentes características ventajosas de cada una de las mismas. El ejemplo más sencillo lo constituyen los PLCs en sí mismos, cuyo diseño fue desarrollado a partir de la inclusión de un micro-controlador.

Los fabricantes de microcontroladores están añadiendo características más complejas o avanzadas a los  $\mu$ C, tales como módulos de FPGA y puertos integrados de comunicación (CANBus, I<sup>2</sup>C, USB, SPI, Ethernet, USART, entre otros).

El desarrollo de diferentes librerías en las herramientas de programación gráfica ha hecho posible diseñar instrumentos virtuales que operen en combinación con otros dispositivos avanzados diseñados en base a micro-controladores, FPGA y PLC. El uso de variados protocolos de comunicación (GPIB, VXI, RS-232, RS-485, USB, TCP/IP) permite una amplia gama de posibilidades para la conexión de los dispositivos.

Cuando es necesaria una interfaz con el operador un tanto elaborada o cuando es necesaria la resolución de algoritmos más complejos es posible integrar los PLC con un ordenador personal, ya que entre otras características, los mismos disponen de puertos de comunicación serie normalizados que permiten su fácil interconexión. También es corriente la integración de PLCs a sistemas de supervisión y control de procesos complejos, ocupando en la estructura del mismo el nivel más cercano al proceso a controlar.

La creación de sistemas de control para sistemas críticos con frecuencia involucra la utilización de canales paralelos desarrollados en base a tecnologías diferentes (*redundancia de diversidades*).

## **2.6. GESTIÓN DE CALIDAD EN EL DESARROLLO, EN LA VALIDACIÓN Y EN LA VERIFICACIÓN DE SOFTWARE**

La garantía de calidad del software es un tema muy importante en los trabajos de modernización de equipos y en la automatización de sistemas y procesos. La Gestión de Calidad establece acciones planificadas y sistemáticas destinadas a mejorar la calidad del software y se traduce en el ahorro de costos de análisis, diseño, desarrollo y mantenimiento. Las diferentes acciones orientadas a garantizar la calidad conducen a la obtención de un software robusto, que cumpla con los requisitos esperados y que pueda ser validado o licenciado.

Una Metodología para la Verificación y Validación de Software fue creada para sistemas que involucran el diseño de hardware y software, con la finalidad de garantizar la calidad del software de instrumentos de uso nuclear en los marcos de dos proyectos regionales. En el proyecto RLA4022 (*Actualización de conocimientos, introducción de nuevas técnicas y mejora de la calidad de las actividades de la instrumentación nuclear*) se desarrolló una metodología que consta de tres planes de acción y tres procedimientos que cumplen con los requisitos de los estándares de la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards*). El proyecto RLA1011 (*Apoyo a la automatización de sistemas y procesos en instalaciones nucleares, ARCAL CXXIII*) permitió actualizar estos planes y

procedimientos de acuerdo a los estándares de la ISO (*International Standardization Organization*) y la IEC (*International Electrotechnical Commission*). Se desarrolló también un procedimiento para asegurar la calidad en el diseño de la configuración de Dispositivos Electrónicos Complejos (DEC).

### 2.6.1. Descripción de la metodología

La Metodología para la Verificación y Validación de Software (MVVS) considera estándares de IEEE, ISO e IEC y las diferentes acciones a realizar en las etapas que forman el ciclo de vida del software se ilustran en la Figura 1.

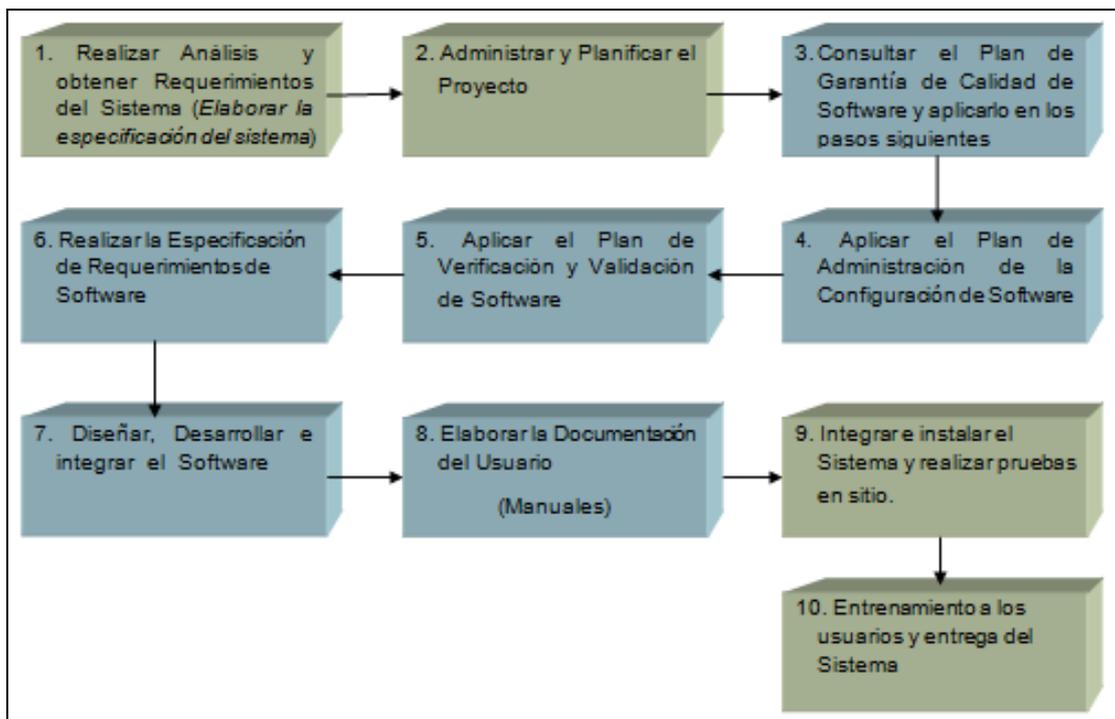


FIG. 1. Diagrama de flujo que ilustra las diferentes acciones recomendadas en la MVVS.

Los documentos desarrollados en la metodología incluyen:

- Plan de Garantía de Calidad de Software;
- Plan de Administración de la Configuración del Software;
- Plan de Verificación y Validación de Software;
- Procedimiento para la Especificación de Requerimientos de Software;
- Procedimiento para el Diseño y Desarrollo de Software; y
- Procedimiento para la elaboración de la Documentación del Software para el Usuario.

Esta documentación ha sido distribuida a los Coordinadores Nacionales de los países miembros de ARCAL y puede obtenerse del Oficial Técnico responsable por el proyecto relacionado con su elaboración ([R.Padilla-Alvarez@iaea.org](mailto:R.Padilla-Alvarez@iaea.org)).

### ***2.6.2. Ventajas y beneficios de utilizar la metodología de verificación y validación de software***

Al aplicar la metodología se reducen los costos derivados de la falta de análisis, imprecisiones en las especificaciones, así como por errores en la planificación, pruebas, configuración y documentación del software. Las acciones de gestión de la calidad contribuyen a elevar la robustez y la seguridad de los sistemas desarrollados. En particular, la aplicación de cada uno de los planes y procedimientos de la metodología conlleva a ventajas y beneficios específicos, tales como:

- Al establecer un Plan de Garantía de Calidad de Software se definen las actividades para garantizar su calidad: especificación de requerimientos, diseño, desarrollo, verificación y validación, configuración de la administración del software y documentación para el usuario.
- Las recomendaciones para la Administración de la Configuración del Software permiten identificar, controlar, auditar y registrar los cambios que se realicen en cada una de las etapas de desarrollo del software.
- El Plan de Verificación y Validación de Software permite determinar si los requerimientos de un sistema o componente han sido especificados de forma completa y correcta, si los productos de cada fase de desarrollo cumplen con los requerimientos o condiciones impuestas en la fase previa y si el sistema o componente final cumple con los requerimientos especificados.
- La exigencia de realizar la especificación de los requerimientos de software persigue definir y compilar estos requisitos de forma tal que puedan ser verificados y validados.
- El desarrollo de un documento que proporcione la información precisa del diseño y que facilite la implementación del sistema, así como el código fuente del desarrollo y las herramientas utilizadas que permita detallar como se satisfacen los requerimientos del software.
- Elaborar la Documentación del usuario (Manuales) permite al usuario utilizar el producto desarrollado de forma correcta.

### ***2.6.3. Aplicaciones de la metodología***

La metodología de verificación y validación de software puede ser aplicada en los sistemas en los cuales se realice adquisición de datos, control, procesamiento de señales, de imágenes, etc. a través de una aplicación de software. La metodología es también aplicable al desarrollo de instrumentación nuclear utilizando tecnologías que incluyan el uso de software embebido, tales como micro controladores, PLC y FPGA.

La metodología de validación y verificación de software puede ser aplicada en diversas áreas donde se utilice la instrumentación nuclear con software asociado, tales como la salud humana, el medio ambiente, la energía, la industria y la seguridad física y radiológica entre otros campos de aplicación.

### **3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El uso eficiente de la instrumentación nuclear constituye una premisa indispensable para la implementación de proyectos en numerosos campos de aplicación, incluyendo la generación de energía, las investigaciones fundamentales en física nuclear, la caracterización de nuevos materiales, los estudios asociados a la salud humana y la preservación del medio ambiente, entre otros campos de aplicaciones.

El estado de desarrollo de las tecnologías avanzadas para el diseño o modernización de instrumentos así como para la automatización de sistemas y procesos relacionados con aplicaciones nucleares puede ser aprovechado para lograr que las mismas puedan jugar un papel más importante y constituir una opción más competitiva en los diferentes campos de aplicación de la instrumentación nuclear.

Los participantes de la reunión consideraron que el papel del OIEA en la promoción y extensión del uso de instrumentación debe incluir:

- Promover el uso de tecnologías avanzadas para el diseño de instrumentos y la automatización de sistemas a partir de diferentes modalidades de intercambio de experiencias, tales como reuniones técnicas, programas coordinados de investigación, entre otros.
- Contribuir a la formación de especialistas mediante la organización de actividades de capacitación y diferentes modalidades de cooperación técnica
- Considerar la posibilidad de organizar y/o apoyar eventos, en los que los especialistas de estados miembros en vías de desarrollo; puedan intercambiar experiencias con especialistas de instituciones con avanzada experiencia en estas tecnologías.

Los participantes consideraron oportuno formular una serie de recomendaciones al OIEA y a sus estados miembros.

#### **3.1. RECOMENDACIONES AL OIEA**

- Considerar la posibilidad de crear un proyecto regional o interregional dedicado al fortalecimiento de capacidades en modernización de equipos y automatización de sistemas o procesos relacionados con aplicaciones nucleares.
- Promover el uso de espacios virtuales para el intercambio de experiencias entre especialistas relacionados con la instrumentación nuclear. La plataforma NUCLEUS del OIEA pudiera ser un espacio de trabajo a utilizar para este fin.
- Crear un repositorio de documentación que describa en suficiente detalle ejemplos de trabajos/soluciones/enfoques utilizados para la modernización y automatización de sistemas y procesos relacionados con aplicaciones nucleares.
- Apoyar la modernización de los laboratorios de aplicaciones nucleares en Seibersdorf, incluyendo las capacidades para lograr un entrenamiento efectivo en estas tecnologías novedosas.
- Organizar talleres, conferencias, reuniones técnicas y programas coordinados de investigación, que faciliten la cooperación y transferencia de conocimientos entre especialistas de instituciones, países desarrollados y países en vías de desarrollo, favoreciendo el establecimiento de lazos de cooperación a escala regional e inter-regional

### **3.2. RECOMENDACIONES A LOS PAÍSES MIEMBROS DEL OIEA**

- Promover la creación de proyectos nacionales donde se realice la modernización y automatización de sistemas y procesos relacionados con aplicaciones nucleares.
- Involucrar la participación de especialistas jóvenes en las actividades de capacitación, con el fin de atraerlos a este tipo de proyectos y garantizar la continuidad necesaria para la sostenibilidad de los esfuerzos en este campo.

**4. INFORMES TÉCNICOS: TRABAJOS DE DESARROLLO REALIZADOS EN LOS MARCOS DEL PROYECTO RLA1011.**

# IMPULSÍMETRO DIGITAL CON AJUSTE AUTOMÁTICO DEL INTERVALO DE ACUMULACIÓN DE CONTEO PARA MEJORAR EL CONTROL EN LA ETAPA DE ARRANQUE DE REACTORES DE INVESTIGACIÓN.

G. RÍOS <sup>(b)</sup>, C. VERRASTRO

Sub-Gerencia de Instrumentación y Control – CNEA, Argentina

## Resumen:

Este documento brinda una descripción de un Impulsímetro digital desarrollado en base a dispositivos FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) para ser utilizado en la instrumentación nuclear de las cadenas de arranque de los reactores RA-10<sup>c</sup> y CAREM<sup>d</sup> y para la medición de un amplio rango de intensidad de conteo de pulsos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Antiguamente este tipo de instrumento estaba implementado mediante la utilización de circuitos bomba de diodos o integradores con constantes de tiempo seleccionadas mediante conjuntos RC (resistor – condensador), cuyo valor se ajustaba desde el panel frontal según la frecuencia media de pulsos de la señal conectada en su entrada. Como consecuencia de esto, y dada la naturaleza aleatoria de la señal a medir en este tipo de aplicaciones, si se utilizaban constantes de tiempo muy altas para la integración de la señal se obtenía una lectura estable, pero el instrumento era lento e ineficaz para detectar variaciones rápidas de la señal. Si la constante de integración era pequeña, el circuito respondía correctamente a las variaciones rápidas, pero la lectura presentaba grandes oscilaciones en la indicación (por insuficiente filtrado del ruido estadístico) [1].

Esto motivó a desarrollar un instrumento con un algoritmo de reacción inteligente, que adaptara el modo de operación a la tasa de conteo de la señal con mayor rapidez y estabilidad de la lectura. Un instrumento con estas características se implementó hace ya una década [1, 4, 5] mediante la utilización de micro-procesadores y se validó en distintos reactores de investigación y producción de radioisótopos [5, 6].

El hecho de que este instrumento estuviera basado en micro-procesadores cuyo software de cálculo debía ejecutarse durante su funcionamiento, dificultó grandemente su inclusión en las cadenas de seguridad de la instrumentación de reactores ya que su validación no era fácilmente aceptada por las autoridades regulatorias.

La disponibilidad en el mercado de dispositivos electrónicos complejos, que cada vez permiten la implementación de circuitos lógicos más elaborados, llevó a reemplazar el algoritmo utilizado por el impulsímetro digital basado en micro procesadores por otro basado en la aplicación de tecnología de FPGA, evitando de esta forma la utilización de un código que se estuviera ejecutando en tiempo real [7, 8].

---

<sup>b</sup> Contacto para correspondencia, email: [glorrios@cae.cnea.gov.ar](mailto:glorrios@cae.cnea.gov.ar)

<sup>c</sup> RA-10 es un proyecto desarrollado en conjunto con Brasil que permitirá instalar un reactor de investigación e incrementar la producción de radioisótopos

<sup>d</sup> El proyecto CAREM 25 tiene por objetivo poner en operación la primera central nuclear de baja y mediana potencia diseñada y construida en Argentina

## 2. GENERALIDADES

El equipo desarrollado en base a FPGA permite la medición del flujo de neutrones en régimen de pulsos en un amplio rango de tasas de conteo (1 - de  $10^6 \text{s}^{-1}$ ) con un tiempo de respuesta variable en dependencia del flujo y que se ajusta de forma automática pero manteniendo bajo control el error estadístico de la lectura. El compromiso entre tiempo de respuesta y estabilidad de la lectura es resuelto por el método de cálculo utilizado, con una velocidad que sería impracticable si dependiese de la intervención manual del usuario.

Dado que los cambios de los parámetros de medición son determinados en función del valor de flujo de neutrones obtenido en cada medición, los tiempos de respuesta se mantienen inversamente proporcionales a la tasa de cuentas ( $\text{s}^{-1}$ ).

La única señal de entrada son los pulsos conformados de ancho y amplitud fijos que genera el amplificador de corriente del detector utilizado. Se generan dos señales analógicas, una proporcional al flujo con rango lineal dentro de cada una de las décadas ( $1 < n < 10$ ) y otra proporcional al logaritmo del flujo (1V/década). La señal de flujo lineal va acompañada por 6 señales que indican la década.

El valor de flujo lineal se muestra en un display 7-segmentos de 4 dígitos y en un bus serie con aislación galvánica. También se da una indicación del error estadístico del valor mostrado.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo consiste en un módulo Eurocard de 160x100mm con conector tipo C de 64 pines. El frente del módulo es 4U (=20.3mm) de ancho.



FIG. 1. Foto del módulo impulsímetro.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama en bloques del circuito.

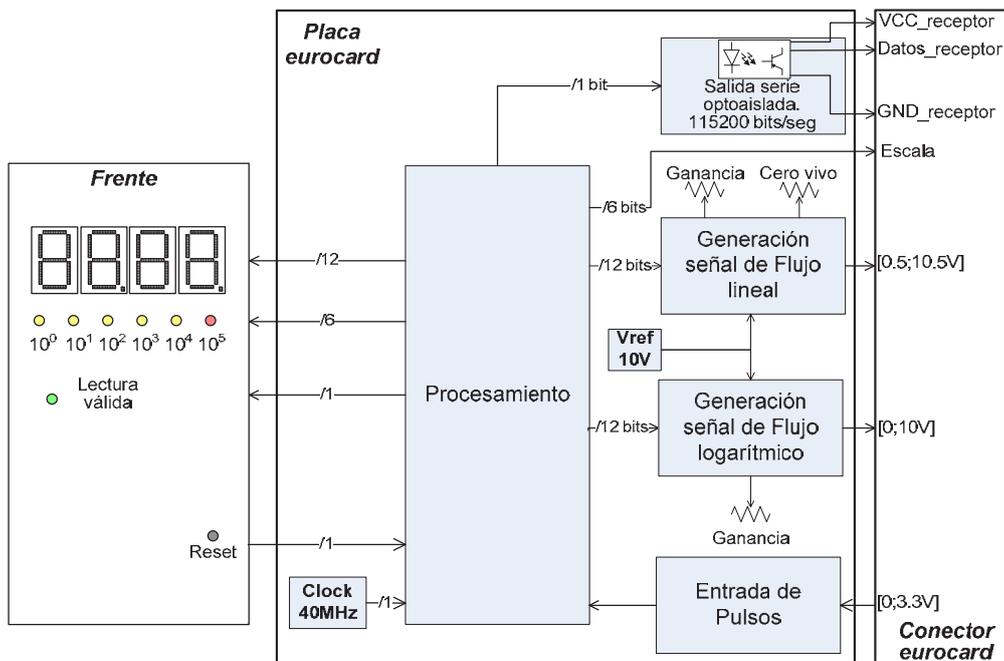


FIG. 2. Diagrama en bloques del circuito eléctrico.

### 3.1. Procesamiento: FPGA

El procesamiento lo realiza una FPGA (Arreglo lógico configurable). Este dispositivo consiste en una cadena (*array*) de celdas básicas, con recursos típicos como tablas lógicas configurables de 3 ó 4 entradas; y 1 ó 2 unidades de memoria tipo flip-flop D. A cada celda llega una línea de pulsos del reloj (*clock*). Los dispositivos comerciales disponen de miles de estas celdas interconectadas entre sí. Con estos recursos es posible realizar las funciones lógicas necesarias y los elementos de memoria permiten la implementación de máquinas de estado secuenciales sincrónicas.

El FPGA se programa utilizando lenguajes de descripción de hardware (HDL), que en el caso de aplicarse a circuitos integrados de alta velocidad (VHSIC – *Very High Speed Integrated Circuit*) se denomina VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*). En la descripción se crean componentes, describiendo sus entradas y salidas, y la función lógica a realizar. También se especifican las interconexiones entre ellos, en forma similar a cuando se dibuja un circuito eléctrico, pero utilizando texto. Este procedimiento permite describir funciones lógicas combinacionales y secuenciales.

Una propiedad interesante de estos dispositivos es el procesamiento en paralelo, ya que no hay un programa ejecutándose, sino que cada componente descrito realiza su función independientemente de cualquier otro componente que no esté conectado directamente con él. El grado de paralelismo está sólo limitado por la cantidad de tablas y unidades bi-estables (*flip-flops*) disponibles.

Otra propiedad que los hace muy versátiles en comparación con un micro-controlador, es que se puede replicar la cantidad de componentes que se necesiten. Por ejemplo si se requiere recibir datos de 'N' líneas serie de recepción, se replican 'N' UARTs (*Universal Asynchronous Receiver /Transmitter*) que trabajan en paralelo. En un micro-controlador este recurso está definido de fábrica, limitando las aplicaciones o haciéndolas más complejas para poder compartir los recursos. Otro ejemplo de versatilidad se aprecia cuando se comparan los contadores disponibles en un micro-controlador que además tienen una capacidad máxima. En una FPGA se crean todos los contadores necesarios y con la cantidad de bits necesarios, sin desaprovechar recursos lógicos. Estas características de paralelismo y configuración ad-hoc, resultan en una mayor velocidad de funcionamiento, personalizando la capacidad de procesamiento. Como contrapartida hay una pérdida de la flexibilidad que proporciona el

software, pero para algunas aplicaciones como la que aquí se describe, esto también resulta en una ventaja.

Los componentes son fácilmente reutilizables en otras implementaciones, cuando se utilizan descripciones estructuradas y jerárquicas.

El lenguaje VHDL permite también escribir pruebas de simulación. Es posible introducir vectores de estímulo temporizados a las entradas del sistema a simular. La señal de salida obtenida se puede comparar con la salida esperada del sistema, pudiéndose hacer un reporte de las diferencias o detener la simulación ante un valor erróneo o falla.

Los distintos fabricantes de FPGAs ofrecen sus ambientes de desarrollo, con una cantidad importante de facilidades gratuitas, incluyendo el simulador.

Para este equipo se eligió una FPGA de la familia ProAsic3 de la corporación ACTEL, que se caracteriza por fabricar dispositivos de tecnología flash. Las características del producto que llevaron a su elección son las siguientes:

- *Fuente de alimentación única*, esto permitió desarrollar la placa de circuito impreso en sólo 2 capas, bajando el costo, la complejidad del circuito impreso y la cantidad de componentes.
- *Un solo chip*, la configuración está guardada en el mismo dispositivo, por lo tanto no hay un tiempo de carga de la configuración típico de las FPGA basadas en tecnología RAM (*Random Access Memory*). Esta característica permite reducir la cantidad de componentes necesarios en el circuito.
- *'Live at power up'*, lo que significa que el dispositivo está funcional antes que la alimentación llegue a la tensión regulada requerida. Una vez pasado el nivel de activación que es alcanzado aproximadamente a la mitad de la tensión de alimentación, los pines de salida están activos.
- *'Neutron immune'*, ya que la tecnología es más inmune a los efectos de daños por irradiación con partículas cargadas y neutrones de alta energía que pudiesen colisionar con el dispositivo. El fabricante se especializa en desarrollar circuitos integrados para uso aeroespacial y militar en las que los equipos están más expuestos a estas radiaciones.

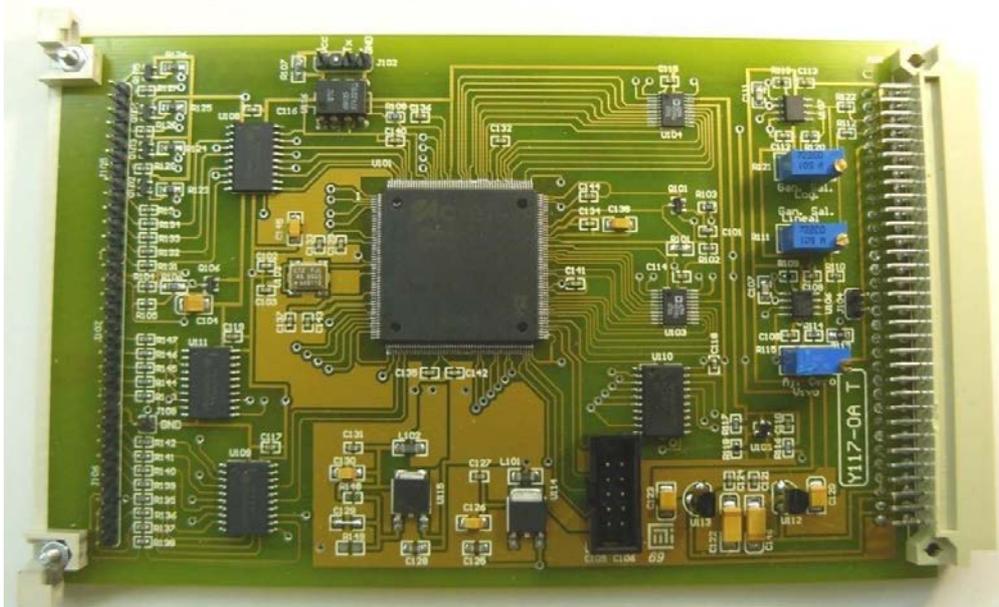


FIG. 3. Fotografía de la placa Eurocard. El circuito integrado central es el FPGA.

El FPGA elegida es el A3P1000 que tiene el equivalente a 24576 D-Flip-Flops, 144Kbits de memoria RAM, 1Kbit de ROM, 1 PLL integrado y 154 pines de entrada/salida. El encapsulado del FPGA es PQ-208, siendo el único que no es BGA (*Ball Grid Array*) con esa cantidad de recursos. La separación entre pines es de 0.5mm.

### 3.2. Alimentación

El módulo requiere una alimentación de 9V/200mA para generar las tensiones que necesitan los componentes digitales, y de niveles de tensión de  $\pm 15V/\pm 100mA$  para generar las tensiones que requieren los amplificadores de salida y los convertidores digital – analógicos (DACs).

### 3.3. Generación de pulsos de sincronización (*clock*)

Se utiliza un circuito de clock que genera una señal de 40MHz y es la entrada a un circuito cerrado de control de frecuencia (PLL- Phase Locked Loop) interno de la FPGA. El PLL genera una señal de 'LOCK' que se utiliza como reset interno, el cálculo se inicia cuando la señal de clock es estable. El nivel de los pines de salida está asegurado a partir de que la alimentación alcanza los 0.85V y se mantienen mientras la señal de LOCK mantiene al dispositivo en RESET.

### 3.4. Entrada de pulsos

La señal de pulsos de entrada debe tener nivel LVTTTL (*low voltage TTL*), siendo 3.3V equivalente a un "1" lógico. La impedancia de entrada es de 1K $\Omega$ . El ancho de pulso mínimo es de 40ns. Se cuenta en el flanco positivo del pulso.

### 3.5. Salidas analógicas proporcionales al flujo lineal y logarítmico

Las salidas de flujo lineal y flujo logarítmico son generadas por sendos DACs de 12 bits. Se utilizó el integrado AD5445 que permite una referencia de 10V y un ancho de banda de salida 10Mhz. Los niveles lógicos son de 3.3V, pudiéndose conectar directamente a la FPGA.

La salida de escala asociada a la salida de flujo lineal está disponible en el conector Eurocard. Las mismas son señales de 3.3V. En caso de ser necesario, se puede reconfigurar la FPGA para que acepte la escala desde el exterior, dado que las señales de escala pasan por un buffer bidireccional controlado por la FPGA. Las siguientes señales son generadas:

|  |  |
|--|--|
| Analógica proporcional al flujo lineal:      | Rango: 0.5 a 10.5V<br>Cambio automático de escala<br>Precisión: 1% de fondo de escala<br>Error estadístico ( $\pm 1\sigma$ ) < 20% |
| Indicación de escala:                        | 6 salidas LVTTTL 3.3V, activas en alto, cada una correspondiente a una escala.   |
| Analógica proporcional al flujo logarítmico: | Rango 0.5 a 10V<br>1V/década   |

### 3.6. Display

El indicador (*display*) de 4 dígitos (unidades de 7-segmentos) se controla desde la FPGA donde se implementó un componente multiplexor de cada dígito, otro que hace la conversión a código decimal binario (*BCD – binary-coded decimal*) y otro componente que convierte de BCD a 7 segmentos. Esta generación de la señal de indicación es un buen ejemplo de la versatilidad de la FPGA, ya que permite que se ahorre el espacio físico y la utilización de 3 circuitos integrados más.

Los indicadores se encuentran en la placa de circuito impreso del frente. Son de cátodo común, y cada uno se conecta a 4 transistores que hacen las funciones de habilitación. Se utiliza también el punto en 2 de los dígitos (señal *Dot-Seg*).

El multiplexado de hace cada 1ms, es decir que cada segmento se prende cada 4 ms durante 1ms.

### 3.7. Salida de datos serie

El equipo provee una salida de datos opto-acoplada por la que se transmite en formato serie el estado interno de las variables más importantes del cálculo. La velocidad de transmisión es de 115200 bits/seg. El equipo que lea esta señal debe proveer la alimentación, que determinará el nivel de tensión de la señal de salida y una línea de tierra, que estará aislada de la tierra interna. La señal Tx\_out podrá ser de hasta 15V y la alimentación de 15V máximo. El valor de la resistencia de salida se determina en función del nivel de tensión requerida.

La transmisión se inicia luego de finalizada cada medición automáticamente sin que la FPGA reciba ningún tipo de comando desde el exterior. El mínimo tiempo entre mediciones es de 10ms, por lo que se pueden llegar a transmitir hasta 115 bytes de información por cada una.

En la fase de verificación del código VHDL se utilizó esta salida para adquirir los resultados, graficar las variables de medición, determinar el valor final de error y tiempo de respuesta del equipo.

### 3.8. Frente

En la Fig. 4 se describe la funcionalidad de cada indicador en el frente del módulo. Los componentes se montan sobre una placa de circuito impreso del tamaño del frente, que se atornilla al frente de aluminio.

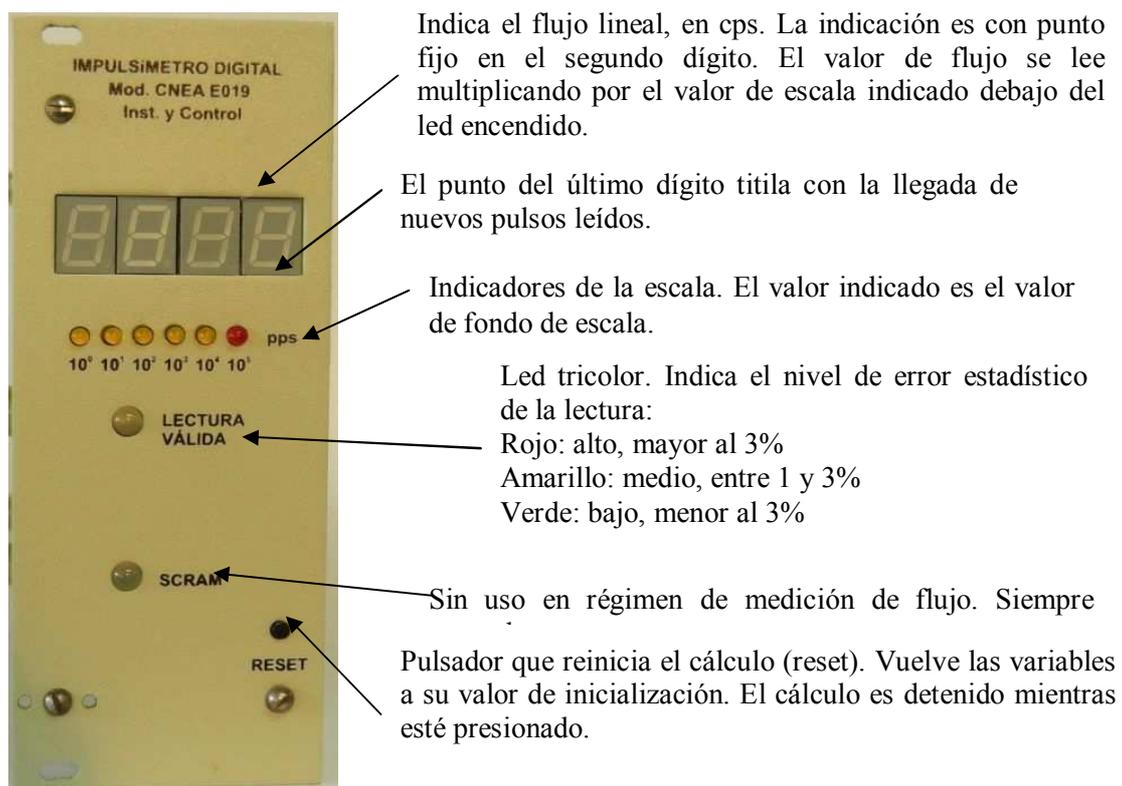


FIG. 4. Indicadores del panel frontal del módulo.

La indicación de sobrepaso (“overflow”) se hace prendiendo los segmentos superiores de los displays. El “overflow” se produce al medirse un flujo mayor a  $2.097 \cdot 10^6$  cps o si se quiere representar un

número mayor a 99.99 en el display. La indicación de bajo rango (“underflow”) se genera en caso de medirse un flujo menor a 1cps, y se indica preñdiendo los segmentos inferiores de los displays. En el conector Eurocard se tienen disponibles las señales relacionadas en la Tabla 1.

TABLA 1. LISTA DE PINES DE ENTRADA/SALIDA DEL CONECTOR EUROCARD DEL MÓDULO.

| Señal       | Pin     | Descripción  |
|-------------|---------|--|
| Loop        | c2,a2   | Lazo de inserción del módulo                         |
| Sal. Log.   | c3      | Salida de flujo logarítmico                          |
| AGND        | a3, c5  | Masa analógica                                       |
| Sal.Lineal  | c4      | Salida de flujo lineal                               |
| Tx_out      | a10     | Salida de datos serie optoaislada                    |
| gnd_out     | a11     | Masa aislada del transmisión de datos serie.         |
| Vcc_out     | a12     | Alimentación externa para transmisión de datos serie |
| GND         | c12     | Masa digital   |
| Entrada     | c13     | Entrada de pulsos                                    |
| Reset       | c14     | Entrada de reset externo TTL 3.3V, activo alto       |
| Scram       | c16     | Salida opcional no utilizada                         |
| Sal_Escala5 | c19     | Bit indicador de escala por $10^5$ , activo alto     |
| Sal_Escala4 | c20     | Bit indicador de escala por $10^4$ , activo alto     |
| Sal_Escala3 | c21     | Bit indicador de escala por $10^3$ , activo alto     |
| Sal_Escala2 | c22     | Bit indicador de escala por $10^2$ , activo alto     |
| Sal_Escala1 | c23     | Bit indicador de escala por $10^1$ , activo alto     |
| Sal_Escala0 | c24     | Bit indicador de escala por $10^0$ , activo alto     |
| +8.5V       | c26,a26 | Entrada de alimentación de +8.5V                     |
| +24V        | c29,c30 | Entrada de alimentación de +24V                      |
| -24V        | a29,a30 | Entrada de alimentación de -24V                      |
| GND         | c32     | Masa digital   |

#### 4. CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Para la verificación del equipo se utilizó un “Simulador de Detector de Flujo Neutrónico” [9] desarrollado en el sector Instrumentación y Control de CNEA. El mismo está basado en una FPGA de Xilinx, e implementa un generador de pulsos aleatorios con distribución tipo Poisson. El parámetro de la distribución  $\lambda$ =flujo, es controlado desde una PC a través de un puerto USB. La tasa de cuentas generada por este equipo cubre todo el rango de medición del impulsímetro digital. Es posible simular flujo con una cierta tasa de variación variando el parámetro que envía el PC. La salida del simulador es una señal LVTTTL de 3.3V, con ancho de pulso variable desde 20ns a 1.3us, y el cual es configurado desde la PC.

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos de las mediciones realizadas, utilizando el simulador de detector con ancho de pulso de 100ns. En la Fig. 5 se muestran 10 mediciones de tasa de cuentas de 1000 cps a 2000 cps.

TABLA 2. VALORES MEDIDOS (PROMEDIO DE 10 MEDICIONES).

| <i>Flujo<br/>[cps]</i> | <i>RMS del error de flujo<br/>promedio medido<br/>[%]</i> |              | <i>Tiempo de retraso<br/>medido en la detección<br/>de un salto por 2 de<br/>flujo<br/>[segundos]</i> |              | <i>Tiempo de refresco<br/>medido<br/>[segundos]</i> |              |
|------------------------|---|--------------|---|--------------|---|--------------|
|                        | <i>Valor<br/>medio</i>                                    | <i>Sesgo</i> | <i>Valor<br/>medio</i>  | <i>Sesgo</i> | <i>Valor<br/>medio</i>                              | <i>Sesgo</i> |
| $10^0$                 | 9.3   | 1.9          | -   | -            | 31.47   | 8.4E-01      |
| $10^1$                 | 3.5   | 1.3          | 78  | 40           | 3.142   | 2.7E-02      |
| $10^2$                 | 2.67  | 0.65         | 7.4   | 3.9          | 0.313   | 1.2E-03      |
| $10^3$                 | 2.30  | 0.54         | 0.53  | 0.29         | 0.031   | 1.4E-04      |
| $10^4$                 | 1.96  | 0.10         | 0.064   | 0.003        | 0.013   | 1.5E-05      |
| $10^5$                 | 0.59  | 0.06         | 0.056   | 0.007        | 0.014   | 1.0E-04      |
| $10^6$                 | 8.42  | 0.02         | 0.051   | 0.006        | 0.018   | 2.4E-06      |

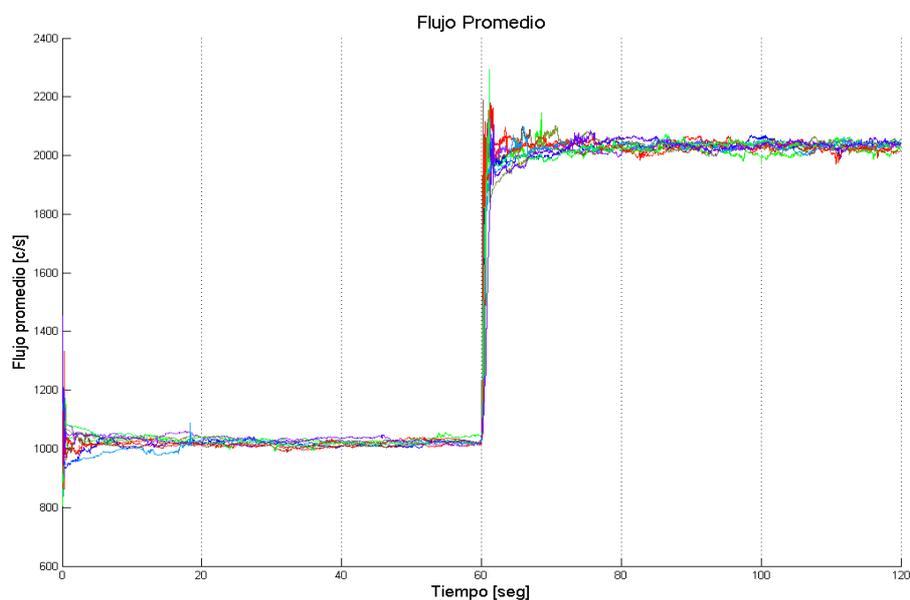


FIG. 5. Valores promedio del flujo medido en las 10 mediciones de perfil de salto por 2 para flujo inicial igual a  $10^3$  c/s.

El equipo se probó también en la columna térmica del reactor de producción de radioisótopos (RA3), con un prototipo de canal neutrónico de amplio rango (tipo Campbell). En la experiencia [10] se fueron extrayendo barras en forma escalonada para verificar el funcionamiento de esta cadena. Los datos adquiridos de flujo lineal y la corriente de un canal de marcha del reactor, utilizado como referencia, se muestran en la Fig. 6.

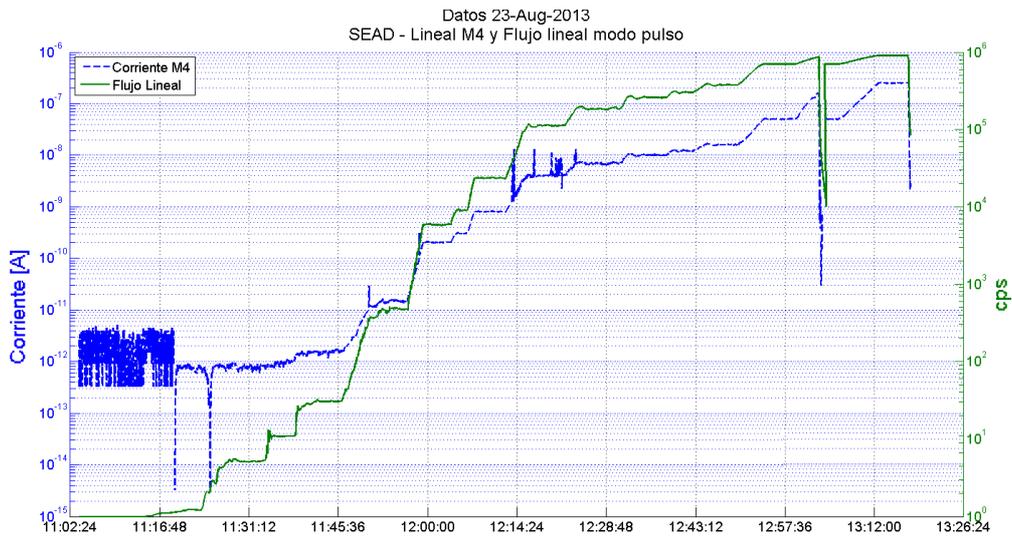


FIG. 6. Corriente de marcha 4 y flujo lineal modo pulso.

## 6. CONCLUSIONES

Se obtuvo un instrumento en el que se logra un compromiso aceptable entre el error debido a las características aleatorias de la señal a medir y el error introducido por la demora en la medición en presencia de variaciones del valor medio de la señal.

Estas características permitirán utilizar la señal de salida de este instrumento para iniciar un disparo por flujo alto y no solamente generar una inhibición en el movimiento de subida de barras como ocurre actualmente en la mayoría de los reactores.

## REFERENCIAS

- [1] VERRASTRO, C., "Medidor digital de Flujo Neutrónico y Variación Relativa de Flujo Neutrónico, presentado en la XXIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (ATTN), Córdoba, Argentina (Noviembre 1995).
- [2] VERRASTRO, C., "Digital Ratemeter", presentado en la American Nuclear Society NPIC-HMIT Pennsylvania, USA (Mayo 1996).
- [3] HOFER, C., PITA, A., VERRASTRO, C., MAINO, J., "Nuclear Instrumentation For Research Reactors" Proceedings VI ENAN, Poso das Caldas, Brasil (Agosto 1997).
- [4] VERRASTRO, C., "Multiaverage Ratemeter", presentado en IAEA IWG-NPPCI, Buenos Aires, Argentina (Junio 1999).
- [5] VERRASTRO, C., "Memoria de cálculo software impulsímetro multipropósito", reporte de la SGcia. IyC, CNEA, Argentina (2001).
- [6] VERRASTRO, C., "Método e Instrumento para la Estimación del Valor Medio de Señales Estocásticas y su Variación Temporal", Patente CNEA: AR027899 (A1) (2003).
- [7] RÍOS, G., VERRASTRO, C., "Medición de Flujo durante la Puesta en Marcha en Frío de una Central Nuclear de Potencia", presentado en la XXXV Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (ATTN), Argentina, 10-14 Noviembre 2008.
- [8] RÍOS, G. E., "Impulsímetro Digital para Canal de Arranque de Reactores de Investigación". Tesina de la carrera de 'Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible', Instituto Dan Beninson, Buenos Aires, Argentina (Marzo 2012).
- [9] FERRUCCI, F.N.; VERRASTRO, C. A.; RÍOS, G.E.; ESTRYK, D.S., "FPGA-based random pulse generator for emulation of a neutron detector system in a nuclear reactor", IEEE, Programmable Logic (SPL), 2011 VII Southern Conference Digital Object Identifier: 10.1109/SPL.2011.5782633, Page(s): 103 – 108 (2011).
- [10] RÍOS, G.E., "Resultados de la medición con el prototipo de canal de amplio rango del SIN en columna térmica del RA3". reporte IN-06Y-120, SGcia. IyC, CNEA, Argentina (2013).

# SISTEMA DE CONTROL ALTERNATIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE PARADA DE EMERGENCIA CON INYECCIÓN DE BORO EN LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA II

Claudio Verrastró<sup>(e)</sup>, Daniel Estryk, Juan Alarcón, Gloria Ríos, Franco Ferrucci, Francisco Rodriguez, Gonzalo Quesada

*CNEA – Sub-Gerencia de Instrumentación y Control*

*Argentina*

## **Resumen:**

Se presenta el Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de la Inyección de Boro diseñado y construido para ser instalado en la Central Nuclear de Atucha II (CNAII), actualmente en la etapa de puesta en marcha. Este sistema fue requerido por la CNAII para cubrir los requisitos adicionales impuestos por un accidente base de diseño de rotura total del conducto principal del fluido refrigerante (Rotura 2A), originalmente no previsto en el diseño de la Central. El sistema fue implementado utilizando tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*), y respetando la arquitectura original del sistema implementado por el constructor de la Central. Este cambio de tecnología permitió bajar el tiempo de respuesta del sistema de seguridad a 11,27 mseg

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector de Instrumentación de la CNAII contrató al sector de Instrumentación y Control (I&C) de la CNEA para el desarrollo de un sistema de instrumentación alternativo ad-hoc, que realizara mediciones de presión del circuito primario y que ante una caída abrupta de la misma tuviera la capacidad de disparar rápidamente el Sistema de Inyección de Boro en forma paralela y redundante al Sistema de Protección del Reactor (SPR) original de la central.

Este requerimiento surge a partir de cambios en los conceptos de seguridad referentes a los accidentes de pérdida de líquido refrigerante (*LOCA – Loss of Coolant Accident*) y el intento de cubrir roturas mayores a 0.1A, que no estaban incluidas en los Accidentes Base de Diseño (*DBA – Design Base Accident*) de la central [1, 2].

Este nuevo sistema opera en paralelo al sistema existente (Teleperm C), sin ninguna relación de prioridad entre ellos. Ambos sistemas de instrumentación convergen en los módulos denominados Unidades Encajonables, ya presentes en la central.

Otro factor que asegura la independencia entre el SPR y el nuevo sistema de instrumentación es la utilización de sensores de presión exclusivos para cada uno. El nuevo sistema monitorea la presión de ambos lazos (*loops*) del circuito de refrigerante primario con 6 sensores propios y produce un disparo cuando se detecta una caída anómala en la presión.

---

<sup>e</sup> Contacto para correspondencia, email: [cverra@cae.cnea.gov.ar](mailto:cverra@cae.cnea.gov.ar)

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de Atucha II (SIA) se describe a partir de varios documentos, fundamentalmente de los Requerimientos [3] y de la Ingeniería de Detalle del SIA [4].

El SPR es el sistema que tiene como objetivo principal asegurar en todo momento el cumplimiento de las funciones de seguridad en una central nuclear [5,6]. Las funciones de seguridad principales son:

- 1) Control de la reactividad.
- 2) Control de inventario del circuito primario y el adecuado transporte de calor hacia la fuente fría final.
- 3) Adecuado confinamiento para evitar la liberación de material radioactivo.

Para ello, el SPR dispone de un conjunto de componentes que inicia de manera automática, los sistemas frontales de seguridad de modo de garantizar que no se excedan los límites especificados de diseño de la central. El SPR siempre tiene prioridad sobre las acciones del sistema de control de la planta.

Entre los sistemas del SPR se encuentran los Sistemas de Instrumentación, encargados de monitorear un conjunto de variables, denominadas variables de seguridad y de iniciar acciones de protección cuando dichas variables excedan los límites preestablecidos. Dichas variables corresponden a magnitudes termo-hidráulicas, nucleares y radiológicas.

### 2.2. Sistemas de Parada de CNAII

Para cumplir con la función de seguridad de control de reactividad, el SPR dispone de dos Sistemas de Apagado del Reactor (SAR) independientes y diversos. El Primer Sistema de Apagado de Reactor (PSAR) corresponde al Sistema de Caída de Barras Absorbentes de Neutrones; el segundo (SSAR) es el Sistema de Inyección Rápida de Veneno Neutrónico Líquido. En el caso de la CNAII el veneno líquido está compuesto por una solución de ácido bórico en agua pesada.

### 2.3. Criterios de diseño para el SIA

Los criterios tomados en cuenta en el diseño del SIA son los siguientes:

- **Conservador.** Para su implementación se utilizan tecnologías y criterios de diseño lo suficientemente probados.
- **Redundancia.** De modo de cumplir con la tolerancia a la falla única y poder alcanzar los criterios de confiabilidad y disponibilidad acordes a los criterios de seguridad requeridos para el sistema el SIA cuenta con 4 sub-sistemas (*'trenes'*) redundantes de manera equivalente al SPR original de la central.
- **Diversidad.** Las funciones del sistema alternativo se implementan utilizando diseños y tecnologías diferentes. Este concepto es importante para evitar las fallas de modo común. Además se utiliza este criterio internamente en el diseño del SIA en los módulos más complejos, como se detallará más adelante.
- **Independencia.** Cada tren redundante (*redundancia*) tiene la capacidad de cumplir con su función sin ser afectado por la falla de otra redundancia.

- **Tolerancia a falla simple.** Una falla única en el sistema no debe impedir que se disparen las acciones de protección cuando sean solicitadas.

Una característica importante del SIA es que cuenta con tecnología digital basada en dispositivos de lógica configurable FPGA/CPLD (*Complex Programmable Logic Device*). Estos dispositivos son actualmente utilizados en aplicaciones críticas de la industria nuclear y aeroespacial, ya que brindan flexibilidad de implementación, conservando máximos requerimientos de confiabilidad siguiendo los lineamientos de las normas para su aplicación en sistemas de seguridad para centrales nucleares [7].

## 2.4. Arquitectura del SIA

En la Fig. 1 se presenta el esquema general del SIA. Este nuevo sistema monitorea el valor de la presión de los dos lazos que componen el circuito primario del reactor utilizando sensores triple-redundados. Las mediciones luego ingresan a 4 trenes de instrumentación siguiendo la estructura mostrada en la figura. Cada tren genera señales de disparo que hacen actuar las válvulas piloto, encargadas finalmente de comandar las válvulas neumáticas principales que presurizan los tanques de boro y provocan la inyección del veneno neutrónico.

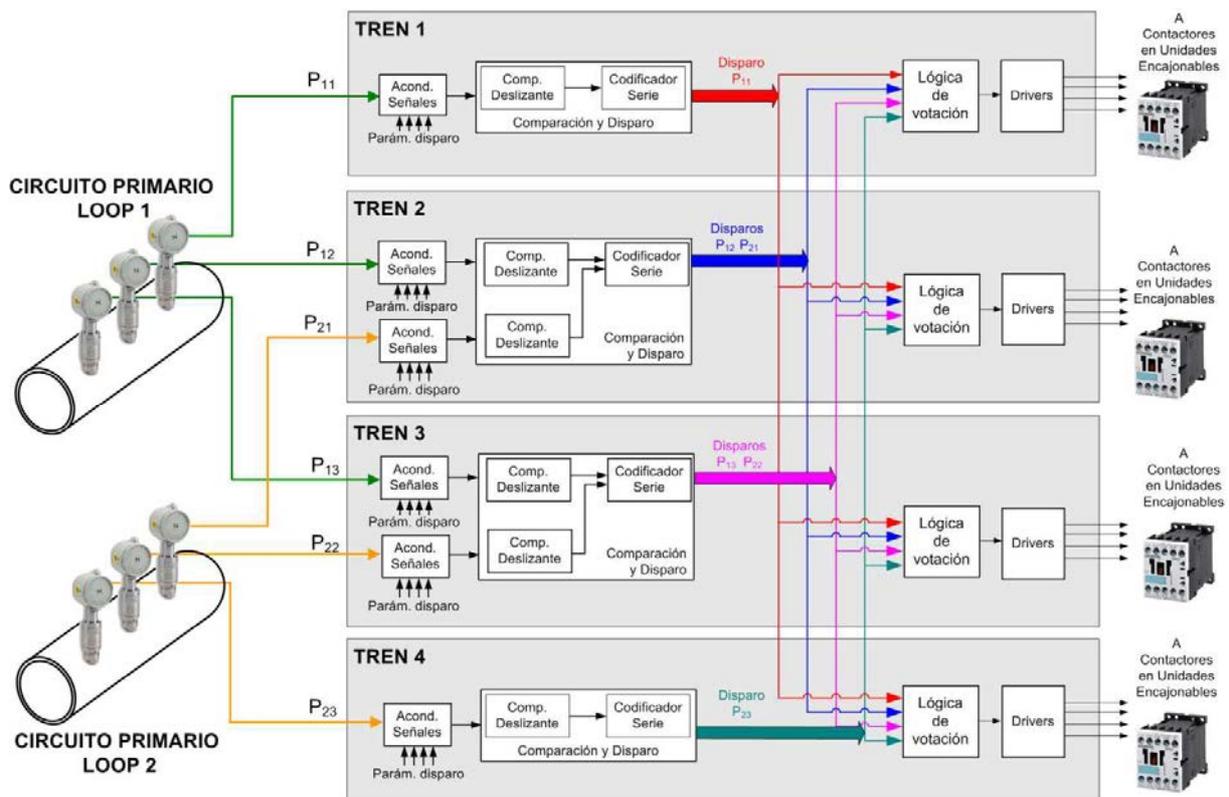


FIG. 1. Arquitectura del SIA, esquema general.

### 2.4.1. Sensores

Los sensores de presión son provistos por la CNAII y están especificados en el documento de requerimientos del SIA [3]. Tienen un rango de trabajo de  $0 - 150 \text{ bar}$ , correspondiente al **rango eléctrico de  $4 - 20 \text{ mA}$** . Además, a partir de las especificaciones provistas por CNAII se asume que los sensores tienen un **tiempo de respuesta de  $7 \text{ ms}$** , correspondiente al tiempo de establecimiento al generarse un salto de presión de rango completo.

#### 2.4.2. Módulos y Trenes de Instrumentación

Tal como se observa en la Fig. 1, los trenes 1 y 4 reciben señal de un sensor, mientras que los trenes 2 y 3 lo hacen de 2 sensores. Esta asimetría proviene del hecho que existen 6 sensores y 4 trenes de instrumentación, respetando la arquitectura del sistema original.

Las señales de presión proveniente de los sensores, ingresan a los módulos **Acondicionadores de Señales**, donde se realiza la transformación corriente-tensión. Dichos módulos también se utilizan para establecer los parámetros de disparo de la señal de presión. Existen tantos módulos acondicionadores como señales de presión ingresan al tren.

En el siguiente módulo denominado **Comparación y Disparo** se digitalizan las señales analógicas y por cada una de las señales de presión recibidas se calcula su velocidad de caída. De este modo, en función de los valores límites establecidos en el módulo acondicionador, se genera una señal de disparo cuando dichos límites son sobrepasados. El algoritmo digital que realiza esta función se encuentra descrito más adelante (2.6.2) y más detalladamente en [8]; su diseño se realizó para responder a las características del sistema analógico original de Siemens [9]. Finalmente, este módulo codifica la condición de disparo de cada señal de presión en una trama serie y la envía al siguiente módulo denominado **Módulo de Votación**. Dicha trama se transmite tanto al módulo de votación del propio tren como a los módulos de votación de los demás trenes.

La información de un Módulo de Comparación y Disparo se envía a los Módulos de Votación de los otros trenes a través de interfaces galvánicamente aisladas utilizando los módulos **Transmisor/Receptor Fibra Óptica**.

El Módulo de Votación realiza la votación de las señales de disparo propias y de las que provienen de los otros trenes y genera la señal disparo de tren. Dicha señal se transmite al **Módulo Driver** de Potencia y éste finalmente comanda a los contactores que accionan las válvulas piloto.

Muchos de los módulos nombrados se comunican con la central a través de señales digitales. Para ello existe el **Módulo Adaptador Entrada/Salida**, encargado de adaptar los valores de tensión.

Todos los módulos pertenecientes al mismo tren están dispuestos en un subrack Eurocard tipo ES902 de 19" de altura simple 3U ( $5.25'' = 133.35\text{mm}$ ).

#### **Diversidad**

Una característica del diseño es la introducción del concepto de diversidad en cada uno de los trenes de instrumentación. Esto implica que varios de los módulos electrónicos se encuentran implementados dos veces, utilizando diferentes tecnologías y distintos desarrolladores. De esta forma, cada par de módulos diversos homólogos funcionan en paralelo en el mismo tren y realizan exactamente la misma función, a pesar de que cada uno de ellos haya sido implementado utilizando una tecnología diferente.

En la Fig. 2 se pueden distinguir los elementos que se encuentran diversificados en los trenes de instrumentación, éstos son:

- Módulo de Comparación y Disparo
- Módulo de Votación

Los módulos diversos homólogos están conectados entre sí con el objetivo de poder realizar un chequeo cruzado de sus resultados, generando una señal de falla cuando se detectan discrepancias.

Una característica importante del concepto de diversidad es que no existe ningún tipo de prioridad entre módulos diversos homólogos. Esto difiere de la arquitectura tradicional encontrada en otros sistemas de seguridad, en que un módulo de alta confiabilidad se encuentra realizando una función

determinada y, por otro lado, otro módulo de menor jerarquía realiza tareas de supervisión. En la arquitectura tradicional el módulo de supervisión no cumple la función de seguridad y se limita a producir señales de alarma cuando detecta algún tipo de error.

La ausencia de prioridad entre los módulos diversos hace que en algún punto dicha diversidad se necesite "resolver" de modo de generar una única señal de disparo de tren. El encargado de resolver la diversidad es el módulo de *drivers*, que genera un único disparo mediante una lógica 1 de 2 entre los disparos de las dos unidades de votación.

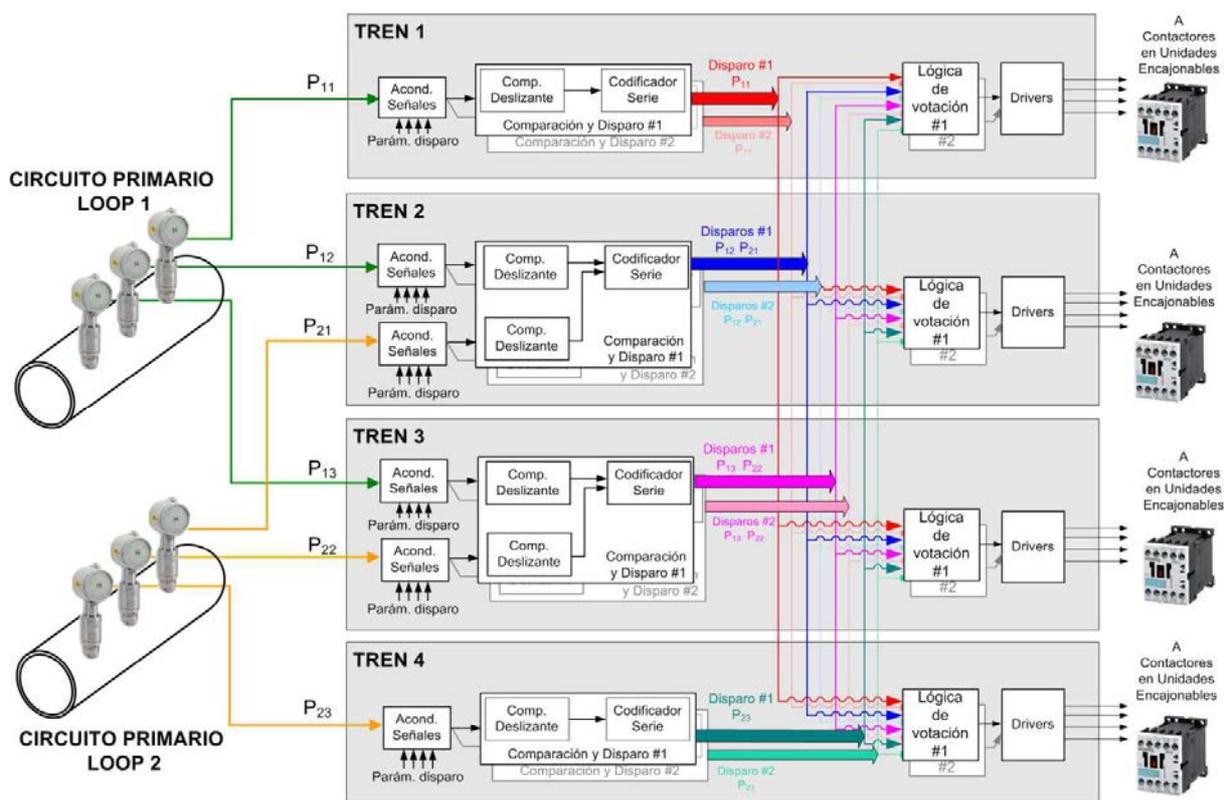


FIG. 2. Arquitectura del SIA. Esquema donde se observa la implementación diversa de algunos módulos.

### Comparación de Sensores y Registro de Datos

Además de los módulos ya nombrados, cada tren cuenta con un módulo **Concentrador de Tren**, encargado de reunir la información del estado interno generado por las 2 diversidades de Comparación y Disparo y de Votación. Estos datos, junto a otras señales del tren, son codificados en una trama serie y enviados por fibra óptica a un módulo de **Comparador de Sensores**, único en el SIA. Éste tiene como función detectar derivas tanto en las lecturas de presión de los sensores como en la configuración de los parámetros de disparo del tren.

Junto al módulo Comparador de Sensores se encuentra el módulo **Registrador de Datos**, también único en el sistema, cuyas funciones principales son, por un lado, realizar un almacenamiento histórico de los datos del SIA en una memoria no volátil y, por otro, permitir el acceso remoto a toda esta información vía una conexión Ethernet. Los módulos Comparador de Sensores y Registrador de Datos se encuentran instalados en uno de los 4 trenes de instrumentación, en un subrack exclusivo llamado **Tren de Registro**. Dicho subrack también dispone de módulos Entrada/Salida para la comunicación con la central.

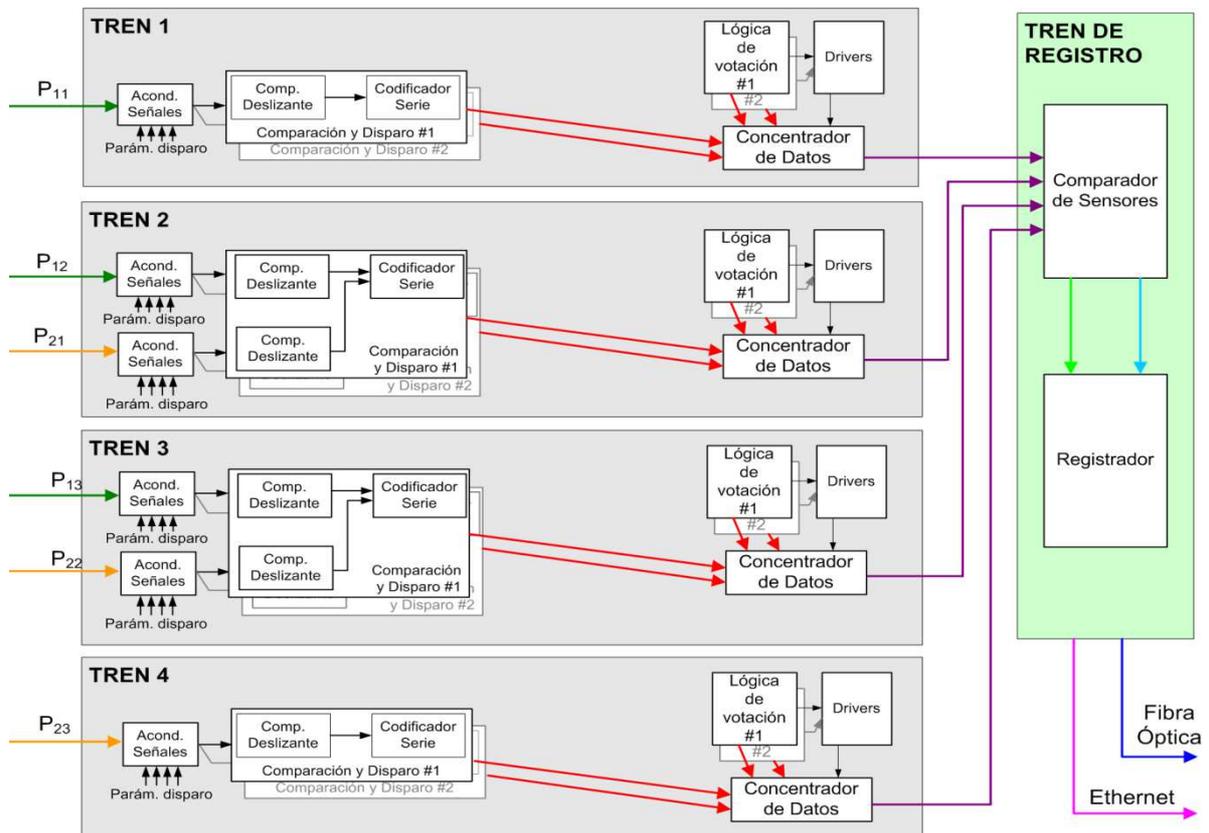


FIG. 3. Arquitectura del SIA. Esquema donde se observa la confluencia de los datos internos del sistema.

### Señales de los Trenes

La Fig. 4 muestra un esquema de los 4 trenes de instrumentación del SIA y el conjunto de señales que se intercambian con la central. En este esquema no están indicadas las señales de entrecruzamiento entre trenes, internas al SIA.

## 2.5. Generalidades de la Implementación

En esta sección se describen los tipos y características de las señales del SIA, así como las señales intercambiadas entre el SIA y la central.

### 2.5.1. Alimentación

La alimentación de los módulos se ajusta a la del sistema Teleperm C de Siemens. En dicho sistema los pines L+ y L- proveen a los módulos de +24V (20 a 30V) y -24V (-20 a -30V) respectivamente. El pin M corresponde al retorno de 0V (tierra) de alimentación. PM provee una tensión de +24V cuya función es alimentar las etapas de salida de los componentes de señalización.

La información detallada de la alimentación provista a los sistemas Teleperm C se puede encontrar en la Sección *Modules* de [10].

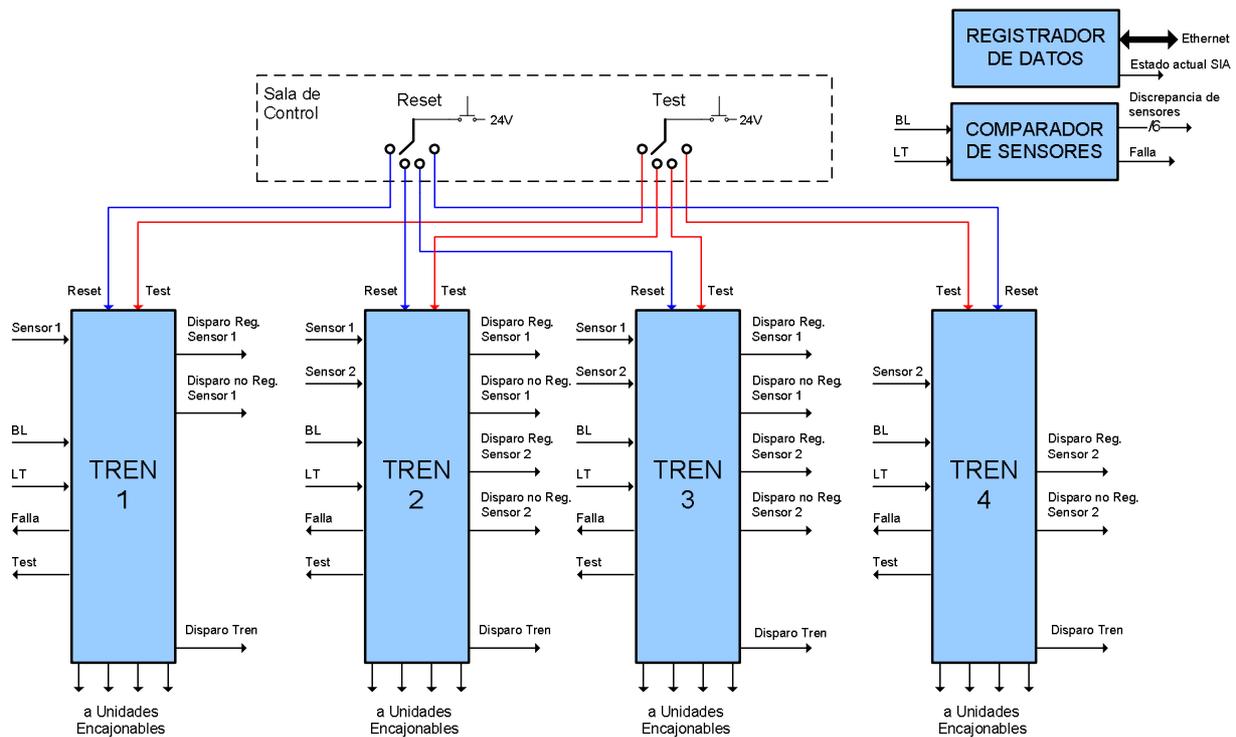


FIG. 4. Señales intercambiadas entre el SIA y la instrumentación de la central. No se incluyen en este esquema las señales de entrecruzamiento de trenes.

### 2.5.2. Señales Analógicas

Las señales analógicas provenientes de los sensores son señales de corriente de 4-20mA. La alimentación de estos sensores es provista por el SIA. La conexión con ellos se hace a través de dos hilos.

Las señales analógicas internas de los trenes son señales de tensión de rango 2-10V. El sesgo de 2V permite a los módulos detectar una situación de desconexión. El rango máximo permitido de estas señales es de 0-12V.

### 2.5.3. Señales Digitales

#### Interfaz con la central

La interfaz con la central se realiza a través de señales de rango 0-24V con los niveles lógicos Teleperm C, los mismos están definidos en [10].

Las señales provenientes de la central son todas activas en alto y el módulo Adaptador de Entradas/Salidas que las recibe tiene una resistencia pull-down sobre cada una, que asegura un cero lógico en el caso de desconexión. Por otra parte, todas las salidas a la central son adaptadas también por este módulo y son activas en bajo.

Las únicas señales digitales que difieren de esta norma son las señales de inserción. Las mismas presentan tensiones de 24V a través de una resistencia de 4.7KΩ al estar todos los módulos insertados, mientras que al desconectar cualquier módulo del subrack, la señal respectiva quedará flotante.

### ***Interfaz entre trenes***

Las señales entre cadenas están galvánicamente aisladas y son señales dinámicas. La interfaz se implementó mediante fibras ópticas (opto-acoplamiento).

### ***Interfaz entre módulos***

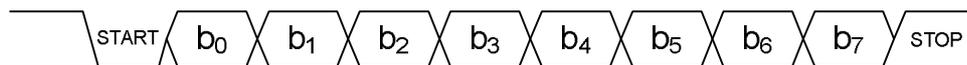
Las señales digitales entre módulos son de tipo LVTTTL 3.3V[11], protegidas contra cortocircuito a través de resistores. Además, todas las entradas tienen una resistencia pull-down que asegura un cero lógico en el caso de desconexión del módulo que genere la señal.

#### ***2.5.4. Señales de Actuación***

El SIA genera por cada cadena 4 señales de 24V con capacidad de 500mA cada una, protegidas contra cortocircuitos y picos de cargas inductivas. Estas señales accionan los contactores, cuyos contactos de actuación se colocan en serie a los preexistentes en las unidades encajonables, de manera que tanto el SIA como el SPR dispansen las válvulas pilotos en forma independiente.

#### ***2.5.5. Señales serie LVC 3.3V/Óptico***

Todas las señales de comunicación serie son de tipo asincrónica, de parámetros 921600/8-N-1: 8 bits de datos (1 byte), sin bits de paridad, 1 bit de stop. La tasa de transferencia es de 921600 bits/seg. Los bits de datos son precedidos por un bit de start y están ordenados de manera de enviar primero el bit menos significativo b0:



*FIG. 5. Formato de transmisión asincrónico serie utilizado en el SIA.*

De este modo, el tiempo de transferencia de cada byte b7..b0 es  $T_B=10.85\mu\text{seg}$ , ya que por cada byte se requieren 10 bits (start + b7..b0 + stop).

En el SIA la información no es transmitida en forma de bytes aislados, sino agrupados formando tramas.

En las señales de transmisión serie de tipo LVC 3.3V, el '1' lógico se corresponde al nivel alto eléctrico y viceversa; en las transmisiones vía canal óptico, el '1' lógico coincide con la presencia de luz en el canal.

### ***Algoritmos de Chequeo de Trama***

Para el chequeo de tramas serie recibidas por los módulos se utiliza el algoritmo CRC (Cyclic Redundancy Check). Para las tramas cortas (hasta 2 bytes de longitud) se utiliza un CRC-5, y para las demás tramas el CRC-14.

#### ***2.5.6. Verificación de inserción de los módulos***

Se realiza la verificación de inserción de los módulos de la misma manera que la implementa Teleperm C.

La placa de interconexiones hila una señal digital de 24V suministrada en uno de los extremos de esta placa, y dentro de cada módulo se conecta el par de pines correspondiente de manera de darle

continuidad a la señal y obtener los 24V del otro extremo, si todos los módulos están correctamente conectados.

### 2.5.7. Indicaciones del Frente del Módulo

Todos los módulos que poseen diodos LED (Light Emitting Diode) de indicación en el frente, implementan la lógica que se observa en la Fig. 6. La señal de Blinking permite sincronizar el parpadeo de todos los LEDs mientras que Lamp Test se utiliza para verificar que los LEDs funcionen correctamente.

En operación normal todos los LEDs se encuentran apagados, siguiendo con el mismo criterio de funcionamiento de la instrumentación de la central.

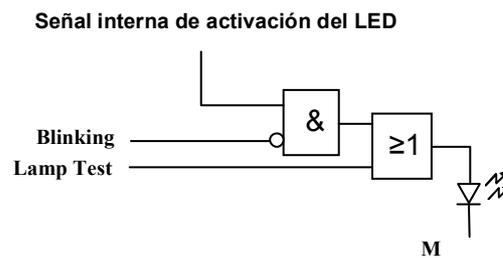


FIG. 6. Lógica de LEDs de indicación de los frentes de módulo.

### 2.5.8. Generación de Fallas

Las señales de falla presentes en el sistema tienen las siguientes características en común:

- Son del tipo activo por nivel bajo.
- Son no-registradas, por lo que dejan de estar activas cuando desaparece la condición de falla.
- Tienen una duración mínima de 100ms (por lo que si la condición de falla tiene duración menor a 100ms, la señal de falla permanecerá activa hasta cumplir con dicho tiempo). La duración mínima de 100ms también está asegurada en el caso que la señal de falla se transmita por una trama serie.
- No existe relación alguna entre las señales de falla y la señal reset (las fallas no son reseteadas por dicha señal).
- Todos los módulos que generan fallas disponen de uno o varios LEDs de anuncio de fallas en el frente del módulo. Estos LEDs también son afectados por las señales Blinking y Lamp Test, mencionadas en la Sección 2.5.7.

## 2.6. Descripción de los módulos del sistema

Para implementar el sistema se diseñaron un conjunto de módulos, los cuales se describen brevemente a continuación

### 2.6.1. Módulo Acondicionador De Señales

Este módulo realiza cuatro funciones:

- Alimentar un transmisor de corriente 4 – 20mA, tomar su señal y convertirla a una señal de tensión 2V – 10V.
- Generar 4 señales de tensión de 2V – 10V de los parámetros del algoritmo de detección “A”, “B”, “LA” y “CPA” que se describen más adelante. Los mismos son variables desde el frente del módulo a través de potenciómetros a tornillo que no sobresalen del frente del módulo.
- Generar una señal de corriente de 4 – 20mA copia de la señal de entrada aislada galvánicamente.
- Generar dos salidas serie LVC 3.3V que corresponden a las señales de test y reset para los módulos de Comparación y Disparo. La señal test está normalmente en ‘1’ lógico y se pone en cero cuando se cortocircuita el jumper TEST; mientras que la señal reset esta normalmente en ‘0’ y se pone en ‘1’ cuando se presiona el pulsador de RESET. Ambos accionamientos están presentes en el frente del módulo.

El módulo genera 6 señales de salidas analógicas cuyos rangos se detallan en la Tabla 1.

TABLA 1. SEÑALES ANALÓGICAS GENERADAS POR EL MÓDULO ACONDICIONADOR DE SEÑALES.

| Parámetro  | Descripción   | Rango (Volt) | Rango magnitud original |
|------------|---|--------------|-------------------------|
| <b>P</b>   | Señal de presión, proveniente del sensor y convertida a voltaje por el módulo acondicionador  | 2.0 - 10.0   | 0 - 150 bar             |
| <b>A</b>   | Máxima pendiente negativa permisible  | 2.0 - 10.0   | 0 – 50 bar/s            |
| <b>B</b>   | Máxima pendiente positiva permisible  | 2.0 - 10.0   | 0 – 50 bar/s            |
| <b>CPA</b> | Máxima discrepancia aceptada entre la presión actual y la presión con limitación de pendiente, sin que el algoritmo genere disparo. | 2.0 - 10.0   | 0 – 150 bar             |
| <b>LA</b>  | Valor de presión por debajo del cual el algoritmo no produce disparos.  | 2.0 - 10.0   | 0 – 150 bar             |
| <b>Ref</b> | Voltaje de referencia de módulo acondicionador.   | 10.0         | 10V                     |

### 2.6.2. Módulo De Comparación Y Disparo

La función principal de este módulo es procesar las señales de entrada y los parámetros provenientes del módulo Acondicionador de Señales, de modo de generar la señal de disparo de cada sensor. Este módulo está diseñado para ingresar dos conjuntos de señales de presión y sus parámetros asociados.

Cabe aclarar que la señal de disparo de cada sensor no genera por sí sola la actuación del sistema de extinción, pues ella se conecta a los módulos de votación 2 de 3 (módulos que sí pueden hacer actuar las válvulas piloto cuando se den las condiciones de disparo).

Para cumplir con los requerimientos de diversidad, existen dos implementaciones del módulo de Comparación y Disparo, cada uno utilizando tecnologías diferentes.

El módulo también posee funciones de auto-verificación y verificación cruzada; ésta última encargada de comparar su funcionamiento con el del módulo diverso, presente en el mismo tren.

### ***Algoritmo de Detección de Caída Abrupta de la Presión***

El algoritmo implementado en el módulo corresponde a una versión digital del sistema analógico Siemens [8], cuyo principio de funcionamiento se describen [9].

Por cada lazo monitoreado ingresan al módulo las siguientes señales analógicas:

- **P**: valor de presión proveniente del sensor
- **LA**: valor de presión por debajo del cual el algoritmo no produce disparos.
- **CPA**: margen de disparo
- **A**: máxima derivada negativa aceptable
- **B**: mínima derivada positiva aceptable

La función del algoritmo es detectar una caída de presión y generar una señal de disparo. La señal de presión P se compara con el valor de LA, obteniéndose PA como el máximo entre ambos:

$PA = \max (P, LA)$ . De esta forma, se establece un límite inferior de modo que el algoritmo no produzca disparo para valores de presiones por debajo de LA.

Luego, a partir de PA, A y B se calcula un valor de señal PZ como una versión limitada en derivada de PA, es decir que PZ debe seguir el comportamiento de PA teniendo en cuenta los máximos gradientes A y B.

El algoritmo producirá un disparo cuando  $PZ-PA$  sea superior al margen de disparo CPA, es decir:  $PZ-PA-CPA > 0 \rightarrow$  disparo. Un ejemplo de esto puede observarse en la Fig. 7.

Se puede ver también en esta figura que se generan dos señales, una de Disparo Registrado y otra de No Registrado. La reposición de la primera se realiza a través de la señal reset enviada desde sala de control y acondicionada en el Módulo de Entradas/Salida. La detección de un pulso de reset excesivamente largo produce falla, para exponer un posible error de cableado.

La reposición a través de la señal reset se hace efectiva sólo si la señal de Disparo No Registrado está en la condición de No disparado

Al Módulo de Votación es enviada la señal de Disparo Registrado a través de una trama corta de dos bytes de manera serializada (señal result). Esta trama contiene la información de los Disparos Registrados de los dos lazos.

### ***Discrepancia entre diversidades***

El módulo Comparación y Disparo cuenta con una unidad de verificación cruzada, cuyo propósito es detectar disparidades en el funcionamiento de las 2 diversidades presentes en el tren. Esta unidad se encuentra presente en ambas diversidades y la comunicación entre ellas es vía transmisión serie (mediante dos líneas serie unidireccionales). La información que se envía en estas líneas series es idéntica al que se envía a los Módulos de Votación (señal result).

La detección de discrepancias produce señalización de falla y disparo del sensor en cuestión.

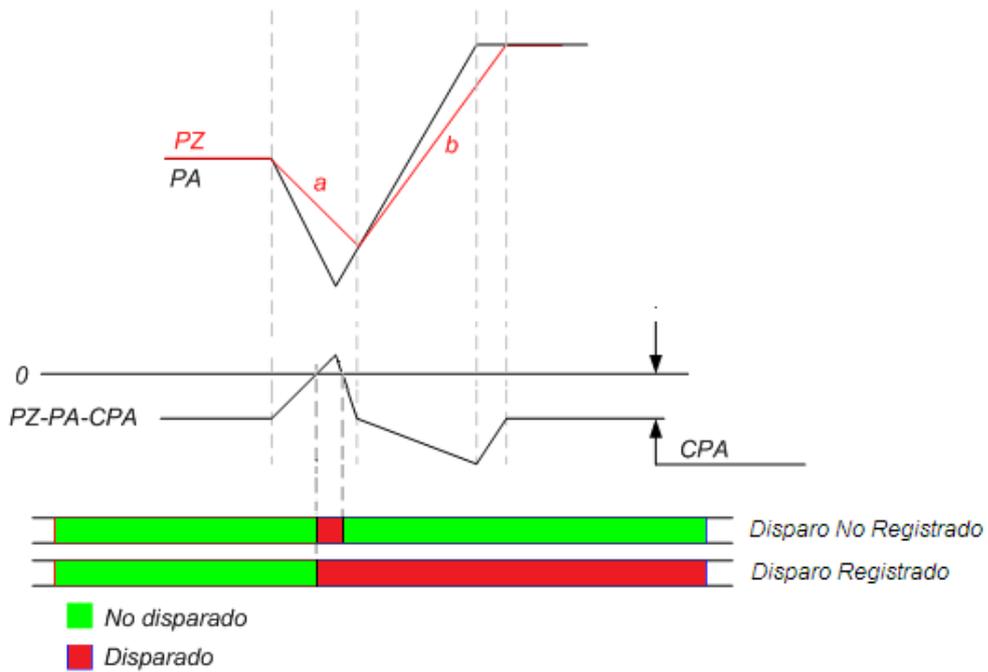


FIG. 7. Ejemplo de la Evolución del Algoritmo de Detección de Caída Abrupta de la Presión.

### Señal result

La información de los disparos es transmitida a los módulos de votación de todos los trenes a través de la señal result. Por ella se envía de manera serializada la condición de Disparo Registrado de cada una de las dos señales de presión procesadas por el módulo (DISP\_REG\_C1 y DISP\_REG\_C2).

Por result también se envía el número de tren (NRO\_TREN) en el que se encuentra el módulo (configurado por llaves selectoras), el número de diversidad (NRO\_DIVER), el pedido de Test ingresado a través del pin t\_Tren\_3V3 (TEST\_TREN) y finalmente un campo de chequeo de trama (CHK\_RESULT). La trama consta de 2 bytes y su conformación se puede ver en la 0.

| Byte 0 |          |           |             |             | Byte 1 |    |           |            |
|--------|----------|-----------|-------------|-------------|--------|----|-----------|------------|
| 7      | 6-5      | 4         | 3-2         | 1-0         | 7      | 6  | 5         | 4-0        |
| B7     | NRO_TREN | NRO_DIVER | DISP_REG_C1 | DISP_REG_C2 | B7     | B6 | TEST_TREN | CHK_RESULT |

FIG. 8. Información de la trama de la señal serie result.

### Codificación digital de señales analógicas para las tramas de estado

Las señales analógicas tienen su rango definido en la 0. Una vez codificadas, estas señales se transmiten en 8 bits según la siguiente regla:

$$\text{Valor Codificado} = \begin{cases} 0 & , V_{Medida} < 2V \\ \left[ \frac{(V_{Medida} - 2V) \cdot 25 \frac{\text{CENTESIMAS}}{V}}{254} \right] & , 2V \leq V_{Medida} < 10,20V \\ 254 & , V_{Medida} > 10,20V \end{cases}$$

### 2.6.3. Módulos Transmisor y Receptor De Fibra Óptica

Los módulos de Transmisión y Recepción de Fibra Óptica cumplen la función de interconectar todos los trenes entre sí. La velocidad máxima de datos entre el par transmisor - receptor es de 1Mbit/s. Cada módulo consta de cuatro canales independientes. La distancia del tramo de fibra óptica entre un transmisor y un receptor puede variar entre 0 y 1000m con una tasa de error (BER) menor a  $10^{-9}$  para fibra óptica 62.5/125 $\mu$ m multimodo de vidrio (no plástico).

### 2.6.4. Módulo De Votación

El módulo de votación recibe cuatro tramas, cada una correspondiente a un tren, con la información de los disparos de las señales que se monitorean en cada tren, calculados por el módulo Comparación y Disparo del mismo tipo de diversidad.

Al igual que el módulo de Comparación y Disparo, el Módulo de Votación también cuenta con 2 diversidades que utilizan tecnologías diferentes.

La función principal del módulo es hacer la votación 2 de 3 con los disparos correspondientes a la misma variable de presión, y generar una señal Disparo Votación, si en al menos una de las variables se da esa condición. El disparo es registrado y se repone mediante la señal reset enviada desde sala de control. En la Fig. 9 se ilustra la lógica de funcionamiento de este módulo.

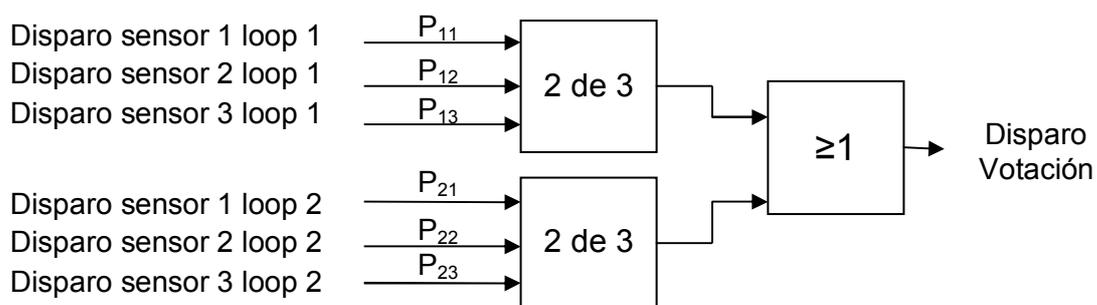


FIG. 9. Lógica de funcionamiento del Módulo de Votación.

El módulo recibe cuatro tramas result provenientes de los cuatro trenes, que se generaron en módulos de Comparación y Disparo de la misma diversidad que la del Módulo de Votador en cuestión. En caso de no corresponder a la misma diversidad, se genera una falla.

Además el módulo envía su estado interno a través de la trama estado del Módulo de Votación en forma serializada al módulo Concentrador del tren.

Entre las diversidades de los Módulos de Votación se intercambian tramas series de 2 bytes con la información del resultado de la lógica, el número de tren configurado y la diversidad. Si cualquiera de los dos primeros difiere o si la diversidad es la misma, el módulo genera una señal de falla que se indica en el LED Falla 1.

También se genera señal de falla en los casos de:

- Desconexión de cualquiera de las entradas de result, para la detección de problemas de la interconexión de fibra óptica y/o los módulos transductores.
- Recepción desde un tren distinto al esperado en alguna entrada, o por recibir de un tipo de diversidad distinta a la del módulo, para la detección de una configuración incorrecta de la interconexión entre trenes.

- Error de auto-chequeo, mediante el cual se verifica dinámicamente el correcto funcionamiento de la señal de Disparo Votación.
- Detección de un pulso de reset excesivamente largo, para la detección de problemas de cableado de planta u operación errónea de este comando.
- La detección de pedidos de Test de Tren simultáneos en varios trenes.

Este segundo grupo de fallas se indican en el LED Falla 2.

#### *2.6.5. Módulo Driver De Potencia*

Las funciones de este módulo son:

- Resolver las dos diversidades mediante lógica 1 de 2 entre los disparos de las unidades de votación de modo de generar la señal de Disparo de tren.
- Comandar 4 contactores que accionan a su vez las válvulas piloto.
- Obtener las señales de retro-aviso de cada contactor y realizar una lógica de detección de fallas.
- Proveer aislación galvánica entre los pares módulo-contactor y contactor-contactor.

La resolución de las señales provenientes de los votadores diversos se realiza con electrónica de lógica discreta, la cual comanda 4 relés de estado sólidos aislados ópticamente, con una capacidad de corriente de 1A.

A su vez, por cada salida de comando a contactor existe una unidad para leer una señal de retro-aviso de 24V, también aislado ópticamente de las señales locales al módulo. Dicha señal es utilizada para detectar una posible falla del contactor y generar una lógica de fallas. Esta lógica de fallas está implementada por un Dispositivo Lógico Configurable tipo CPLD. Este tiene además la capacidad de verificar el correcto funcionamiento de la lógica discreta 1 de 2 que resuelve las señales provenientes de las diversidades.

La indicación de falla y el estado de disparo se envían al Módulo Concentrador del Tren como señales digitales binarias, de modo que éste las incorpore a las tramas de estado.

#### *2.6.6. Concentrador Del Tren*

Cada tren del SIA cuenta con 4 módulos que dan información de su estado interno a través de una línea de comunicación serie: los dos módulos diversos de Comparación y Disparo y los dos módulos diversos de Votación. El Concentrador del Tren toma la información contenida en estas 4 líneas y genera una única salida serie con todos los datos.

El módulo concentrador tiene la función de detectar discrepancias entre los valores analógicos digitalizados por ambas diversidades de los módulos de Comparación y Disparo.

A la trama de salida se le agrega la información interna de este módulo, resultado de las detecciones de discrepancia entre diversidades, y el estado de algunas variables del tren, como son el disparo final de los Drivers de Salida, la falla del módulo de Drivers, las fallas de los módulos Acondicionadores de Señales y la falla de los módulos de Entrada-Salida.

La línea de salida serie envía a los módulos de Transmisión por Fibra Óptica, para que la información del tren sea transmitida vía fibra óptica al módulo Registrador de Datos.

### 2.6.7. Módulo Comparador De Sensores

El Módulo Comparador de Sensores está situado en el Tren de Registro y es único para todo el sistema. Este módulo tiene por función recibir los datos de cada uno de los Módulos Concentrador del Tren de los cuatro trenes de medición, sincronizarlos y reenviar esa información al Módulo Registrador de Datos.

Adicionalmente, realiza la comparación de los valores de los parámetros y de las presiones que obtuvo cada Tren de Medición, y verifica que tengan una diferencia menor a un valor dado por configuración a través de interruptores disponibles en el módulo. Las comparaciones se realizan entre parámetros y señales de presión de un mismo lazo.

El módulo genera, a partir de las tramas que recibe, dos tramas que representan el estado del sistema. Una de estas tramas, llamada estadoSPR1, se genera cada 1 ms y contiene los valores de todas las mediciones de presión. La segunda trama, llamada estadoSPR2, es más completa; pero debido a su longitud se genera cada 40 ms. Esta segunda trama está conformada por las tramas de los concentradores de los cuatro trenes de manera consecutiva, más el resultado de las comparaciones realizadas en este módulo.

### 2.6.8. Módulo Registrador de Datos

El módulo Registrador de Datos tiene la función de guardar los datos generados por todo el sistema. El mismo está colocado en el Tren de Registro y recibe dos tramas del Módulo Comparador de Sensores con la recopilación de datos de las 4 tramas de estado que envía cada Tren de Medición. El Módulo Registrador de Datos guarda los datos de ambas tramas en memoria no volátil tipo SD (*Secure Digital*) y retransmite la trama estadoSPR2, la cual contiene toda la información del sistema. Esta señal se envía a una placa de Transmisión de Fibra Óptica para que, aislada galvánicamente, llegue a la instrumentación de la central. Además, el módulo tiene un puerto Ethernet y uno USB en el frente del mismo, mediante los cuales se puede acceder a los datos guardados.

#### *Almacenamiento de Datos*

Mediante la utilización de una memoria no volátil SD de 8GB se guardan las tramas recibidas (siempre que sean distintas a la última guardada) por las dos señales serie de entrada en forma circular. De esta manera se mantendrán registrados los datos completos que llegaron a este módulo durante los últimos 180 días.

#### *Interfaz Ethernet*

El frente del módulo tiene disponible un conector Ethernet el cual tiene 2 funciones principales. La primera es la presentación de una página web con todos los datos actuales y la posibilidad de descargar los registros desde la memoria SD. La segunda es la retransmisión de las tramas de estadoSPR2 a través del protocolo UDP (*User Datagram Protocol*).

Para acceder a la página web se utiliza un explorador estándar al puerto 80 de la IP que haya quedado configurada el Módulo Registrador de Datos.

Para leer las tramas retransmitidas por UDP es necesario primero conectarse al registrador por TCP al puerto 4000. Luego de eso el registrador enviará las tramas por UDP al puerto 4001 de la IP que inició la conexión TCP.

#### *Interfaz USB*

Al colocar un dispositivo de memoria en el conector USB del frente del módulo, se copiarán automáticamente todos los registros disponibles en la memoria SD.

### 2.6.9. Módulo Adaptador de Entrada/Salida

La función del módulo es adaptar las señales de 24V que entrega la central a 3.3V para su distribución a los módulos que las requieran, y a su vez adaptar las señales de 3.3V generadas por éstos a niveles de tensión y corriente aceptables para su interfaz con la central.

El módulo realiza 3 funciones principales

- Convertir señales de 24V a 3.3V para ser leídas por los módulos del tren, (ver Fig. 10a). El módulo dispone de 4 de estos adaptadores de nivel, dos de cuales tienen la tarea de adaptar los niveles de las señales de Blinking y Lamp Test de modo de generar sus versiones de 3.3V y distribuir las a los demás módulos del tren que posean LEDs en sus frentes.
- Resolver las señales de disparo provenientes de los módulos diversos, generando una señal de 24V activa en bajo cuando se produce el disparo de cualquiera de ellos. Esta función enciende además un LED en el frente del módulo.

Cada módulo posee 7 conjuntos como los mostrados en la Fig. 10b. Cada uno recibe 2 señales estáticas de tipo activo en bajo. Cuando cualquiera de ellas se activa (es decir, pasa de '1' a '0'), se activa entonces la señal de salida de 24V activa en bajo.

- Resumir las señales de fallas de 3.3V, provenientes de todos los módulos del tren que generan fallas, generando una única señal de falla. El módulo posee 7 señales de entrada de falla de 3.3V y también genera una falla propia en el caso que se dé la condición. Todas estas señales son activas en bajo. La señal resumida de falla de 3.3V está disponible a la salida del módulo, también activa en bajo, lo que permite encadenar las señales de falla en múltiples módulos de Entrada/Salida.

El módulo genera la versión en 24V de la señal de resumen de falla, encendiendo además un LED en el frente del módulo.

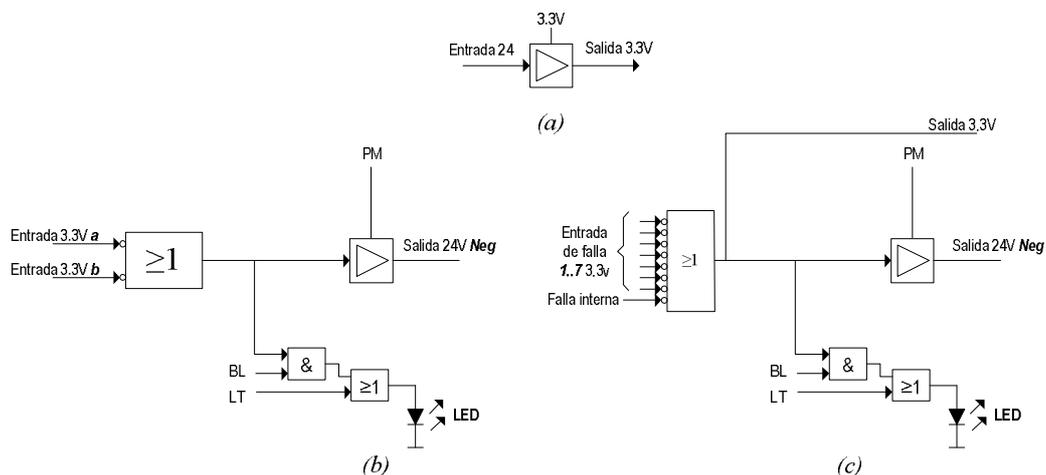


FIG. 10. Funciones principales del Módulo Adaptador de Entrada/Salida.

Todas las entradas, tanto las de 24V como las de 3.3V, tienen una resistencia de pull-down para asegurar un cero lógico en caso de desconexión.

### 2.6.10. Sustituto de Acondicionador de Entradas

Debido a que los Trenes de Medición 1 y 4 tienen un único sensor, y por lo tanto necesitan sólo un Módulo Acondicionador de Señales, fue necesario colocar un módulo sustituto para que no se genere señal de falla por la ausencia del mismo.

### 2.7. Trenes de Medición

Se generaron 3 variantes de Tren de Medición dependiendo de los sensores que ingresan a cada uno. Éstos se resumen en la 0.

En el **Error! Reference source not found.** se muestra una vista de frente del Tren de Medición Variante B y en la **Error! Reference source not found.** una foto del mismo.

TABLA 2. CONFORMACIÓN DE LAS 3 VARIANTES DE TRENES DE MEDICIÓN.

| Ubicación en Subrack [HP] | Denom. Ubicación | Tren de Medición Variante A         | Tren de Medición Variante B | Tren de Medición Variante C         |
|---------------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1-4                       | M01              | Frente Ciego Eurocard 4HP           |                             |                                     |
| 5-8                       | M02              | Frente Ciego Eurocard 4HP           |                             |                                     |
| 9-12                      | M03              | Adaptadora de E/S                   |                             |                                     |
| 13-18                     | M04              | Acondicionador de señales 1         | Acondicionador de señales 1 | Sustituto Acondicionador de Señales |
| 19-24                     | M05              | Sustituto Acondicionador de Señales | Acondicionador de señales 2 | Acondicionador de señales 2         |
| 25-28                     | M06              | Comparación y Disparo Diversidad #1 |                             |                                     |
| 29-32                     | M07              | Comparación y Disparo Diversidad #2 |                             |                                     |
| 33-36                     | M08              | Transmisor de Fibra Óptica 1        |                             |                                     |
| 37-40                     | M09              | Transmisor de Fibra Óptica 2        |                             |                                     |
| 41-44                     | M10              | Receptor de Fibra Óptica 1          |                             |                                     |
| 45-48                     | M11              | Receptor de Fibra Óptica 2          |                             |                                     |
| 49-52                     | M12              | Votador Diversidad #1               |                             |                                     |
| 53-56                     | M13              | Votador Diversidad #2               |                             |                                     |
| 57-60                     | M14              | Concentrador de Datos               |                             |                                     |
| 61-66                     | M15              | Driver de Potencia                  |                             |                                     |
| 67-72                     | M16              | Frente Ciego Eurocard 6HP           |                             |                                     |
| 73-78                     | M17              | Frente Ciego Eurocard 6HP           |                             |                                     |
| 79-84                     | M18              | Frente Ciego Eurocard 6HP           |                             |                                     |

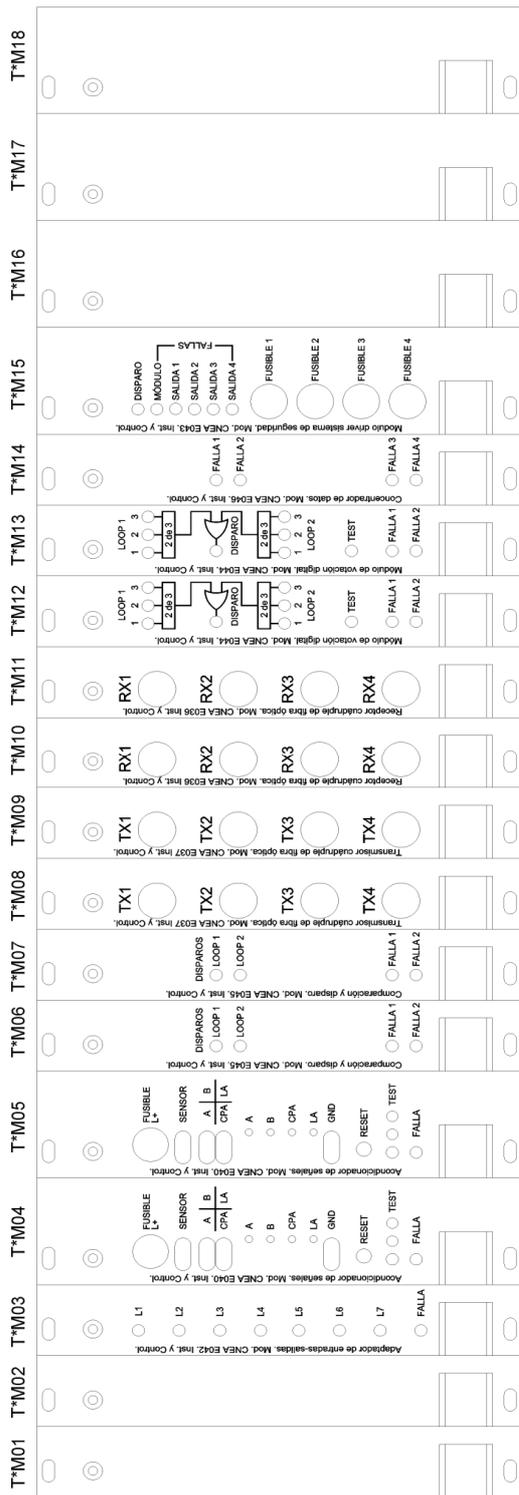


FIG. 11. Vista del Tren de Medición Variante B

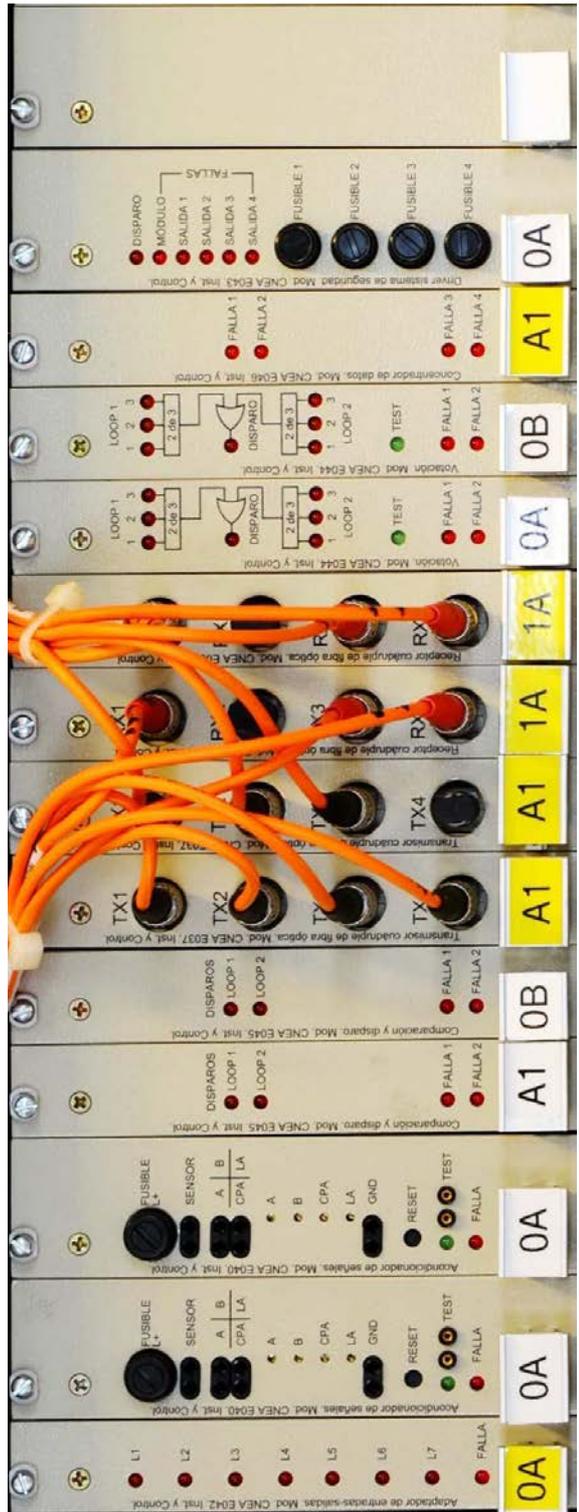


FIG. 12. Tren de Medición Variante B

## 2.8. Integración del Sistema

El SIA queda conformado por 4 Trenes de Medición, un Tren de Registro y el sistema de interconexión por fibra óptica que entrecruza las señales entre los distintos trenes [12].

## 3. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA

De acuerdo a los procedimientos de desarrollo certificados ISO 9001 del sector de Instrumentación y Control, se realizó la verificación funcional del sistema integrado en fábrica (*factory acceptance tests*) siguiendo los lineamientos de las normas IEC 61513 [5] e IAEA NS-G-1.3 *Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants Safety Guide* [6] para sistemas de seguridad para centrales nucleares.

Dentro del conjunto de elementos necesarios para realizar el proceso de verificación se destaca el desarrollo de un módulo con la capacidad de generar 6 señales de corriente que emulan los sensores de presión. Además, se utilizó un equipo National Instruments NI CompactDAQ que tiene la capacidad de controlar 32 salidas y de leer 64 entradas digitales de 24V mediante las cuales se controlan y adquieren todas las señales digitales que intercambia el SIA con la instrumentación de planta. Tanto el equipo NI CompactDAQ como el módulo emulador de sensores pueden ser controlados mediante conexión USB desde una PC.

Se desarrolló un software que controla ambos equipos en forma conjunta, de manera de estimular al SIA emulando situaciones similares a las de planta. El software presenta una interfaz de usuario que permite la interacción centralizada de ejecución de ensayos y visualización de la respuesta del sistema. En la Fig. 13 se muestra una de las pantallas del software desarrollado.

Se diseñaron y ejecutaron un conjunto de ensayos para realizar la verificación de los requerimientos del SIA, emulando las señales de presión según perfiles predefinidos. Se priorizó la verificación de los componentes del sistema que intervienen en el accionamiento de la señal de protección, por lo que la mayor parte de los ensayos están orientados a probar la efectividad del disparo en las condiciones en que éste deba realizarse, la detección de disparos espurios en situaciones extremas en que el sistema no deba disparar y verificar la detección de fallas.

Durante los últimos 8 meses se contabilizaron al menos 6 meses de ensayos efectivos ejercitando al sistema, sin errores significativos de diseño ni fallas de componentes electrónicos de los módulos, por lo que se estima que no presentará problemas significativos al ser instalado en planta ni durante el proceso de validación final.

La experiencia obtenida en el proceso de verificación y la depuración de algunos problemas de implementación, se utilizará en el desarrollo de los Sistemas de Protección de Reactor para los proyectos CAREM y RA10.

En la Fig. 14 se puede observar un esquema de la interconexión en el rack entre equipamiento de verificación y el SIA, y en la Fig. 15 una foto del rack con todos los elementos montados.

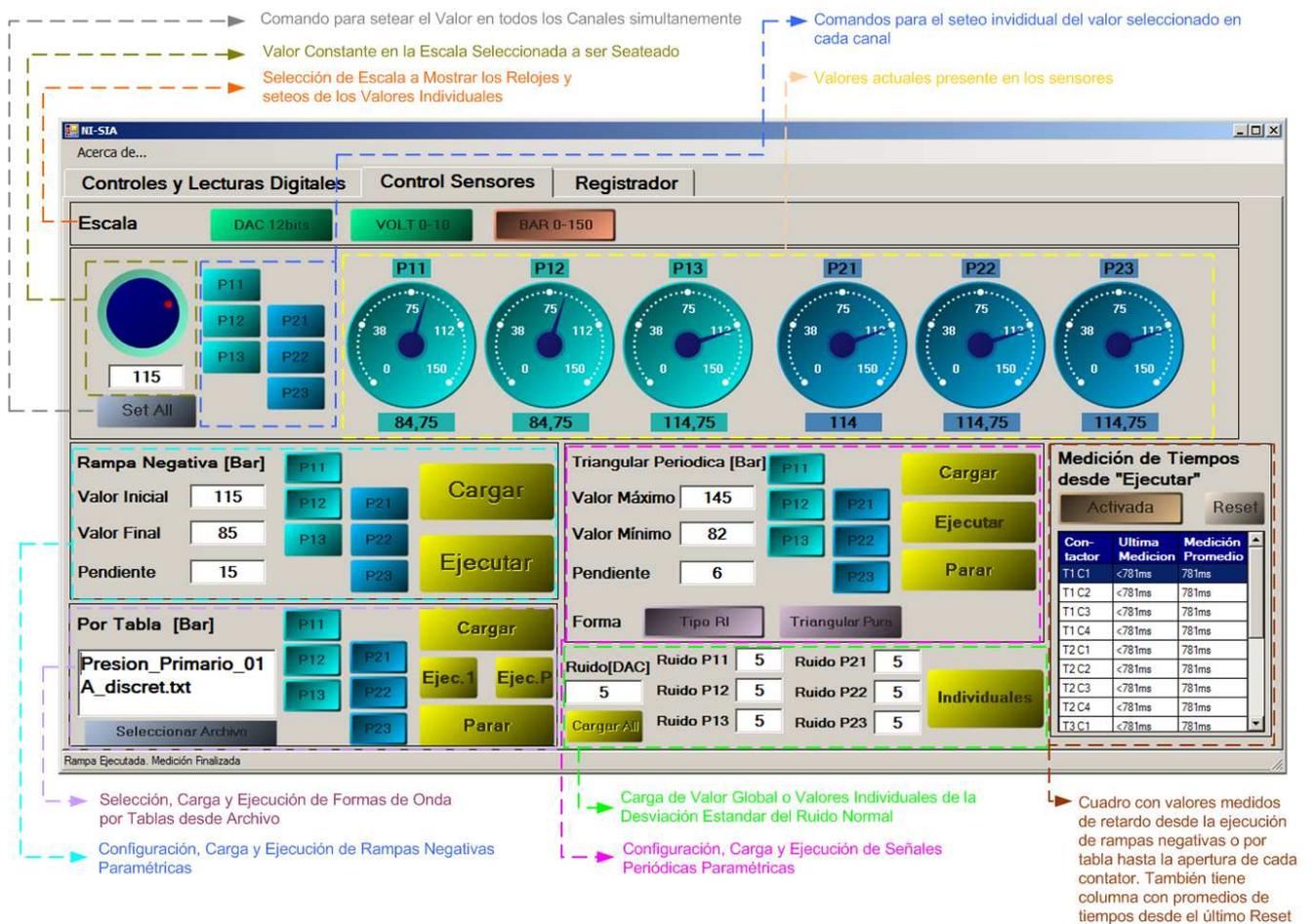


FIG. 13. Pantalla de interfaz de usuario con los comandos para el Emulador de Sensores.

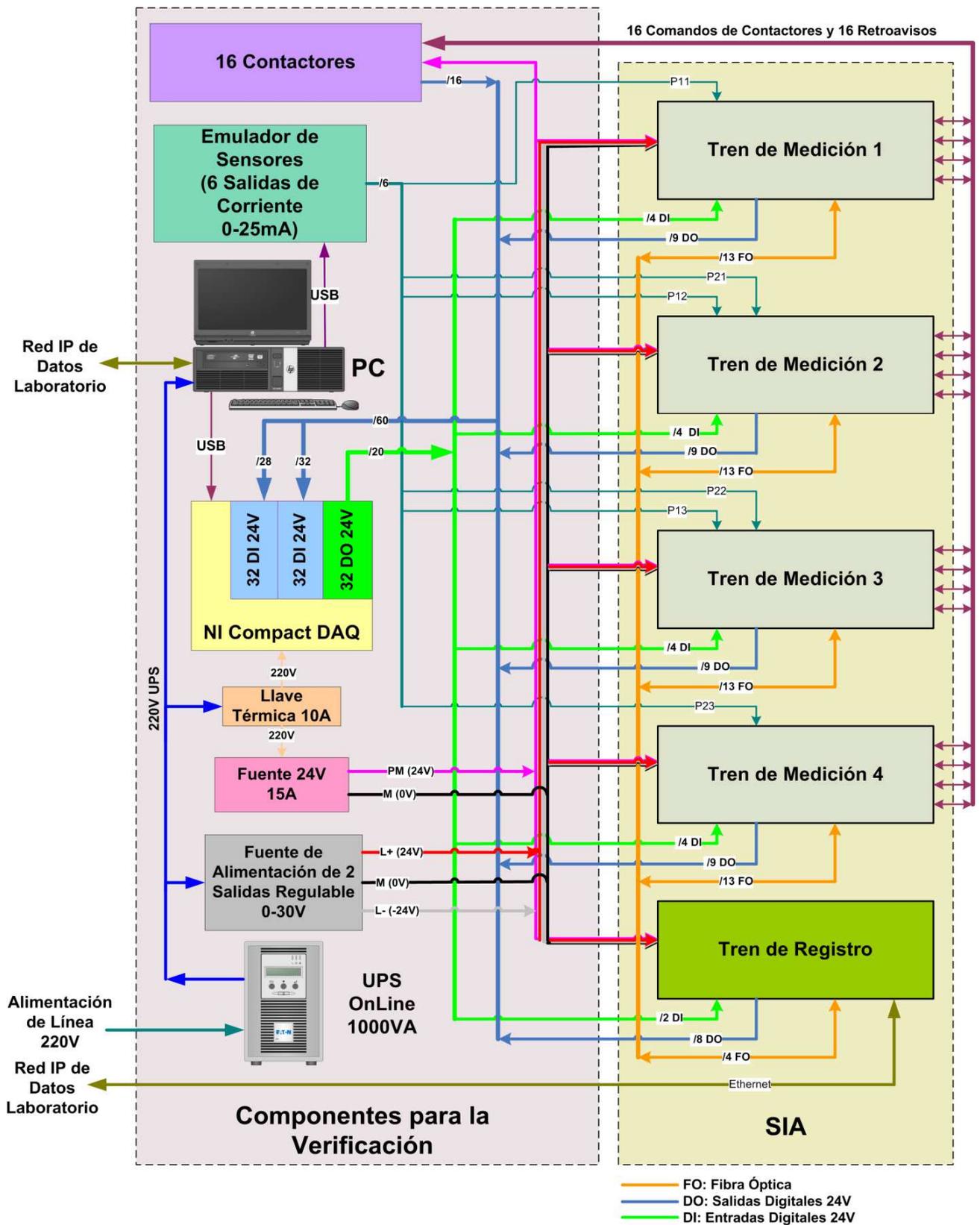


FIG. 14. Esquema de la interconexión de los componentes para la Verificación del SIA.

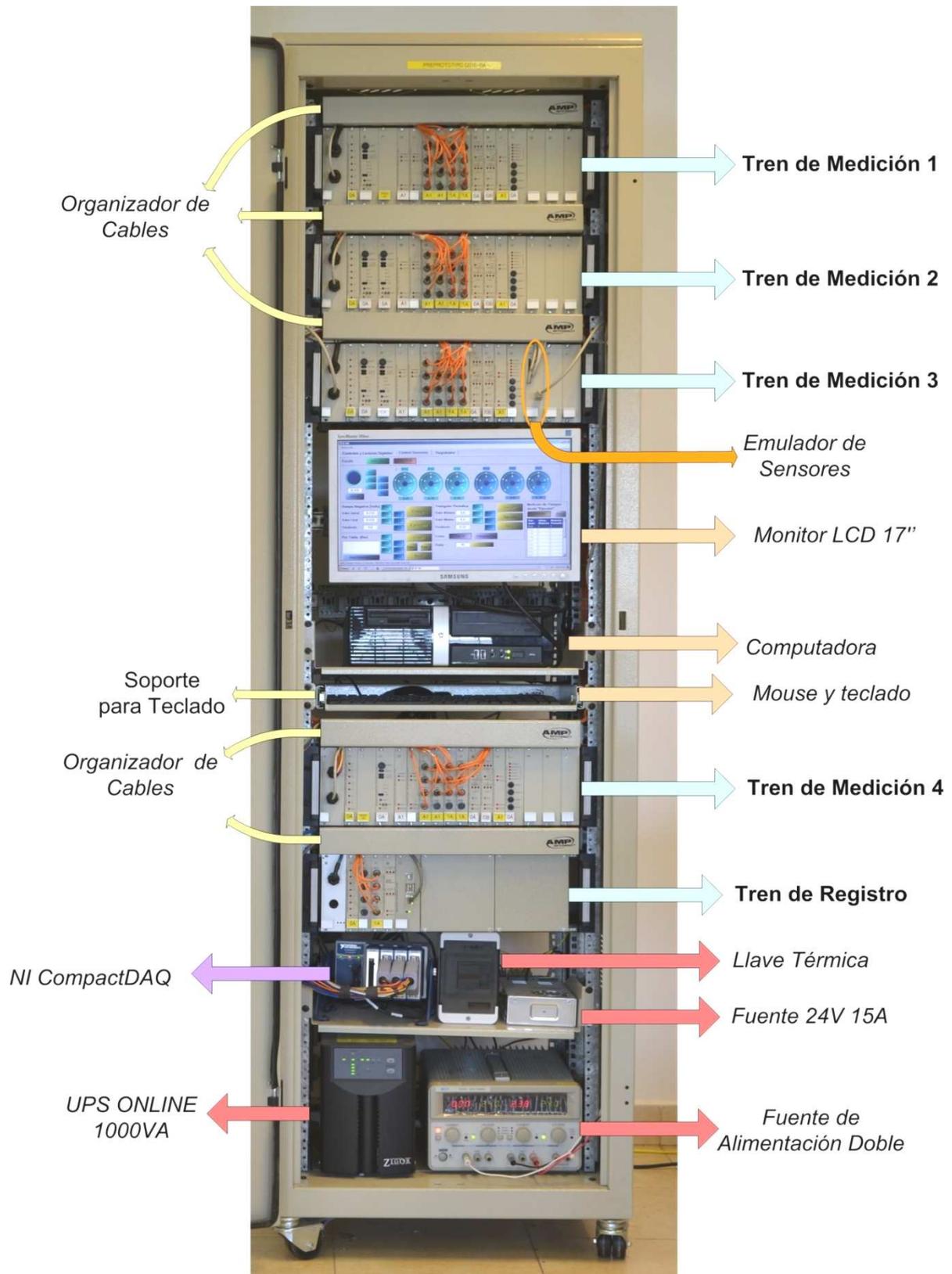


FIG. 15. Rack del SIA en conjunto con el equipamiento de verificación.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Tiempos de respuesta del sistema

Los tiempos de respuestas máximos medidos del sistema se detallan en la siguiente tabla:

TABLA 3. TIEMPOS DE RESPUESTA REQUERIDOS DEL SISTEMA.

|   |                 |   |
|---|-----------------|---|
| Tiempo de respuesta de la unidad de comparación               | 0.30 ms         | } Procesamiento electrónico<br>0.57mseg |
| Tiempo de respuesta de la unidad de votación                  | 0.16 ms         |   |
| Tiempo de respuesta de la unidad de driver                    | 0.11 ms         |   |
| Tiempo de respuesta del contactor (con protección a varistor) | 10.70 ms        |   |
| <b>Tiempo de respuesta total</b>                              | <b>11.27 ms</b> |   |

Se observa que el tiempo de respuesta de la parte del procesamiento electrónico es casi despreciable frente al tiempo de respuesta del contactor.

### 4.2. Comparación de los tiempos de respuesta con el sistema original

En [13] se detallan las mediciones y análisis de los elementos a los que el grupo de IyC-CNEA tuvo disponibilidad. A partir del mismo se puede concluir, que en el mejor de los casos, los dos contactores en cascada del sistema original tendrán un tiempo de respuesta de 24.6ms en total. Este caso corresponde a utilizar los contactores sin protección, situación que no es recomendable. Con cualquiera de las posibles protecciones que se eligiera se obtendrá un tiempo mayor.

Además, en este informe se llega a la conclusión que el módulo de prioridad que comanda el primer contactor tiene un tiempo de respuesta de 60ms.

No se pudieron obtener más datos de los tiempos de respuesta insertados por los módulos de procesamiento del sistema original.

De todas formas, con los datos obtenidos se puede afirmar que el **nuevo sistema reducirá** el tiempo de actuación del sistema **en al menos 73ms**.

## 5. CONCLUSIONES

Con el diseño y construcción de este sistema se logró bajar el tiempo de actuación del sistema de inyección de boro en al menos 73ms. Además, y una vez que el sistema esté validado en planta, se estará en condiciones de reemplazar al sistema original, subsanando de esta forma los inconvenientes futuros de obsolescencia del equipamiento original por falta de repuestos debido a que este tipo de instrumentación fue discontinuada por el fabricante.

Cabe destacar que para el diseño del sistema se siguieron las recomendaciones de la IEC62566 “*Nuclear powerplants – Instrumentation and control important to safety – Development of HDL – programmed integrated circuits for systems performing category A functions*”, en general y especialmente en cuanto a las funciones de auto supervisión implementadas a distintos niveles en módulos y sistemas.

## REFERENCIAS

- [1] Kraftwerk Union AG., Preliminary safety analysis report: CNA II. Technical report, KWU, 1981.
- [2] LAZARTE, A. I., Estudio termohidráulico en el transitorio producido durante los primeros segundos de un accidente por pérdida de refrigerante en la Central Nuclear Atucha II. Instituto Dan Beninson, Buenos Aires, Argentina (2008)
- [3] ALARCÓN, J.E., ESTRYK, D.S., FERRUCCI, F.N., RÍOS, G.E., “Requerimientos del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de la CNAII”. Reporte CNEA IN-06Y-054, Rev.1, Argentina (2012).
- [4] ALARCÓN, J.E., ESTRYK, D.S., FERRUCCI, F.N., RÍOS, G.E., “Ingeniería de Detalle del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro para la CNAII”. Reporte CNEA ET-06Y-043 Rev.1, Argentina (2013).
- [5] International Electrotechnical Commission. Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - General requirements for systems. IEC 61513Ed.2 (2011).
- [6] Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants Safety Guide, Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.3, IAEA, Vienna (2002).
- [7] International Electrotechnical Commission. Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - Development of HDL-programmed integrated circuits for systems performing category A functions. IEC 62566 Ed.1 (2012).
- [8] FERRUCCI, F.N., “Prueba de Principio de Sistema Digital de Límite Deslizantes”. Reporte CNEA IN-06Y-052, Argentina (2011).
- [9] Siemens. Reactor Protection System. Analog Computing Circuit Pressure Drop 1 in the Reactor Coolant System. Fast Boron Injection Actuation. Work Report No KWU E455/1992/2007, 1992
- [10] Siemens. Reactor Protection System TELEPERM C Modules for analog signal processing. Catalog MP 16, Section 3 (1986).
- [11] Texas Instruments. Low-Voltage Logic (LVC) Designer's Guide.SCBA010, (1996).
- [12] ESTRYK, D.S., Cableado de Fibra Óptica del Sistema de Instrumentación Alternativo para la Inyección de Boro de Atucha II. Reporte CNEA IT-06Y-086 Rev. 0, Argentina (2012).
- [13] FERRUCCI, F.N., Inyección de Boro de CNAII: Medición de tiempos de actuación del conjunto Unidad Encajonable + Válvula Piloto y análisis, cálculo y prueba de varistores como elementos de protección. Reporte CNEA IN-06Y-073 Rev. 0, Argentina (2012).

# IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE MONITOREO RADIOLÓGICO PARA INSTALACIONES RADIATIVAS Y NUCLEARES EN CHILE.

Jerson Reyes S.<sup>1,2,3 (f)</sup>, Pablo Piña O.<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> *Departamento de Ingeniería y Sistemas - CCHEN*

<sup>2)</sup> *Universidad de Santiago de Chile,* <sup>3)</sup> *IEEE Member.*

*Chile*

## **Resumen:**

Este documento muestra las experiencias del desarrollo del sistema de monitoreo radiológico implementado en las principales instalaciones nucleares y radiactivas de CCHEN. Además se presenta su aplicación en el monitoreo radiológico de fuentes radiactivas utilizadas en la instrumentación de procesos industriales mineros.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, los procedimientos utilizados para el monitoreo radiológico de instalaciones nucleares y radiactivas en Chile han experimentado fuertes cambios, al integrar tecnologías que permiten minimizar tiempos de recolección de la información, incorporar bases de datos que permitan centralizarla, ejecutar el procesamiento y despliegue mediante softwares del tipo HMI (Human Machine Interface) y en particular uno muy específico orientado a la instrumentación, como es la programación gráfica utilizando LabVIEW y el procesamiento de datos recibidos en terreno mediante dispositivos electrónicos programables PLC (*Programmable Logic Controllers*).

Un importante requerimiento de la seguridad radiológica es conocer, en lo posible “en tiempo real” y de una “manera continua”, las variables relacionadas con la protección radiológica en un área de trabajo, especialmente si son personas quienes manejan fuentes o materiales radiactivos en estas áreas. En este contexto se desarrollaron en la CCHEN herramientas de software y de hardware que permitieron alcanzar estos objetivos.

La protección radiológica en la Industria fue otro foco de estudio, para mejorar el monitoreo radiológico de fuentes radiactivas utilizadas en procesos productivos. La minería ha sido de especial interés para mejorar los procedimientos de seguridad ocupacional de los trabajadores y también en la apertura de nuevos horizontes de aplicación en la seguridad minera, con el uso de la información radiológica on-line orientada a la operación y mantenimiento de estos equipos que utilizan fuentes radioactivas instalados en líneas de procesos críticas.

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO: PRIMERA ETAPA

La primera etapa de desarrollo del sistema se dedicó a centralizar el almacenamiento de la información, ya que cada instrumento de terreno almacenaba la información en un PC local dedicado. Esta estructura de monitoreo era costosa y poco eficiente, sobre todo para analizar la información de forma integral. La lectura de archivos compartidos se implementó utilizando el software LabView, el que permitía presentar de forma amigable al usuario la información que se recolectaba desde las diferentes instalaciones monitoreadas.

---

<sup>f</sup> Contacto para correspondencia, email: [jereyes@cchen.cl](mailto:jereyes@cchen.cl)

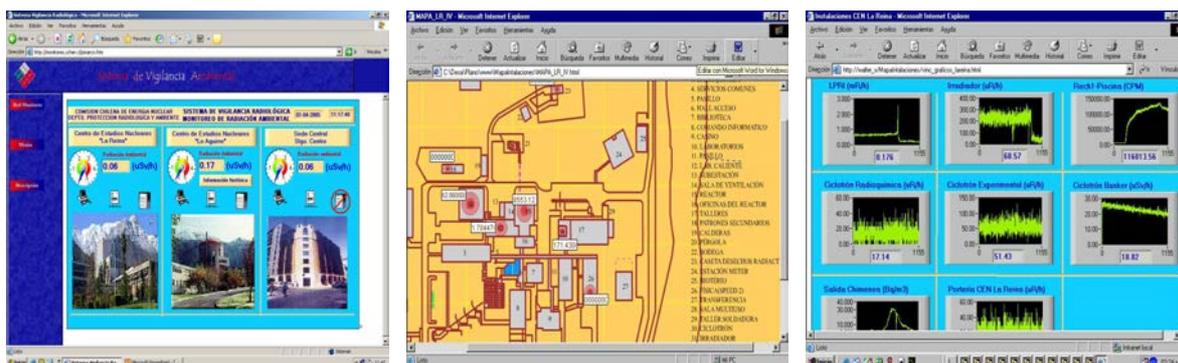


FIG. 1. Primeras pantallas dedicadas al monitoreo radiológico desarrollado en la primera etapa.

### 3. INTRODUCCIÓN DE TECNOLOGÍAS, DEFINICIONES Y NUEVOS DISEÑOS

La segunda etapa de mejoras comienza a partir del año 2008, donde nuevos desarrollos permitieron eliminar la gran cantidad de computadores distribuidos, diseñar protocolos de comunicación, favorecer la integración de sensores y monitores de radiación, sin necesidad de depender de softwares de fábrica, sino que la lectura de los datos fuera de fácil accesos. Además se integró tecnología en comunicación y transmisión de datos, mediante equipos de radiofrecuencia, y en el control y procesamiento de la información de terreno, mediante el uso de PLC construidos de acuerdo a las necesidades del sistema. De esta manera el diseño estructural base del sistema de monitoreo se presenta en la figura 2.

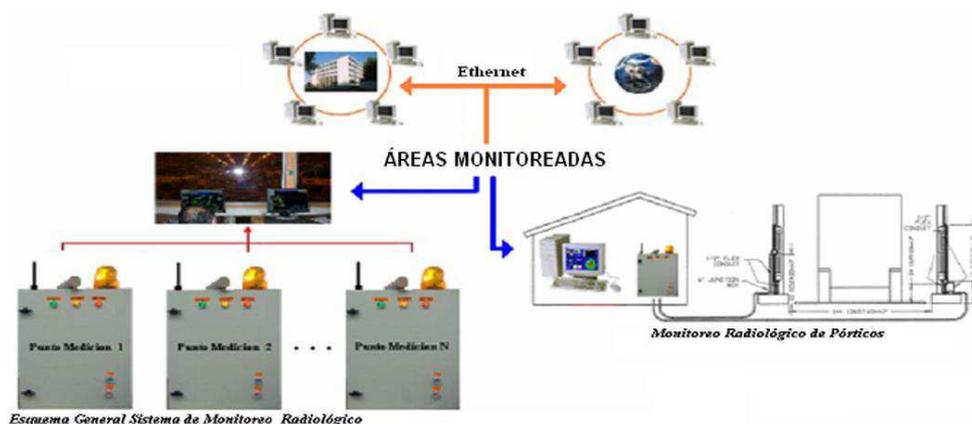


FIG. 2. Estructura del sistema de monitoreo

Cada punto de medición está equipado con equipamiento de alimentación de emergencia (UPS, *Uninterruptible Power Supply*) los sensores de radiación específicos, monitores de área, equipos de comunicación remota mediante RF (Radio Frecuencia) en frecuencia libre, e indicadores de alarma. Los puntos de medición también están instalados en localidades donde se realiza monitoreo ambiental.

La información es almacenada en la zona o área que se encuentre siendo monitoreada y luego transmitida vía correo electrónico y/o GPRS (General Packet Radio Service) mediante Internet a las unidades de almacenamiento centralizado de la CCHEN, si los puntos de medición se encuentran fuera del alcance de RF.

La información radiológica es codificada en un protocolo diseñado especialmente para el sistema de monitoreo, empaquetada y enviada a un software desarrollado en HMI, utilizando en particular la plataforma de LabView por sus características de programación y versatilidad.

### **3.1 Definiciones conceptuales para el sistema de monitoreo radiológico**

De forma de proporcionar versatilidad para la expansión del sistema, se comenzó por hacer definiciones que permitieran caracterizar cualquiera de los tipos de monitoreo a efectuar. Estas definiciones no solo incluían las características de la fuente a monitorear sino información sobre el funcionamiento, operación y expansión de los puntos de medición. Para ello se definieron:

- Los tipos de fuentes, respecto a su ubicación.
- Los tipos de monitoreo según el propósito.
- Tipo de despliegue según tipo de usuario.

Respecto *al tipo de fuente* éstas se clasificaron como Fijas, Móviles y Ambientales. Como fijas se catalogan todas las fuentes que no son trasladables, y que requieren un monitoreo directo mediante un sensor de radiación que apunta directamente a la fuente. En el caso de las fuentes móviles, se requiere de una definición de su posicionamiento geodésico. Como de carácter ambiental se definieron aquellos equipos que sirven a un monitoreo radiológico de diferentes tipos de compartimientos del medio ambiente, tales como material particulado en el aire (APM, *Air Particulate Matter*), aguas o simplemente la medición de la tasa de dosis en espacios abiertos, que no incluyesen fuentes conocidas de los tipos anteriores.

La definición del *tipo de monitoreo* se hizo de forma que correspondiera a los tipos de fuente. En la mayoría de los casos el monitoreo radiológico asociado a áreas tiene por finalidad la protección radiológica por medio de la lectura de tasas de dosis, y luego en base a esta información realizar un análisis de datos y evaluar los riesgos radiológicos para el personal. Sin embargo, la integración de software y tecnología abrió la posibilidad de utilizar directa e indirectamente la información radiológica, en procesos industriales, la que es valiosa al momento de realizar servicios de mantenimiento o trabajos de servicios en las cercanías de las fuentes radiactivas. Esto dio paso a desplegar e interpretar la información *según el tipo de usuario*. En el caso de la industria los operadores con frecuencia no tienen conocimientos especializados en el área nuclear, sino que son calificados en las operaciones inherentes a sus propios procesos productivos. Para estas aplicaciones se utilizaron conceptos de procesos industriales y de protección radiológica con el fin de preparar una interfaz de usuario más comprensible para los operadores, y así contribuir a la educación de los mismos en aspectos relacionados con la protección ocupacional industrial.

Una vez establecidas las definiciones anteriores, el sistema elaborado permitió apoyar el monitoreo radiológico no solo en instalaciones nucleares y con fuentes radiactivas, sino también a espacios no considerados anteriormente, tales como las fuentes utilizadas en procesos industriales. Estas fuentes en la mayoría de los casos no representan riesgos radiológicos considerables, salvo en los casos que existan incidentes industriales que involucren la pérdida de su hermeticidad o del control sobre las fuentes.

## **4. RESULTADOS DEL DESARROLLO**

A continuación se presentan las experiencias del desarrollo de la aplicación para el monitoreo de área de los Centros de estudio nucleares de La Reina y Lo Aguirre, así como para el monitoreo de procesos mineros.

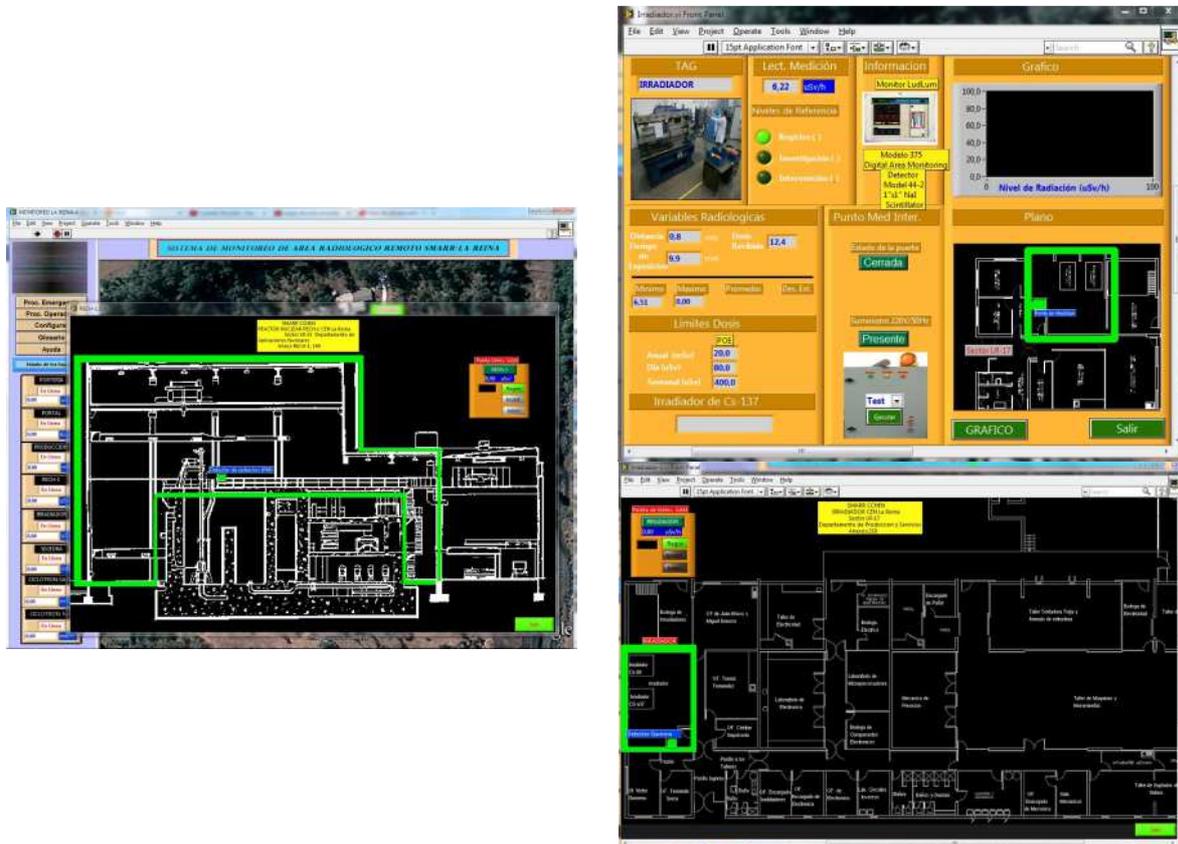
### **4.1. Monitoreo radiológico en CCHEN**

El monitoreo radiológico de fuentes Fijas incluye diferentes instalaciones de la CCHEN, con al menos un punto de medición en cada una de las mismas.

En la figura 3 (a) se realza en color verde la zona o área controlada, en el interior de la cual existen uno o más puntos de medición, los que están identificados en el interior de la zona. También se

muestra la ubicación del punto de medición, el monitor de área y el detector para espectrometría gamma, en este caso de NaI (Ioduro de Sodio), el cual está ubicado sobre la superficie de la piscina del RECH-1.

En la figura 3 (b) se brinda un croquis del laboratorio de Irradiación del Centro de Estudios Nucleares “La Reina” y se muestran los elementos del sistema de monitoreo de forma similar a la descrita anteriormente. A la derecha se muestra la forma en que se visualiza la información radiológica con los datos en tiempo real.

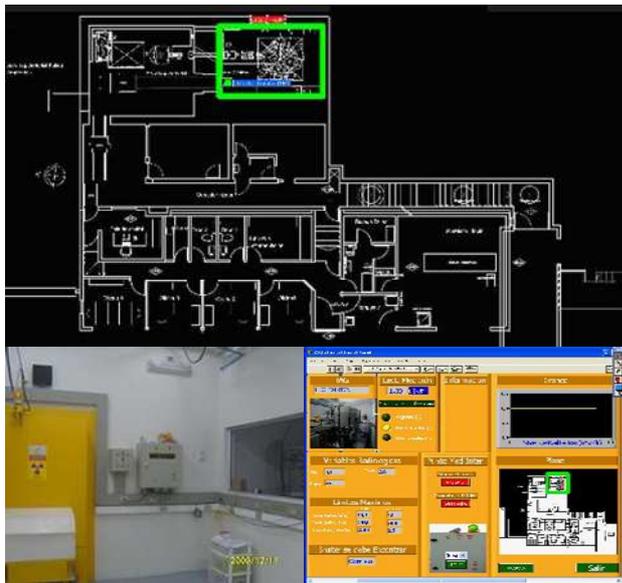


(a) RECH-1

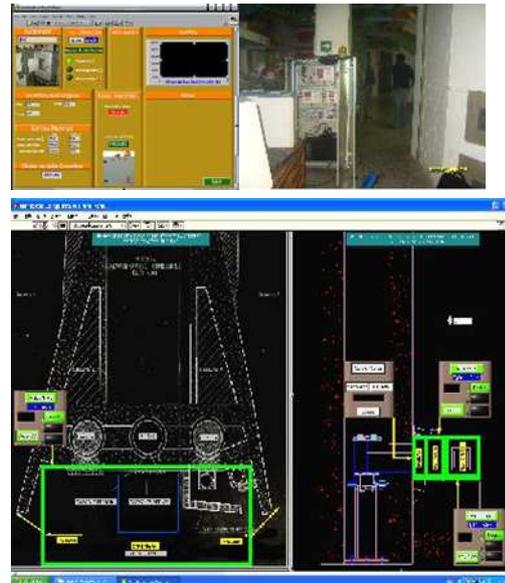
(b) Laboratorio de Irradiación CEN La Reina

FIG. 3. Puntos de medición del sistema de monitoreo radiológico Fijo

La figura 4(a) muestra el punto de medición ubicado en el Ciclotrón, donde se encuentra un detector de neutrones y otro de tasa de dosis, estos monitores de radiación son parte del punto de medición de la figura. La figura 4-(b) corresponde al monitoreo del Laboratorio de Evaluación de Materiales Bajo Irradiación (LEMBI), donde la tecnología integrada al punto de medición también es utilizada para la automatización del control de acceso y confinamiento de la fuente radiactiva utilizada en este laboratorio.



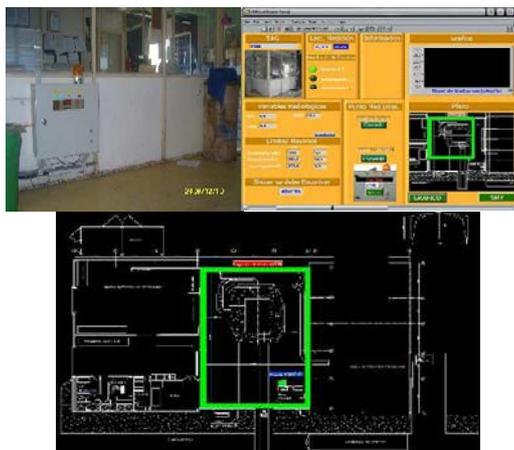
(a) Ciclotrón



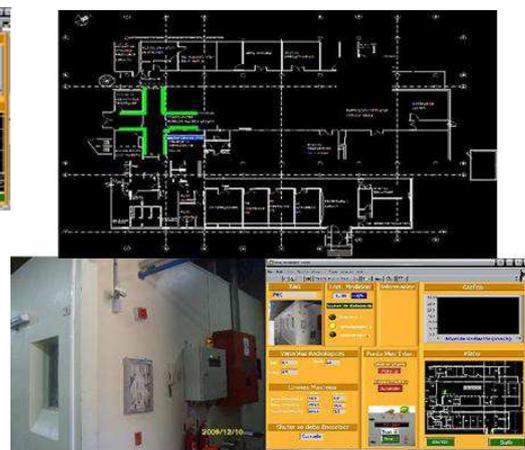
(b) Laboratorio LEMBI

FIG. 4. Puntos de Medición

Las figuras 5 ilustran la ubicación de los puntos de medición de monitoreo fijo instalados en otras instalaciones de CCHEN



(a) Planta de Irradiación Multipropósito  
IM CEN lo Aguirre



(b) Planta elementos combustibles PEC

FIG. 5. Puntos de Medición

#### 4.2. Monitoreo Ambiental en CCHEN

El desarrollo del monitoreo ambiental requiere de un tratamiento y despliegue de información diferente. El desarrollo actual, apunta a integrar en este tipo de monitoreo a otras variables radiológicas relevantes, tales como dirección y velocidad del viento, lo que implica nuevos desarrollos.

En la figura 6 se presentan los componentes principales asociados al gabinete de control de un punto de medición ambiental. En la figura se señalan la unidad de respaldo de energía, el circuito de control en base a PLC diseñado en la CCHEN para el sistema de monitoreo y los indicadores de alarma.



FIG. 6. Gabinete de control de un Punto de Monitoreo Ambiental

A la fecha, se han instalado 10 estaciones de monitoreo ambiental, cuya información se centraliza en un computador servidor (ver figura 7-d).



FIG. 7. Puntos de medición de monitoreo ambiental en:

(a) –(c) los alrededores del CEN La Reina; (d) Computador que centraliza la información del monitoreo radiológico del CEN La Reina.



FIG. 8. Puntos de monitoreo ambiental en los alrededores del CEN Lo Aguirre

### 4.3. Experiencia de Monitoreo Radiológico en la Minería

La protección radiológica en la industria es una creciente necesidad hoy, y la instrumentación nuclear basada en el uso de fuentes radiactivas para la medición de variables en procesos industriales es utilizada en sensores de nivel para determinar los niveles de estanques que almacenan material poroso o sólido, en medidores de humedad, de flujo y de densidad, entre otros.

La selección de este tipo de instrumentos, sobre otros convencionales con señales de corriente o voltaje, se deben generalmente a su robustez y a la posibilidad de tener una precisión competitiva en las lecturas. Sin embargo, el hecho de tener espacios restringidos y en ocasiones un alto flujo de

personas en las zonas cercanas a la localización de las fuentes -como en el caso de los procesos mineros - exige una supervisión radiológica en el espacio o área de trabajo y la implementación de procedimientos de control para la protección radiológica de los operadores en el área.

En este contexto, el desarrollo del sistema de monitoreo radiológico permitió elaborar una solución que cumple con las necesidades de protección radiológica en la industria y las características de los trabajos realizados en las áreas expuestas a radiaciones. La Comisión Chilena de Energía Nuclear junto con CODELCO, a partir del año 2006 implementó proyectos pilotos orientados al monitoreo radiológico en la minería.



FIG. 9. Instalación y mantenimiento de puntos de medición en proceso minero

### CODELCO-ANDINA.

El desafío principal consistió en entregar información “rápida, fácil de entender e intuitiva” a los operadores, de manera que el despliegue de la información por pantalla y la activación de alarmas les permitiera tomar decisiones de terreno rápidas e informar a los supervisores de protección radiológica de la planta.

La figura 10-(a) presenta la pantalla principal de la interfaz del software desarrollado para un proceso minero. En esta aplicación se introdujeron los conceptos de Blindaje, Distancia y tiempo de exposición como variables a ser medidas en tiempo real según las características del lugar. Estos datos se visualizan en la pantalla y se despliega mediante zonas de exclusión dinámicas, las que inmediatamente le permiten al operador tomar acciones.

Para el caso de trabajos de mantenimiento en el lugar, el oficial de seguridad ocupacional de la instalación o planta puede controlar el tiempo de exposición de los trabajadores a partir de la información que el sistema de monitoreo le entrega en tiempo real, favoreciendo así el control y la seguridad radiológica de los trabajadores.



FIG. 10. Pantallas para el monitoreo por los operadores del proceso.

(a) Pantalla del área y de ubicación de los puntos de medición, (b) Detalle de un punto de medición

Otro ejemplo de monitoreo se realizó en una instalación de gammagrafía (ver figura 11), donde se controlan 6 puntos de medición en la instalación y se realiza el control automático de confinamiento y cierre de accesos durante la operación del fortín.

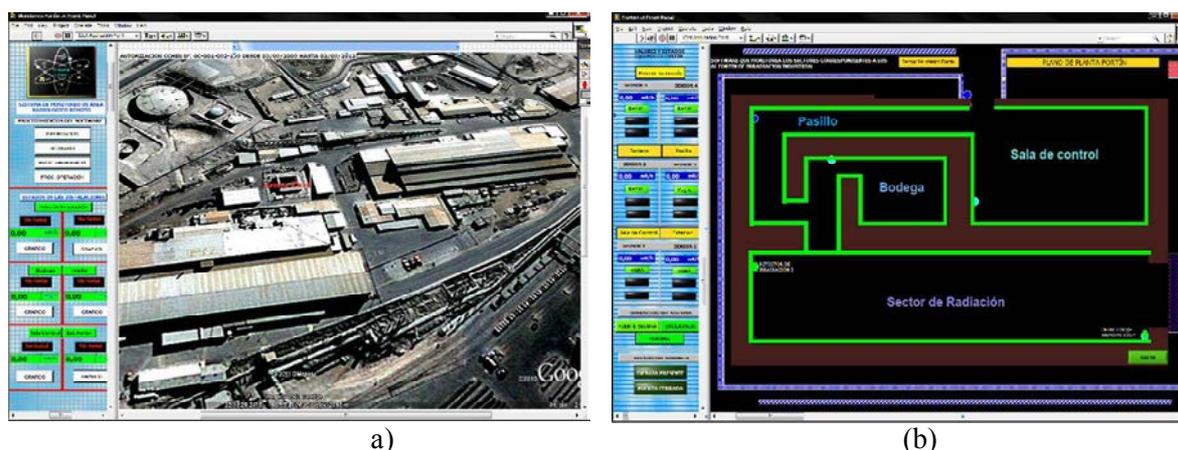


FIG. 11. Monitoreo de un fortín de Gammagrafía en CODELCO-Norte

(a) Visión general de la Instalación (b) Monitoreo de la instalación

La experiencia alcanzada con los desarrollos realizados para la minería permite asegurar que el diseño, la arquitectura de sistema, el protocolo de comunicación y la elaboración de la información del sistema de monitoreo podrían utilizarse como plataforma para el desarrollo de aplicaciones futuras que permitan una interacción en tiempo real entre el supervisor de protección radiológica local y el oficial supervisor de protección radiológica nacional. Esta funcionalidad abriría opciones de colaboración para fomentar prácticas laborales y entornos más seguros en la industria en lo referente a la protección radiológica. El análisis de datos radiológicos y la atención a eventos o emergencias por exceso de los límites radiológicos en las áreas monitoreadas sería más seguro y confiable.

#### **Estudio de Impacto en la operación del proceso mediante mediciones indirectas.**

Utilizando la medición del Sistema de Monitoreo Radiológico se propuso correlacionar la información on-line del monitoreo radiológico con la de desempeño del proceso, como una forma adicional de detectar *errores de medición de la variable de proceso* que el instrumento estaba midiendo. Entre estos tipos de correlaciones se incluyen:

- a. Evaluar mediante los datos de monitoreo radiológico el impacto del error en posición de la compuerta de seguridad (“Shutter”) que se utiliza para confinar manualmente la fuente que se utiliza en el instrumento nuclear en su contenedor.
- b. Cuantificar desviaciones en la Medición de Proceso a partir de la Medición Radiológica. En el caso de un medidor de flujo másico, instalado en un ducto de 6” de diámetro y con una superficie de lectura de 3” de espesor (ver figura 12), puede ocurrir que la apertura o cierre de la compuerta no se realice de forma completa.

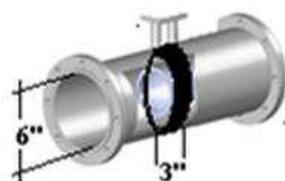


FIG. 12. Características del ducto

Esta situación no se puede controlar, y no se conoce cuál es el impacto de esta variación en la intensidad de la radiación utilizada para la medición en la lectura realizada para determinar el flujo. Esta desviación en la lectura de flujo puede provocar subsecuentes errores en los lazos de control que le siguen en el proceso industrial.

En términos de protección radiológica ocupacional, las lecturas permitieron mantener bajo control los niveles de exposición radiológicos durante el ejercicio. Sin embargo, como la incertidumbre asociada al grado de apertura de la fuente produce un error apreciable en la lectura de la variable del proceso a controlar, es recomendable utilizar la medición radiológica para alertar al operador sobre posibles errores en la apertura del shutter y su influencia en las mediciones.

En la Figura 13 se muestran los resultados del estudio realizado para encontrar la correlación entre la desviación en las lecturas de flujo y el grado de apertura del shutter de la fuente y la tasa de dosis medida para la seguridad radiológica. Cuando el shutter se encuentra totalmente abierto, la tasa de dosis medida es de  $0.80 \mu\text{Sv/hr}$  y la magnitud medida (% de sólidos en el líquido) no tiene desviación. Cuando la apertura del shutter no sobrepasa el 75 %, empiezan a producirse desviaciones significativas en la lectura del sensor, las cuales pueden llegar a casi un 80 % de sobreestimación con respecto al valor real.

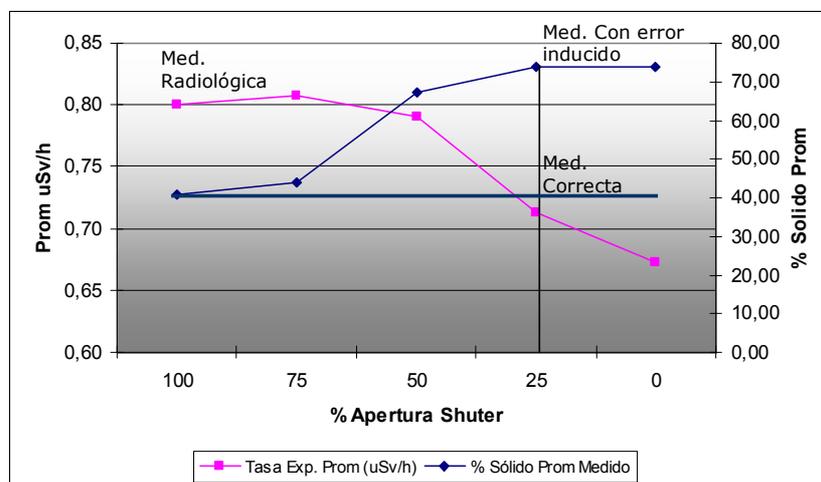


FIG. 13. Resumen de las pruebas realizadas.

## 5 CONCLUSIONES

El sistema implementado permite realizar un monitoreo radiológico on-line que permite detectar cualquier excedencia de los niveles de dosis permisibles en las principales instalaciones de la CCHEN. Este sistema permitió mejorar la eficacia del monitoreo radiológico, así como detectar cualquier transporte de fuentes radioactivas que no hayan sido apropiadamente blindadas.

## 6. TRABAJO FUTURO

Los desarrollos previstos para trabajos futuros incluyen:

- Integrar los diferentes tipos de monitoreo sobre una plataforma de datos única, centralizada y de acceso a múltiples usuarios. Disminuir los costos del sistema mediante el desarrollo de sensores de radiación producidos en la institución.
- Elaborar procedimientos que permitan integrar el monitoreo radiológico a las actividades de mantenimiento y seguridad ocupacional en la minería.
- Crear canales en el sistema de monitoreo, que permitan la interacción entre el supervisor de protección radiológica de la autoridad nacional y los operadores del sistema en la industria, cuando esto sea necesario.

## ***REFERENCIAS***

- [1] REYES, J., GUTIERREZ, J., VELASQUEZ, W., GALUPPO, E., “Implementation of a Remote System for Monitoring of Radiological Areas”, presentado en el 12 congreso de la International Radiation Protection Association in Buenos Aires (IRPA), Buenos Aires, Argentina (2008).

# SISTEMA AUTOMÁTICO DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES PARA PORTALES DE MONITOREO RADIOLÓGICO DE CONTROL DE INGRESO/SALIDA A INSTALACIONES NUCLEARES

Ing. Pablo Piña O.<sup>1</sup> <sup>g</sup>, Dr. Jerson Reyes S.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1)</sup> *Departamento de Ingeniería y Sistemas - CCHEN*

<sup>2)</sup> *Universidad de Santiago de Chile,* <sup>3)</sup> *IEEE Member.*

*Chile*

## Resumen

Este informe expone la experiencia del desarrollo e implementación de un proyecto para el monitoreo mediante adquisición de imágenes para complementar el control de ingreso/salida de material radiactivo en la portería principal del Centro de Estudios Nucleares “La Reina”.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los desarrollos que se han realizado a la fecha para mejorar el monitoreo radiológico en las instalaciones de la Comisión Chilena de Energía Atómica (CCHEN), han permitido el actual funcionamiento de un sistema de medición permanente y en tiempo real de diversas variables relacionadas con la seguridad nuclear y física de las instalaciones CCHEN. Este sistema permite tener acceso a información relevante, en tiempo real, de forma simultánea y ajustada a las necesidades e intereses de los distintos tipos de usuarios en las instalaciones que se encuentran siendo monitoreadas.

Dentro de este sistema se presentó la necesidad de hacer una vigilancia física remota de los accesos a los centros nucleares, razón por la que se desarrolló un proyecto en el marco de colaboración con ARCALCXXIII donde se implementó, en el acceso principal al Centro de Estudios Nucleares (CEN) de La Reina una cámara que permite registrar imágenes en el instante en que se detecta una anomalía en el control radiológico. Estas imágenes se almacenan como parte de los registros del monitoreo radiológico operacional del CEN La Reina y se envían a los encargados o responsables del mismo. El presente documento tiene por finalidad presentar los resultados obtenidos de la implementación de este proyecto

## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DESARROLLADO

El proyecto ejecutado persiguió alcanzar los siguientes objetivos:

- Desarrollar un sistema de adquisición de imágenes sintonizado al sistema de monitoreo radiológico de CCHEN en el acceso a la portería del CEN La Reina.
- Desarrollar y documentar el diseño del software “Control de Ingreso/Salida de Material Radiactivo” de acuerdo al procedimiento de “Diseño y Desarrollo de Software” (DDS), al “Plan de Garantía de Calidad de Software” y los requisitos estipulados en los lineamientos de las “Especificación de Requerimientos de Software (ERS), basados en la Metodología de Verificación de Validación de Software desarrollada en el marco de los proyectos ARCALXCIX y ARCALCXXIII del OIEA.

---

<sup>g</sup> Contacto para correspondencia, email: [ppina@cchen.gob.cl](mailto:ppina@cchen.gob.cl)

- Almacenar las imágenes en el computador dedicado a la función de servidor del área (área monitoreada, en este caso CEN La Reina) asociado al monitoreo radiológico, ubicado en oficina del Servicio de Protección Radiológica de CCHEN.

### 3. ALCANCE DEL PROYECTO DESARROLLADO

El proyecto tenía como alcance:

- Adquirir imágenes en el momento de producirse una señal que indique tasa de exposición superior a la medición de fondo.
- Almacenar las imágenes generadas en un evento de alarma radiológica.

### 4. IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DEL SOFTWARE

Este sistema se desarrolló principalmente utilizando software y hardware. El software utilizado para la creación del sistema (diseño y programación de la adquisición, despliegue y almacenamiento de datos) fueron las versiones 2010 de software *LabVIEW* y 2012 de *Vision Assistant*, los cuales fueron suministrados por el OIEA en los marcos del proyecto ARCAL CXXIII.

El hardware utilizado fue una computadora personal donde se instaló la aplicación y una cámara Axis M1113, ambos equipos adquiridos por CCHEN. La cámara Axis M1113 es una cámara de seguridad con posibilidad de ser conectada a una red de internet (*IP - Internet Protocol*), resistente a la intemperie y de alta velocidad de adquisición de cuadros, con resolución SVGA (*Super Video Graphics Array*) alta (800 x 600) y con una lente de foco variable.

La arquitectura del sistema se presenta en la figura 1, donde cada componente se describe como sigue:

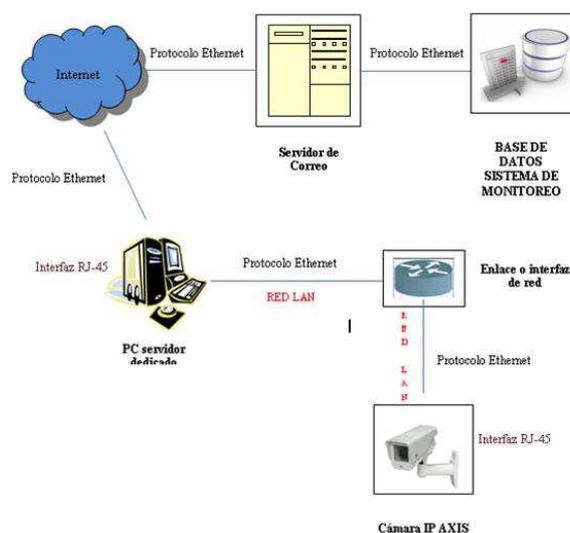


FIG. 1. Arquitectura del Sistema

- **Cámara IP AXIS:** la cámara IP AXIS fue elegida ya que cumple con las especificaciones y requerimientos solicitados por NI LabVIEW. A la cámara se puede acceder ya sea a partir de una red LAN o a través de protocolo IP.
- **PC Servidor dedicado:** en este PC corre la aplicación desarrollada y programada en LabVIEW, así como los módulos de Interfaz de usuario y la carpeta de almacenamiento local de imágenes.

- **Internet:** el internet es el medio o canal por medio del cual se envía las imágenes hacia el servidor de correo en caso de un evento.
- **Servidor de correo:** es el repositorio transitorio donde se almacenan las imágenes enviadas antes de ser almacenadas en la base de datos.
- **Base de Datos:** Se almacenan las imágenes, de modo que cuando se requiera consultar la imagen se pueda acceder a ella.

## 5. DESARROLLO DEL SOFTWARE

El esquema de la figura 2 ilustra la secuencia del algoritmo de esta aplicación. El sistema realiza la adquisición de imágenes a partir de la cámara IP, las procesa y almacena en caso de que se produzca una alarma y las envía a través de correo electrónico al destinatario responsable asignado. La figura 2-(b) muestra la lógica de inicio del software.

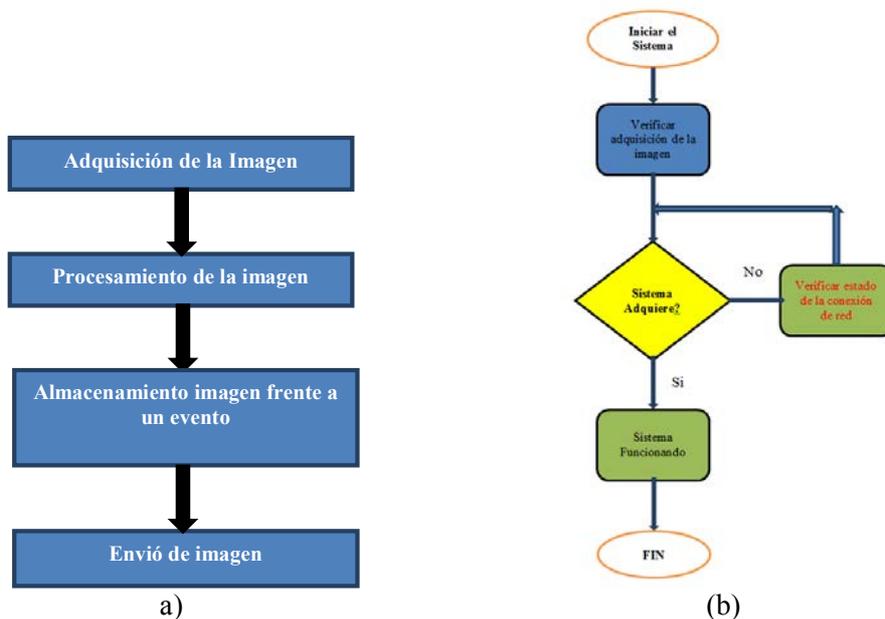


FIG. 2. (a) Secuencia del algoritmo programado, (b) Lógica de inicio del software

Las funciones del software incluyen: adquirir las imágenes desde la cámara IP AXIS y enviarlas al PC; procesar las imágenes; visualizar la imagen adquirida por la cámara en la pantalla de la interfaz con el usuario y; almacenar las imágenes con hora y fecha cada vez que ocurra un evento radiológico. Estas imágenes se almacenan en una carpeta definida para el usuario y se transmiten a través de correo electrónico.

En el Anexo II se presentan dos de las pantallas de código fuente desarrollados en LabView, en primer lugar la pantalla principal de desarrollo y en segundo lugar el diagrama de dependencias.

Los **atributos del software** para esta aplicación son:

- **Confiabilidad:** se realizaron pruebas al sistema en laboratorio y luego pruebas de terreno antes de entregar el sistema.
- **Facilidad para operaciones de mantenimiento:** este software se desarrolló de forma modular siguiendo el flujo de datos de LabVIEW. Se documentó, evitando en lo posible el

mantenimiento hasta que no sea requerida una nueva versión. Para efecto de respaldo se entregó un disco al usuario para poder ser re-instalado cuando se requiera.

- **Portabilidad:** la portabilidad del software dependerá del sistema operativo que se utilice hacia donde se quiera hacer la portabilidad y de las resolución de la tarjeta de video, ya que la resolución en la cual se desarrolló el software debe mantenerse.

## 6. DISEÑO DEL SOFTWARE

El diseño se realizó tomando en cuenta el documento de Especificaciones de Requerimientos de Software ERS de la metodología desarrollada en ARCAL, el cual sirvió como patrón de validación del mismo. Se consideró también el manual de funcionamiento de la cámara IP AXIS para su manejo y configuración y las recomendaciones de *National Instruments* para la adquisición y procesamiento de imágenes.

## 7. INTERFACES

Este sistema cuenta con las siguientes interfaces: Interfaz de Monitoreo Radiológico y Control de entrada/salida de Material Radiactivo.

### 7.1. Interfaz de Usuario

**Monitoreo Radiológico:** esta pantalla está en ejecución 24/7 y es la encargada de realizar la adquisición de datos de todos los sensores instalados en el CEN La Reina para el monitoreo de fuentes fijas. Desde su control se llama a la interfaz de adquisición de imágenes CISMIR (Control Ingreso/Salida de Material Radiactivo).



FIG. 3. Icono de Inicio del Sistema CISMIR ubicado en pantalla general



FIG. 4. Pantalla general del sistema de monitoreo incluye CISMIR

**Control de entrada/salida de material radiactivo:** es la interfaz en la que el usuario puede ver la imagen que está siendo adquirida por la cámara en tiempo real.

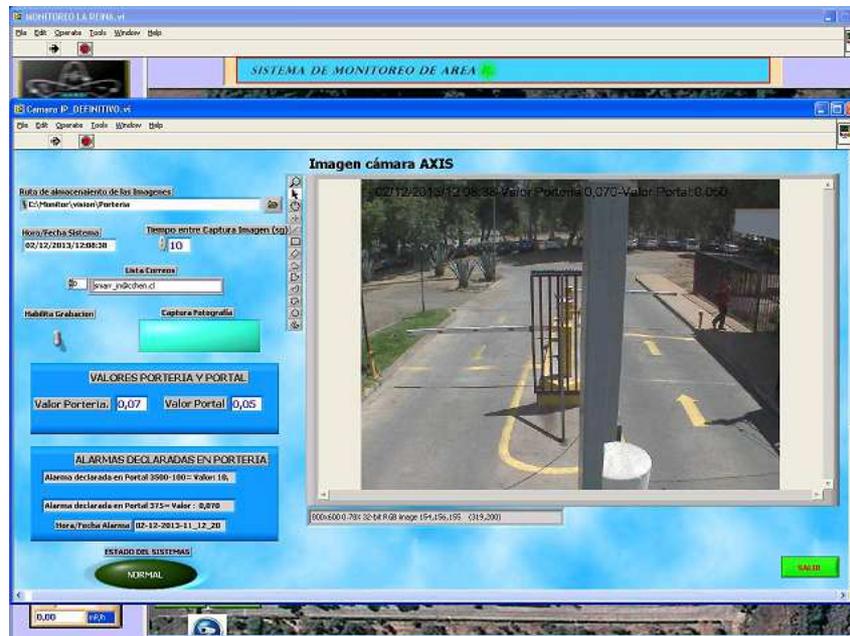


FIG. 5. Pantalla dedicada a la adquisición de imágenes CISM.

Una vez que se produce un evento, se adquiere la imagen (foto), se procesa y se muestra en la pantalla del sistema. Cuando se genera un evento de tipo radiológico esta se almacena en formato de imagen (JPG, PNG, entre otros posibles formatos) y se envía por correo electrónico al oficial de protección radiológica que corresponda. La tabla 1 brinda un listado de los indicadores que se aprecian en la figura 5.

TABLA1: DATOS E INDICADORES

| Control Ingreso/Salida de material Radiactivo |                     |  |
|---|---------------------|--|
| Nombre  | Tipo                | Descripción  |
| Tiempo Grabación                              | Control             | Define el tiempo de grabación frente a un evento                   |
| Stop  | Control             | Detiene el sistema   |
| Hora/Fecha                                    | Indicador           | Indica la hora y fecha del sistema.                                |
| Imagen cámara AXIS                            | Indicador de Imagen | Muestra la imagen que está siendo adquirida por la cámara AXIS.    |
| Captura de Fotografía                         | Indicador           | Indica el momento en que la fotografía fue adquirida y almacenada. |

## 7.2. Interfaz de Hardware

Esta interfaz es el dispositivo que permite realizar la comunicación entre la computadora donde correrá el software y el dispositivo de adquisición de la imagen. La comunicación se realiza a través de un Enlace por cable UTP.

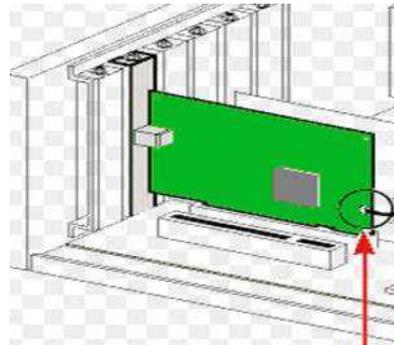


FIG. 6. Tarjeta de red integrada

### 7.3. Interfaz de Comunicación

Este sistema utiliza el puerto Ethernet para comunicación, ya que LabVIEW se comunica con el dispositivo de adquisición de la imagen (cámara IP AXIS) a través de una red de área local (LAN, *Local Area Network*) punto a punto.

### 7.4. Interfaz de Software

Las plataformas y software utilizados son el sistema operativo Windows Xp y el software interno asociado a la cámara IP, que permite establecer la comunicación con el lenguaje de programación gráfica LabVIEW.

## 8. IMPLEMENTACIÓN

En el Anexo I se presentan fotografías del proceso de instalación de la cámara, el cual ya se encuentra en funcionamiento.

## 9. CONCLUSIONES

La implementación de este sistema de vigilancia incrementa la seguridad física de las instalaciones del CEN La Reina, ya que en caso de detectarse un nivel radiológico anormal en el acceso a este centro nuclear, se podrá contar con un registro visual de la situación ocurrida en ese momento.

En el futuro se integrará el sistema de adquisición de imágenes a una plataforma de datos únicos, centralizados y de acceso a múltiples usuarios, de forma tal que puedan supervisarse los diferentes puntos controlados por el sistema de vigilancia radiológica.

ANEXO I: Instalación Cámara Portería



FIG. 7. Instalación Cámara IP



FIG. 8. Cámara Instalada en un pilar de soporte del Portal de Acceso al CEN La Reina

## ANEXO II: Código implementado.

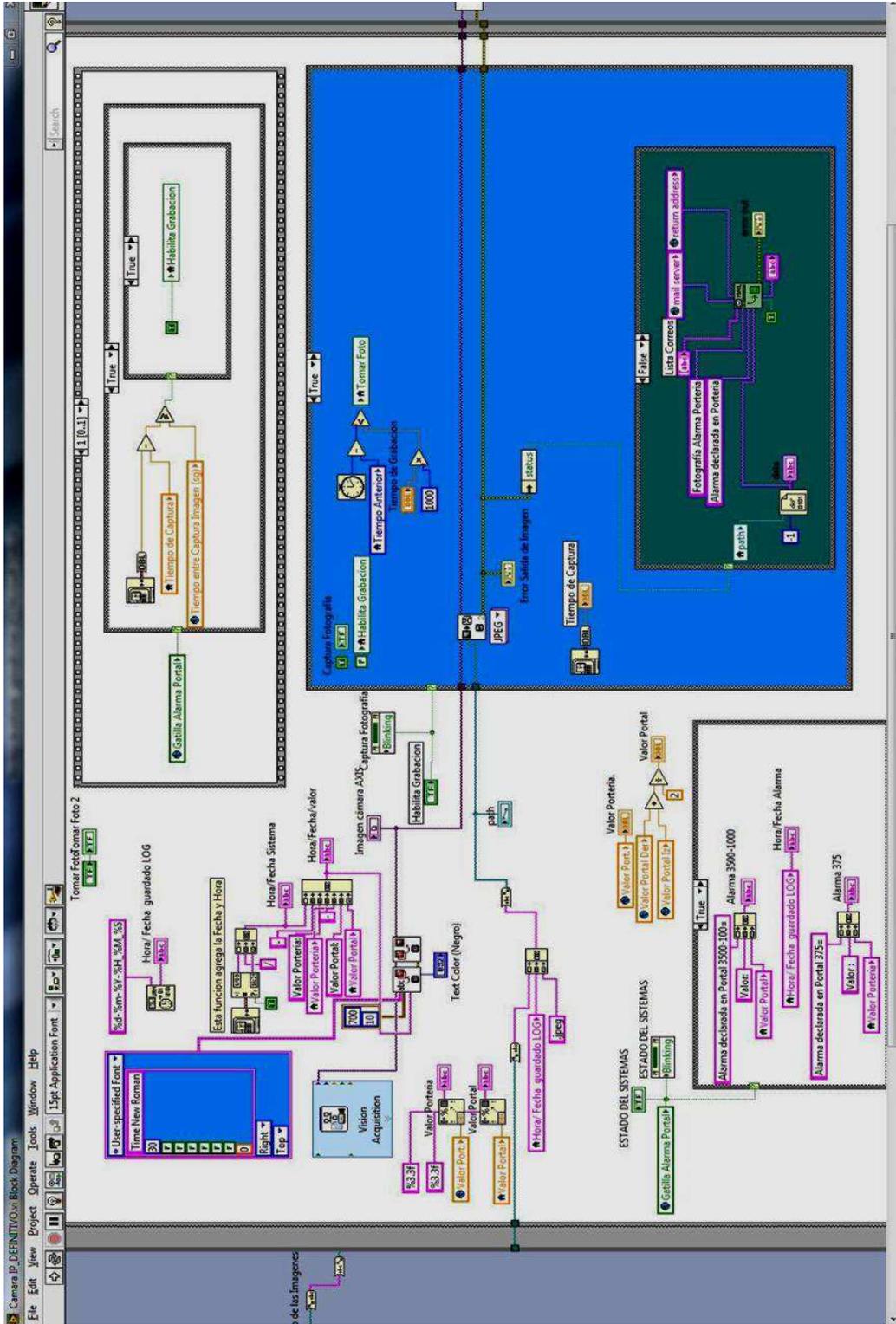


FIG. 9. Pantalla del código fuente (Diagrama de Bloques) del Sistema CISMIR (Control Ingreso/Salida Material Radiactivo)



FIG. 10. Diagrama de Dependencias del Sistema CISMR (Control Ingreso/Salida Material Radiactivo)

## REFERENCIAS

- [1] REYES, J., GUTIERREZ, J., VELASQUEZ, W., GALUPPO, E., “Implementation of a Remote System for Monitoring of Radiological Areas”, presentado en el 12 congreso de la International Radiation Protection Association in Buenos Aires (IRPA), Buenos Aires, Argentina (2008)

# AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE APERTURA A EXPOSICIÓN DE LA FUENTE DE CS-137 EN EL LABORATORIO DE REFERENCIA DOSIMÉTRICA DE SAN JOSÉ, COSTA RICA

Conejo E. <sup>1(h)</sup>, Segura M.,<sup>1</sup> Maduro E.<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *CICANUM, Universidad de Costa Rica*

<sup>2)</sup> *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica  
Costa Rica*

## Resumen:

Mediante un módulo de Arduino Uno basado en un micro-controlador ATmega ATmega328 y un puente H (L298N Dual H Bridge) se automatizó el sistema de apertura a exposición con una fuente de Cs-137, el cual es comandado por un ordenador cuya interfaz gráfica fue diseñada en software LabVIEW. Esto demostró la eficacia del Open Hardware para resolver una de las necesidades técnicas en el Laboratorio de Referencia Dosimétrica del Centro de Investigación en Ciencias Nucleares y Moleculares de la Universidad de Costa Rica (CICANUM).

## 1. INTRODUCCIÓN

El manejo de fuentes radiactivas en un laboratorio de referencia dosimétrica implica estrictos controles y procedimientos que se deben seguir con el fin de establecer la máxima seguridad del operador, como uno de los aspectos que se deben considerar.

Normalmente en el CICANUM la fuente de Cs-137, producida por la compañía J.L. Shepherd & Associates (California, USA) está equipada con un sistema de apertura mecánica que se debe manipular manualmente para exponer la fuente al equipo que se calibra. Esta operación se realiza de forma manual por el operador.

Con el presente trabajo se propuso realizar un sistema que permitiese realizar esta operación de forma remota mediante un ordenador y así contribuir a la seguridad del operador.

## 2. ADAPTACIÓN MECÁNICA DEL OBTURADOR DE LA FUENTE DE Cs-137

Para el proceso de automatización del obturador de la fuente, se procedió a evaluar el uso de un motor de corriente directa (DC, *Direct Current*) con reducción como elemento activo del sistema mecánico. Esto implicó la adaptación mecánica del obturador original de la fuente, sin que ésta sea modificada por razones de seguridad. En la Figura 1 se muestra la fuente y el obturador con que está equipada la misma.

---

<sup>h</sup> Contacto para correspondencia, email: [elian.conejo@ucr.ac.cr](mailto:elian.conejo@ucr.ac.cr)



FIG. 1. Fuente de Cs-137 contenida en el blindaje (1) y en la parte superior se muestra el mecanismo de manija (3) que acciona el obturador de la fuente al desplazarlo hacia arriba y exponerla en la ventana de entrada (2).

La adaptación mecánica consistió en un sistema basado en un tornillo sin fin que desplaza la manija que controla la subida y descenso de la fuente que fue acoplado al motor. Dos sensores de contacto se instalaron con el objetivo de generar una señal de parada y verificación del estado de total apertura o cerradura, como se muestra en la Figura 2.



FIG. 2. Descripción del sistema electromecánico del sistema de apertura,

**Notas:** 1) Tornillo sin fin, 2) Sensor de Abierto, 3) Sensor de Cerrado, 4) Motor DC, 5) Cerradura de Emergencia, 6) Barra de Control de la Fuente, 7) Contenedor de la Fuente Cs-137 y 8) Tapa de Seguridad.

### 3. CONTROL ELETRÓNICO DEL SISTEMA DE APERTURA

Para el control del motor se utilizó un sistema de control DC a base de un Puente H [1] (Figura 3). En el mercado hay una gran variedad de este tipo de módulos por lo que hay varias opciones de selección, en función de la corriente a controlar. Específicamente en esta implementación fue suficiente de

controlar la corriente de alimentación del motor por debajo de los 2A, ya que este cuenta con un elemento reductor en la transmisión.

Las entradas digitales del Puente H, son controladas por un módulo Arduino Uno [2] basado en un micro-controlador ATmega328 (ver Figura 4). El módulo Arduino Uno fue escogido por contar con un puerto USB 2 (*Universal Serial Bus*) que facilita la conexión con el ordenador que envía los comandos de Subir/Bajar la fuente y la verificación de los estados de la compuerta mediante los sensores de contacto utilizados para este fin.



FIG. 3. Módulo de Puente H (L298N Dual H Bridge) fabricado por NEOMART para el control mediante señales digitales del motor DC



FIG. 4. Módulo de control digital Arduino Uno utilizado

El controlador diseñado para el módulo Arduino Uno se instaló en el ordenador de manera simple y este fue directamente registrado y visualizado por la aplicación *Measurement & Automation Explorer* [3] como un instrumento virtual(VI). Como resultado se pudo tener acceso directamente en el software LabVIEW [4] como un VI y así enviar los comandos previamente definidos en el programa del micro-controlador.

El código que se escribió en el micro-controlador contiene las rutinas de verificación de los sensores de contacto, así como los disparos digitales que controlan el sentido de rotación del motor. Este código fue escrito en lenguaje C [5]. Una ventaja al utilizar el módulo Arduino Uno es que se cuenta con una variedad de librerías que permite rápidamente implementar y optimizar el sistema al operar todos las entradas/salidas del módulo y adaptarlo a los requerimientos de seguridad que se desee [6].

#### 4. INTERFAZ GRÁFICA EN LabVIEW

Específicamente para esta operación el desarrollar la interfaz mediante programación G fue muy conveniente y eficaz ya que de forma sencilla se alcanzaron los requerimientos mínimos de operación del sistema de obturador de la fuente de Cs-137.

Este consta de un interruptor que tiene la funcionalidad de accionar la opción de Subir o Bajar la fuente Cs-137 y varios indicadores que muestran la acción que se realiza, a la vez que se muestra el estado actual del sistema, como se puede apreciar en la Figura 5.

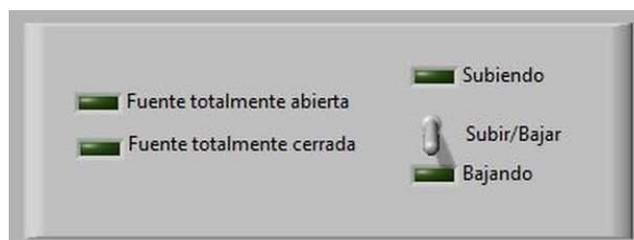


FIG. 5. Interfaz gráfica programada en LabVIEW para el control del sistema de obturador de la fuente de Cs-137.

Las pruebas que se realizaron para controlar a distancia la exposición de la fuente fueron satisfactorias.

## 6. CONCLUSIONES

El uso del módulo Arduino Uno permitió de manera eficaz implementar la automatización del obturador de una fuente de Cs-137 para el Laboratorio de Referencia Disimétrica en el CICANUM. El sistema desarrollado puede ampliarse para un sistema de automatización a mayor escala, gracias a que el diseño del módulo Arduino Uno es de libre acceso así como sus librerías en lenguaje de programación C.

Al estar implementado una interfaz USB 2 en el módulo Arduino Uno el diseñador tiene acceso al mismo mediante protocolo VI, el cual es fácilmente implementado con las funcionalidades del software LabVIEW.

Una de las ventajas de implementar la interfaz gráfica en LabVIEW con su respectivo VI, es que ésta puede ser utilizada tanto como módulo independiente como puede implementarse en una aplicación más compleja dentro de la automatización de varias funciones en un Laboratorio de Calibración Disimétrica.

## REFERENCIAS

- [1] <http://www.hobbytronics.co.za/p/646/1298-dual-h-bridge-motor-driver-v2>
- [2] <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [3] <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/71544521BDE34FFB86256FCF005F4FB6>
- [4] <https://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/>
- [5] <http://www.cprogramming.com/>
- [6] <http://arduino.cc/en/Reference/Libraries>

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRANSMISIÓN REMOTA DE DATOS PARA UNA RED DE SENSORES DE RADÓN

Conejo E.<sup>1(h)</sup>, Segura M.,<sup>1</sup> Fonseca L.<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *CICANUM, Universidad de Costa Rica*

<sup>2)</sup> *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica*  
*Costa Rica*

## Resumen:

Mediante un módulo basado en arquitectura ARM (*Advanced RISC Machine*) se implementó la automatización de transmisión de datos vía Módem USB 3G de una estación meteorológica y una sonda de medición de Radón a las instalaciones del Laboratorio de Física y Química de la Tierra del CICANUM vía WiFi. Se creó un portal para tal fin (WebServer) en el que se configuran y se administran los sensores de presión, dirección y rapidez del viento, pluviómetro, temperatura y radiación solar además de una sonda de medición de Radón.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Radón es un gas noble que tiene principalmente tres isótopos radiactivos con diferente período de semidesintegración. El análisis de la actividad de estos radioisótopos es importante en varias aplicaciones relacionadas con estudios de las ciencias de la tierra. Estos isótopos son el Rn-219 (Producto de la desintegración del Ac-227), el Rn-220 (Producto del Th-232) y el Rn-222 (Producto del Ra-226) que es el que tiene un período de desintegración más largo.

La capacidad del Rn-222 como gas noble de migrar a través de las capas del subsuelo ha permitido que la medición de su concentración de actividad haya sido utilizada en aplicaciones geofísicas [1], en estudios de sistemas geo-termales y de eventos sísmicos [2]. La interpretación de las variaciones de la concentración de su actividad se ha extendido a la exploración y a la caracterización de zonas tectónicas [3], [4].

En Costa Rica es de gran importancia la medición continua de la actividad del Rn-222 con el fin de validar la variación de la actividad de este como indicación de un evento sísmico. Para poder hacer una interpretación adecuada de las variaciones en los valores de actividad del Rn-222 medidos se requiere hacer correcciones utilizando los valores de los parámetros meteorológicos medidos in-situ. Por este motivo se inició un proyecto para implementar un sistema que integrase una sonda de medición de Rn-222 con los sensores utilizados en una estación meteorológica, y cuyos datos fueran transmitidos al Laboratorio de Física y Química de la Tierra del CICANUM de manera sistemática.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el proceso de automatización de la transmisión de datos, se parte de la integración de una sonda de medición de Rn-222 Cliperton II (Figura 1) y una estación meteorológica (Figura 2)



*FIG. 1. Sonda de medición de Radón Cliperton II, diseñadas y fabricadas por France Telecom, la extracción de los datos y programación se realiza bajo protocolo RS-232*



*FIG. 2. Estación meteorológica compuesta con pluviómetro, radiómetro, anemómetro, sensor de dirección del viento, presión, temperatura del aire y suelo y humedad. Su programación y extracción de datos se hace mediante comunicación serial bajo protocolo RS-232.*

La sonda de radón cuenta con un puerto serie que utiliza el protocolo RS-232 que permite su programación y transmisión de datos al ordenador. Esta operación debe realizarse durante periodos estrictos a lo largo de un mes, con el riesgo de que la batería de la sonda se agote y los datos recogidos en la misma se pierdan.

La estación meteorológica también cuenta con un puerto serial RS-232. Esta cuenta con un soporte de energía más robusto, una batería Ácido-Plomo cuya duración es casi el doble de lo que las baterías de la sonda de radón pueden alcanzar.

La instalación de la estación meteorológica debe estar lo más cercana posible al sitio donde se coloca la sonda de medición de radón, como se puede observar en la Figura 3.



FIG. 3. Estación meteorológica y sonda de radón instaladas en el sitio de prueba en las cercanías al CICANUM.

Para el sistema de adquisición de datos se utilizó el módulo Beaglebone [5] (Figura 4), basado en tecnología ARM Cortex-M3, capaz de correr una versión de Linux (Angstrom Linux / Ubuntu) especialmente diseñada para este módulo. Otra característica importante es que éste cuenta con varios periféricos, tales como puertos USB (*Universal Serial Bus*) y RJ45 para uso de protocolo IP.



FIG. 4. Módulo Beaglebone basado en tecnología ARM con un micro-procesador Cortex-A8 de 720MHz.

La conexión de los puertos RS-232 de la estación meteorológica y la sonda de radón se realizó mediante un convertidor RS-232 a USB2, y utilizando un hub USB ya que el módulo Beaglebone solo tiene un puerto USB2.

Una vez establecida la conexión con el módulo Beaglebone, se procedió a implementar un código en Python [6] que incluye un script de instrucciones basadas en los diversos comandos de descarga y programación de las respectivas estaciones. Para ejecutar el script en Python, se procedió a instalar un intérprete Python en el sistema Linux del ARM.

Para la transmisión de datos se utilizó un módem USB 3G el cual se conecta al hub donde está conectado el Beaglebone, y que debe tener al menos 3 entradas USB2.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL WEB SERVER

Para la programación y recolección de datos se implementó un WebServer en un computador dedicado a las funciones de servidor. Este fue programado en un sistema de gestión de bases de datos relacionales MySQL [7]. Las opciones implementadas en el WebServer, van desde crear una estación (Figura 5) y adicionar los sensores que se requieran como se observa en la Figura 6.

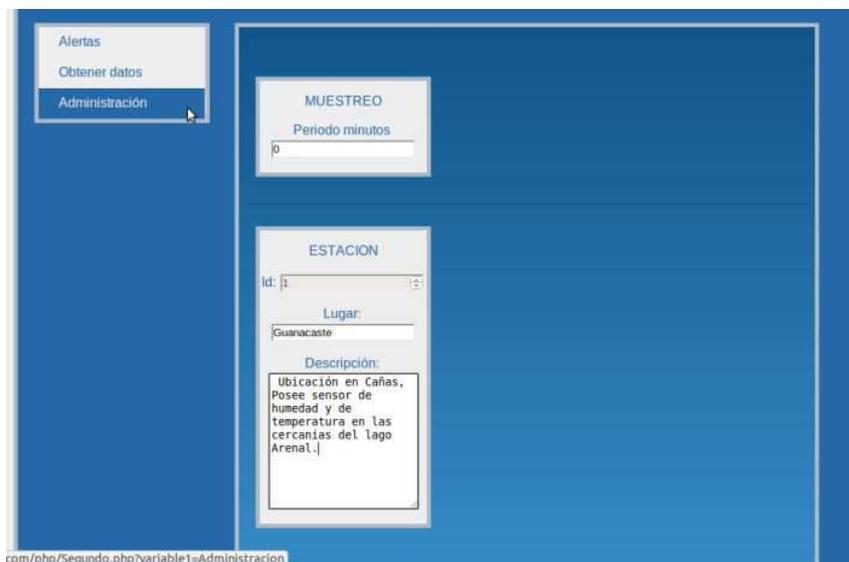


FIG. 5. Vista del WebServer para la administración y creación de la estación a automatizar a través del módulo Beaglebone.

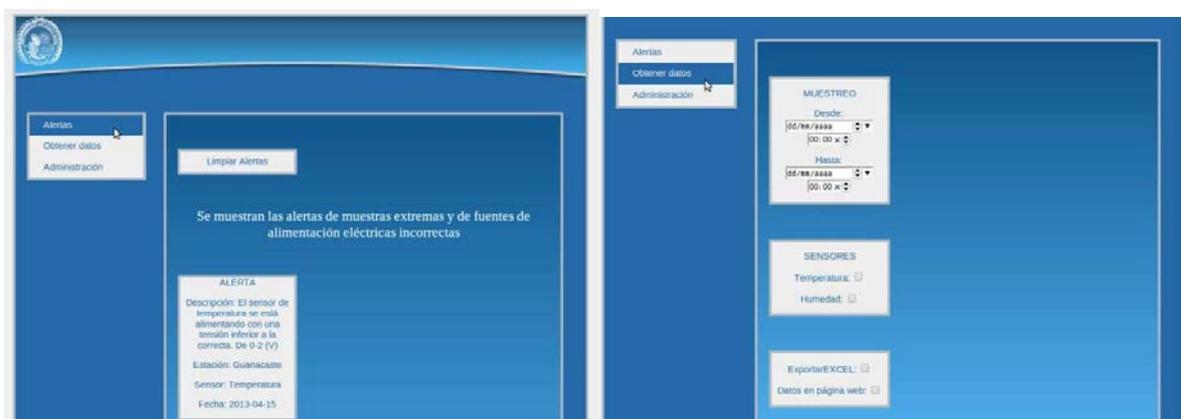


FIG. 6. Configuración de Alertas y Adición de Sensores a la estación, así como establecer el periodo de muestreo y el formato de salida de los datos a exportar.

Una vez que la estación es operacional, desde las instalaciones del Laboratorio de Física y Química de la Tierra en el CICANUM se puede enviar una orden de descargar los datos de la estación meteorológica y de la sonda de radón cuando sea necesario o que esta se a programada para que se realice periódicamente.

#### 4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

El objetivo de automatizar la transmisión remota de datos se cumplió mediante la implementación de un módulo Beaglebone (Free Hardware) y el uso de dispositivos de fácil acceso.

Aunque la transmisión de datos se realizó mediante el uso de tecnología Módem USB 3G, ésta vía tiene sus ventajas y desventajas, por lo que el uso de esta modalidad se propone sin menoscabo de otras técnicas, tales como la trasmisión de datos por GSM y radio.

Es importante resaltar que la utilización de un hub WiFi cercano es necesaria para que esta implementación sea eficaz por lo que en sitios bastante remotos puede ser difícil su implementación. La instalación de estos dispositivos puede hacerse en sitios cercanos por ejemplo a las instalaciones de guarda parques, los cuales con frecuencia tienen acceso a WiFi y que también están cerca de los principales volcanes en Costa Rica

## REFERENCIAS

- [1] TANNER, A.B., “Radon migration in the ground; a supplementary review”, Proceedings of the Third International Symposium on the Natural Radiation Environment, Houston, Texas, April 23-28, 1978.
- [2] GINGRICH, J. E., Radon as a geochemical exploration tool, Journal of Geochemical Exploration, **21** 1–3 (1984) 19.
- [3] KING, C.Y., KING, B.S., EVANS, W.C., ZHANG, W., Spatial radon anomalies on active faults in California, Applied Geochemistry, **11** 4 (1996) 497.
- [4] BAUBRON, J.C., RIGOB, A., TOUTAINC J.P., Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France), Earth and Planetary Science Letters, **196** 1–2 (2002) 69.
- [5] <http://beagleboard.org/products/beaglebone>
- [6] <http://www.python.org/>
- [7] <http://www.mysql.com/>

# AUTOMATIZACIÓN DE LA PLATAFORMA MÓVIL DEL LABORATORIO SECUNDARIO DE CALIBRACIÓN DOSIMÉTRICA EN MONTEVIDEO URUGUAY

Raúl Arteche Díaz<sup>1(i)</sup>, Guillermo Mesa Perez<sup>1</sup>, Jossue Arteche Díaz<sup>1</sup>, Antonio Pacheco<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), La Habana, Cuba

<sup>2)</sup> Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), Montevideo Uruguay

## Resumen:

Dentro del marco del proyecto de cooperación técnica ARCAL RLA1011 se diseñó y construyó un sistema que permite controlar, de forma remota, el movimiento del banco de calibración ubicado en la sala de calibración dosimétrica del laboratorio secundario de calibración dosimétrica en Montevideo Uruguay.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto tuvo como objetivo la automatización de algunos de los procesos en el laboratorio secundario de calibración dosimétrica en Montevideo Uruguay. Dentro del marco del proyecto de cooperación técnica ARCAL RLA1011, se coordinó la proyección de un sistema que permite controlar, de forma remota, el movimiento del banco de calibración ubicado en la sala de calibración dosimétrica. El sistema instalado también permite monitorear, a través de cámaras inalámbricas, otros proceso o instrumentos durante el proceso de la calibración.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

### 2.1. Esquema general de interconexión inalámbrica

Para lograr el control remoto del sistema se diseñó un esquema de interconexión similar al que se muestra en la figura 1.

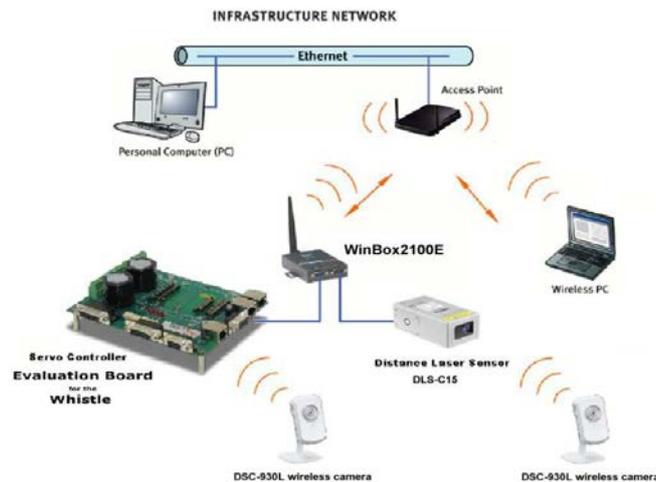


FIG. 1. Esquema de interconexión.

<sup>i</sup> Contacto para correspondencia, email: [arteche@ceaden.edu.cu](mailto:arteche@ceaden.edu.cu)

Como se puede apreciar en el esquema de a figura 1, el sistema está conformado por 5 dispositivos accesibles a través de conexiones WiFi (*Wireless Fidelity*).

- Convertidor RS232 a Wifi (WinBox2110E).  
Este dispositivo permite conectar y controlar dos puertos series RS232 desde una conexión inalámbrica WiFi.
- Controlador del servomotor (Whistle Servo Driver WHI-10/60)  
Este dispositivo controla y acciona el servo motor que mueve la plataforma, estará conectado a través de una conexión RS232 con el dispositivo WinBox2110E.
- Medidor de distancia basado en dispersión dinámica de luz (DLS, Dynamic Light Dispersion)  
Este dispositivo brinda información sobre la distancia a la que está ubicada la plataforma, respecto a un punto de referencia. El medidor de distancia DLS-C15 está conectado a través de una conexión RS232 con el dispositivo WinBox2110E. Las mediciones obtenidas tienen una precisión de  $\pm 1,5\text{mm}$ .
- Cámaras inalámbricas DSC-390L  
Estos dispositivos permiten monitorear y visualizar los procesos de calibración. La primera de las cámaras está instalada sobre la plataforma y permite visualizar las lecturas de los instrumentos que se están calibrando. La segunda cámara brinda una vista general de la sala de calibración, permitiendo que se puedan monitorear otros procesos o instrumentos. Las cámaras están conectadas a la red WiFi y se puede acceder a las mismas independientemente.

## 2.2. Mecanismo de movimiento

Se diseñó y construyó un mecanismo que permite controlar y ejecutar el desplazamiento del banco de calibración. Las Figuras 2 y 3 muestran el plano de ensamblado, la posición y el modo de instalación del mecanismo. Este dispositivo está formado por una estructura de soporte, una rueda, un mecanismo de transmisión por cadena, el servo motor y la tarjeta controladora.

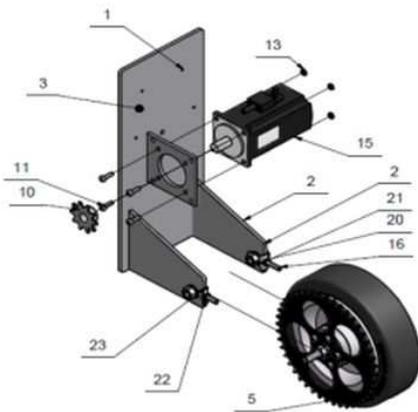


FIG. 2. Plano para ensamblado



FIG. 3. Mecanismo instalado

La calibración del movimiento y el posicionamiento de la plataforma se realizaron durante una misión de asesoría de cinco días, lo cual implicó la programación y modificación del firmware de la tarjeta controladora de motor y el almacenamiento en memoria flash de los parámetros finales del sistema.

### 2.3. Instalación y configuración del sensor de distancia (sensor de distancia laser DLS- C15)

Como parte del sistema propuesto fue instalado y configurado el sensor de distancia DLS-C15. El dispositivo medidor de distancia DLS-C mide la distancia absoluta hasta 150 metros con una precisión de  $\pm 1,5$  milímetros. En la figura 3 se señala la ubicación del sensor de distancia respecto a la plataforma (indicación de la flecha amarilla).

### 2.4. Instalación y configuración de las cámaras inalámbricas (DCS-930L)

Se instalaron dos cámaras inalámbricas DCS-390L. La primera cámara es usada para capturar imágenes con la medición del instrumento bajo calibración. La segunda de las cámaras es usada para obtener una visión general de la sala de calibración.



FIG. 4. Imagen tomada desde la primera cámara



FIG. 5. Imagen desde la segunda cámara

Para la transmisión de las imágenes fue instalado y configurado un punto de acceso inalámbrico Cisco RV110W. También se configuró una red inalámbrica local a la cual fueron conectados los distintos dispositivos que conforman el sistema.

### 2.5. Instalación y configuración de la conexión inalámbrica del sensor de distancia y la tarjeta controladora del servo motor

Como parte del sistema de interconexión, fue concebido el uso de un dispositivo que actúa como convertor de protocolo de transmisión de modo Wifi a RS232. Este tipo de dispositivo permitió conectar el sensor de distancia y la tarjeta controladora de motor a la red inalámbrica.

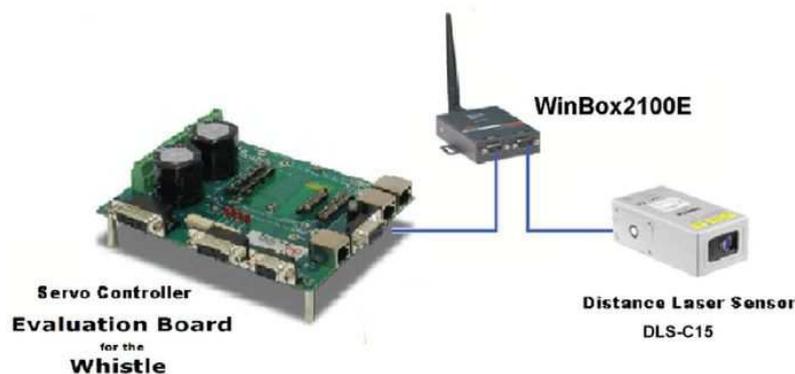


FIG. 6. Conversor Wifi a RS232.

## 2.6. Software de control y adquisición

Con el objetivo de realizar la integración del sistema fue desarrollada una aplicación en software LabView que permite controlar en modo manual y automático el movimiento y posicionamiento de la plataforma de calibración, así como la toma de imágenes.



FIG. 7. Pantalla principal.

## 2.7. Control manual

En modo manual el usuario puede mover la plataforma a una posición especificada. Después de especificar la nueva posición debe accionar el botón MOVER.

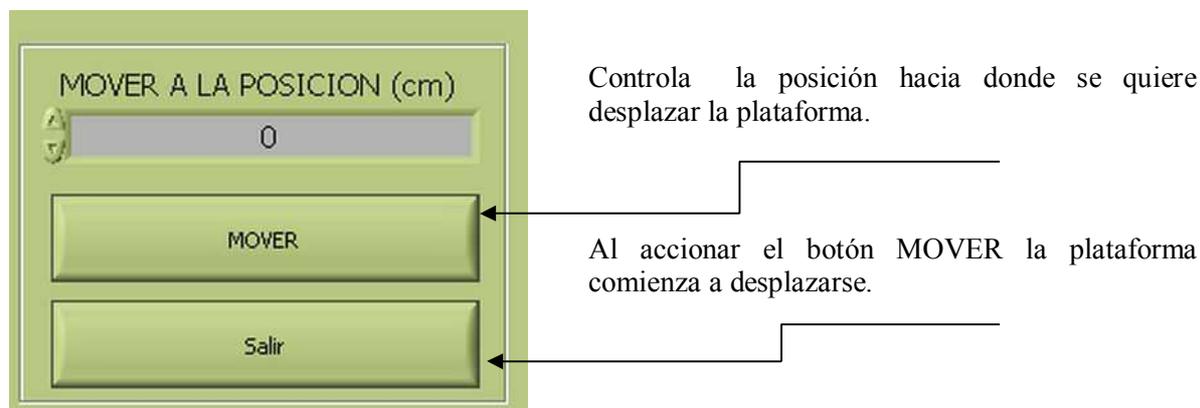
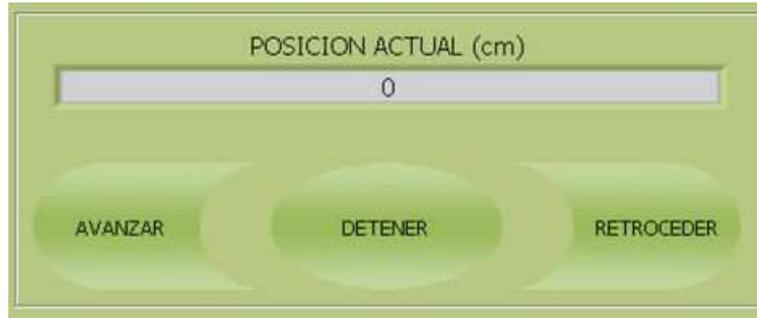


FIG. 8. Mover a una posición especificada.

El usuario puede también, accionando el control correspondiente, controlar que la plataforma avance o retroceda a voluntad.



*Plataforma avanza*

*Detiene el movimiento*

*Plataforma retrocede*

FIG. 9. Modo de medición manual.

## 2.8. Control automático

En modo automático el usuario define las posiciones donde se realizarán las mediciones, la cantidad de lecturas replicadas y el tiempo de medición de cada una. En la figura 10 se ilustra el caso en que se hayan definido posiciones a 90cm, 190cm y 400cm, con 5 mediciones en cada punto y un intervalo de 1 segundo de medición para cada una de ellas.

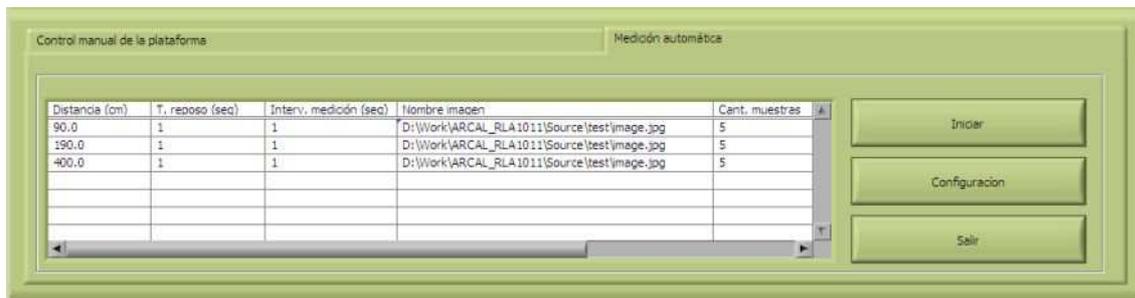


FIG. 10. Modo de medición automático.

## 2.9. Configuración del modo automático

Oprimiendo el botón Configuración se puede crear o cargar una plantilla donde estarán definidos los parámetros de la medición automática. Por cada punto se define los siguientes parámetros:

- **Distancia:** Posición en cm donde se realizara la medición.
- **T. reposo:** Tiempo que se esperará entre el inicio de la primera medición y el momento en que la plataforma llega a la posición indicada.
- **Interv. Medición:** Tiempo en entre mediciones.
- **Nombre imagen:** Camino y prefijo de las imágenes de las mediciones.
- **Cant. Muestras:** Cantidad de mediciones por posición

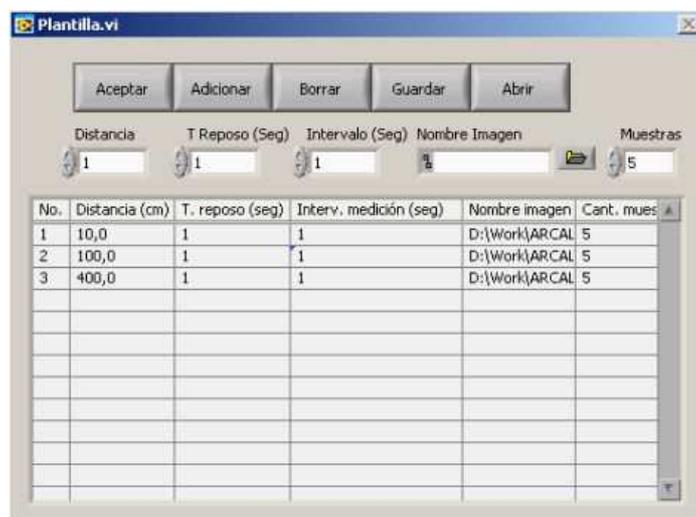


FIG. 11. Plantilla de mediciones

### 3. CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto fue la instalación de un sistema que permite controlar de forma remota, el movimiento del banco de calibración ubicado en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica en Montevideo Uruguay. El sistema instalado es capaz de mover la plataforma a una posición especificada con una precisión inferior a los 5 mm.

Con la instalación del nuevo sistema se mejora la eficiencia del proceso de calibración, se sustituye el viejo circuito de televisión analógico y se facilitan los trabajos dentro de laboratorio, evitando los riesgos de exposición accidental a las radiaciones.

El sistema instalado es una solución viable y económica, que puede ser mejorada. El desplazamiento de la plataforma se puede realizar de forma más armónica y precisa si se le instala un reductor planetario cuyo precio en el mercado oscila sobre los 300 dólares. La instalación de este mecanismo permitiría que el servo motor trabajara en un régimen de menor consumo de corriente, el torque y la precisión se incrementarían y se podría reducir el efecto inercial que provoca la masa de la plataforma.

# AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE PATRONES SECUNDARIOS EN QUITO - ECUADOR

W. Pavón Vallejos<sup>1(j)</sup>; J. Bastidas Pazmiño<sup>1</sup>; P. Arias Pérez<sup>2</sup>;

<sup>1)</sup> *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador (MEER), Ecuador*

<sup>2)</sup> *Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), Perú*

## Resumen

La Radioterapia moderna demanda exactitud en la determinación de la dosis absorbida y su administración, siendo la calibración del haz de radiación y de los sistemas dosimétricos un factor importante. Por tal motivo, el Laboratorio de Patrones Secundarios de Quito-Ecuador ha diseñado una plataforma de instrumentación virtual que permite la integración del control remoto del sistema de calibración en modos manual y automático.

## 1. INTRODUCCIÓN

El fantoma de agua es un componente fundamental del equipamiento requerido para la calibración y control de calidad de haces clínicos de fotones y electrones de alta energía. El fantoma del Laboratorio de Patrones Secundarios mostrado en la figura 1, es utilizado dentro del proceso de calibración principalmente para posicionar correctamente la cámara de ionización. La automatización del sistema permitió alcanzar un error de  $\pm 0.25\text{mm}$  en el desplazamiento a lo largo de los ejes de las abscisas y ordenadas, minimizando de esta forma las incertidumbres asociadas al posicionamiento manual, y mejorar la exactitud y la reproducibilidad del proceso de calibración de los sistemas dosimétricos.



FIG. 1. *Fantoma automatizado en el laboratorio de patrones secundarios*

Para lograr la automatización se planteó un proceso de trabajo en etapas, considerándose primero el análisis del sistema mecánico, a continuación el procesamiento de las señales de control del movimiento, la integración de los dispositivos y por último el desarrollo de la interfaz de control para automatizar las tareas de medición de dosis y la generación de reportes.

## 2. SISTEMA MECÁNICO DEL FANTOMA ANTROPOMÓFICO DE AGUA

El sistema de movimiento está compuesto por dos brazos electromecánicos de aluminio, representados en la figura 2. El primer brazo realiza el movimiento en el eje de las abscisas y soporta la estructura del otro brazo, que ejecuta el desplazamiento en el eje de las ordenadas y que sostiene mediante una estructura adicional la cámara de ionización. Los brazos tienen recorridos máximos de 415 mm y 385 mm, respectivamente. El desplazamiento a través de los ejes se realiza por medio de sendos motores

---

<sup>j</sup> Contacto para correspondencia, email: wilson.pavon@meer.gob.ec

de corriente continua acoplados cada uno a una caja reductora (figura 3). Estos conjuntos están colocados en el extremo de cada brazo. Las cajas reductoras están acopladas a una banda dentada que moviliza un soporte, el cual permite el desplazamiento en cada uno de los ejes y movilizar la estructura que soporta la cámara de ionización.

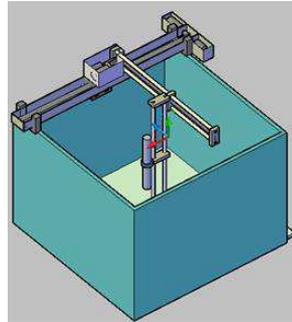


FIG. 2. Brazos electromecánicos montados en el fantoma de agua antropomórfico



FIG. 3. Figura 3: Motor DC, acoplado a una caja reductora que permiten el movimiento a través de los ejes

### 3. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

En relación a la parte eléctrica, los motores son alimentados con voltaje de 12 [V], y cuya polaridad está en dependencia de la dirección del movimiento deseado. La señal eléctrica que permite conocer la posición exacta de la cámara de ionización se obtiene del voltaje diferencial de un potenciómetro de precisión que está acoplado al eje de la caja reductora y que está alimentado con un voltaje 10 [V]. Adicionalmente, existe un sensor de tope ubicado al principio del recorrido de la banda dentada, para conocer cuando se arriba al punto de inicio del desplazamiento en cada eje.

Con el objetivo de controlar la dirección de movimiento de los motores y de proveer la alimentación exacta de voltaje para los potenciómetros y los fines de carrera, se utiliza un circuito basado en una tarjeta de adquisición NI-6009, el cual que se muestra en la figura 4 junto con las conexiones al resto de los elementos electrónicos. La tarjeta de adquisición NI-6009 recibe del computador la información del movimiento que debe desarrollar cada uno de los motores y envía información útil para la evaluación del sistema, como el voltaje de los potenciómetros y el estado de los fines de carrera.

Los componentes insertados en el circuito impreso (PCB, *Printed Circuit Board*) realizan dos funciones básicas: la primera está destinada a la regulación de los voltajes para los potenciómetros y para los fines de carrera por medio de los circuitos integrados 7810 y 7805; y la segunda tarea tiene el objetivo de proveer de la potencia necesaria para el movimiento y control de la dirección de los motores por medio de los integrados L298 y el LM358. La velocidad de movimiento de los motores se controla por medio de la modificación del ancho de los pulsos suministrados, mientras más ancho es el nivel en alto, la articulación tiene mayor velocidad.

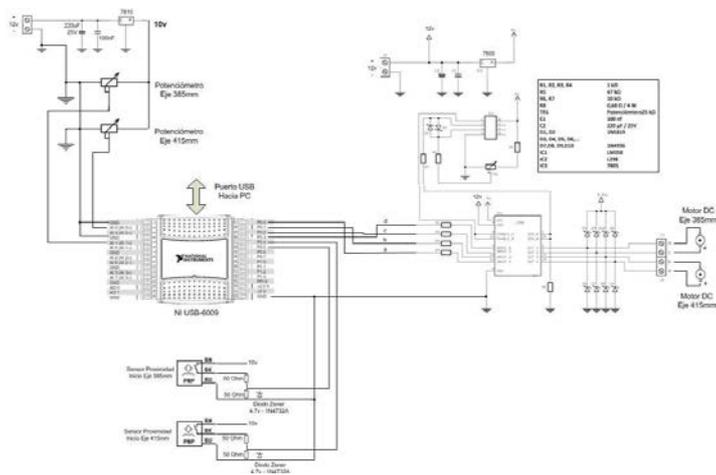


FIG. 4. Circuito de control de motores DC en Fantoma

#### 4. INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS

Para el correcto funcionamiento del sistema y sabiendo que el control por seguridad se realiza de forma remota, se debe tener toda la información necesaria y suficiente para la toma de decisiones, para ello se han integrado diversos dispositivos que se indican en la tabla 1, en ella se identifica bajo la categoría de Dispositivos los que tienen sus propios protocolos de comunicación como USB (*Universal Serial Bus*), GPIB (*General Purpose Interface Bus*) y RS232.

Como la principal tarea a realizarse por el sistema, es la medición de la dosis en un campo de radiación, se ha utilizado como detector un electrómetro integrado con una cámara de ionización, esta última se instala en el mecanismo de transporte para exponerla a las radiaciones. La señal medida es transmitida mediante un dispositivo GPIB al sistema integrado.

Para poder realizar las correcciones previstas en los protocolos de cálculo de dosis, se adiciona a este sistema un equipo de medición de temperatura, humedad y presión atmosférica, el cual transmite al sistema dichas lecturas mediante un protocolo de comunicación RS232 y se integra al computador a través de un cable RS232 a USB.

Para asegurar que el sistema esté funcionando adecuadamente se ha integrado una cámara Web conectada a través del puerto USB, que permite observar la posición y monitorear el normal desarrollo de las mediciones que se realizan. La conexión entre los elementos del sistema se ilustra en la figura 5. Todas las señales utilizadas se procesan de forma central en un computador personal con el sistema operativo Windows por medio de una plataforma de instrumentación virtual.

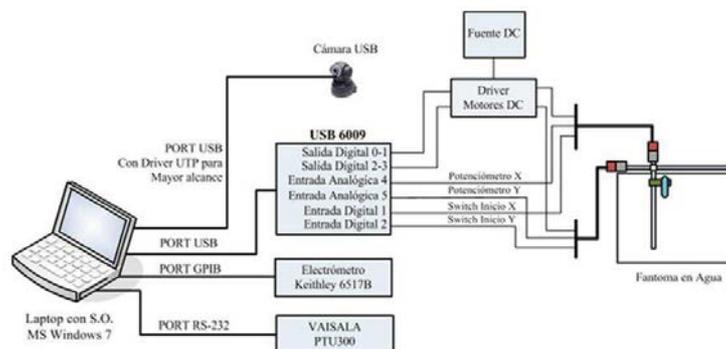


FIG. 5. Diagrama total del sistema

TABLA.1: DISPOSITIVOS INTEGRADOS EN EL SISTEMA

| Categoría                     | Elementos  |
|-------------------------------|--|
| Controlador principal         | Computador personal.<br>Software de instrumentación virtual.   |
| Estructura de posicionamiento | Fantoma.<br>Motores de corriente directa.<br>Cajas reductoras.<br>Potenciómetros de alta precisión.  |
| Control de motores            | Fuente de voltaje de corriente directa.<br>Módulo de adquisición de datos, NI-6009.<br>Circuito impreso para control de motores.   |
| Dispositivos                  | Instrumento de medición de presión, humedad y temperatura, con comunicación RS232.<br>Cámara de ionización y electrómetro, con comunicación GPIB.<br>Cámara de video con comunicación USB. |
| Adaptadores                   | USB, GPIB.<br>USB, RS232<br>USB , UTP  |

## 5. INTERFAZ DE CONTROL DEL FANTOMA

La interfaz de control se desarrolló en la plataforma de instrumentación virtual Labview, los comandos para la manipulación del sistema son ejecutados desde controles disponibles en la pantalla de visualización de la interfaz con el usuario (figura 6). En el panel izquierdo de esta interfaz se pueden seleccionar las ventanas de configuración, modo manual, centrar ejes, escáner automático y reportes. Al momento de iniciar el programa y durante todo el proceso de ejecución se obtiene la imagen de la cámara USB y se reciben, a intervalos planificados, los datos del equipo de adquisición de temperatura, humedad y presión.

En la ventana de configuración se puede realizar la modificación de los siguientes parámetros:

- Compensación de los niveles de voltaje de los potenciómetros.
- Canales digitales de entrada y salida.
- Canales analógicos de entrada.
- Período y ancho de nivel alto del pulso.
- Puerto serie utilizado para conectividad con el dispositivo de temperatura, humedad y presión.
- Puerto GPIB para conectividad con el electrómetro.



FIG. 6. Pantalla de visualización de comandos para el sistema

Para llevar el detector a la posición inicial de los ejes de desplazamiento (figura 7) se alimentan los motores con los voltajes necesarios para alcanzar los sensores de tope, y posteriormente se brinda acceso al usuario para que pueda seleccionar el modo de medición:

- **Manual.**- en este modo se miden las dosis en posiciones determinadas por el usuario.
- **Automático.**- en este modo se miden las dosis en un área que el usuario debe ingresar, así mismo, inicialmente el sistema posicionará cada eje en su centro.

Al final de la ejecución del programa se genera un reporte de medición, dicho reporte está implementado en una hoja de cálculo; los datos que se generan y almacenan por punto de medición son: hora, coordenada (x,y), dosis, temperatura, humedad y presión.

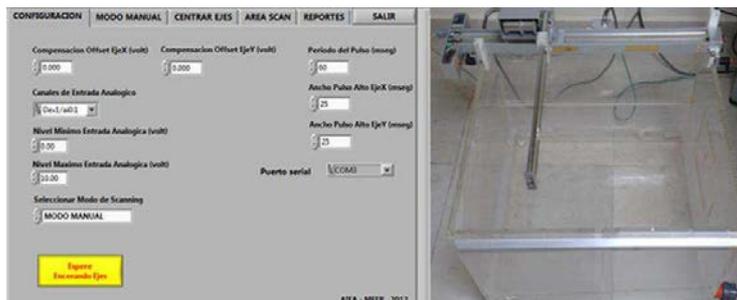


FIG. 7. Proceso para llevar a la posición de inicio

## 6. CONCLUSIONES

- El prototipo permitirá el análisis de campos de los haces, con objetivos de calibración.
- El programa desarrollado para el control de motores de corriente directa (DC) emplea un método de ajuste a la posición deseada con adecuada precisión y rapidez, el cual puede ser utilizado en otro tipo de aplicaciones de control de motores DC.
- Se cumplieron los objetivos de la automatización, obteniéndose precisión para posicionarse en un determinado punto de coordenadas (x,y) de +/- 0.25mm.
- El sistema logra generar los reportes con datos de tiempo, dosis, temperatura, presión, humedad y punto de coordenadas. Se prevé desarrollar un programa adicional para el análisis y procesamiento de las mediciones, y que permita obtener las curvas de Isodosis. Para alcanzar este objetivo sería conveniente disponer de una herramienta básica ya desarrollada con una metodología de cálculo conocida, que pueda utilizarse en los Laboratorios de Calibración de Equipos de Radioterapia.

## REFERENCIAS

- [1] BOYLESTAD, R., NASHELKY, L. Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. México: Prentice Hall (2009).
- [2] Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica. Reglamento de Seguridad Radiológica. Quito: Presidencia de la República del Ecuador (1979).
- [3] DOLNICAR, J. Capacitación para el uso de la instrumentación nuclear. Usos no energéticos de la tecnología nuclear, 10 (2000).
- [4] FLAKUS, F. N. Detección y medición de las radiaciones ionizantes: historia sucinta, OIEA Boletín, 31-36 (1995).
- [5] KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurement, Michigan, Wiley (2000).
- [6] SCAN. Curso Básico de Protección Radiológica. Quito: Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (CEEA) (2002).
- [7] Seguridad Industrial de Grimaldi-Simonds 2da Edición; pág. 341
- [8] SENPLADES. Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017: Construyendo un Estado Pluricultural e Intercultural. Quito: República del Ecuador (2013).
- [9] TSOULFANIDIS, N. Measurement and Detection of Radiation. EEUU: Taylor & Francis (1995).

# APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE SOFTWARE EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UNA LIOFILIZADORA

E. Gaytán G.<sup>1(k)</sup>, J. M. Gutiérrez R.<sup>2</sup>, G. Desales G.<sup>1</sup>, J. I. Tendilla P.<sup>1</sup>, T. Rivero G.<sup>1</sup>, E. Garza V.<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), México*

<sup>2)</sup> *Universidad del Valle de México*

*Mexico*

## Resumen:

Se presenta la versión 2.00 de un sistema de adquisición de datos y control desarrollado para una liofilizadora adquirida en los años 80. Una primera versión desarrollada en el 2001 modernizó el control de temperatura de la liofilizadora y se implementó la adquisición de las señales de vacío y de temperatura y su visualización gráfica. La segunda versión cuenta con cuatro subsistemas: Control de Encendido, Medición de Parámetros, Control del Proceso de liofilización y Experimentación para nuevos perfiles. Durante el desarrollo del sistema se aplicó la metodología de verificación y validación de software desarrollada en el proyecto RLA1011, y las acciones realizadas se documentaron en veintinueve registros

## 1. INTRODUCCIÓN

La liofilizadora se emplea para eliminar el agua de reactivos empleados como equipos reactivos. Esta liofilizadora fue adquirida en los años 80 y tras muchos años de uso algunos de sus componentes dejaron de funcionar, lo que hizo necesario renovar su sistema de control de temperatura y visualización de gráficas de las lecturas de vacío y temperatura. Para resolver este problema en el año 2001 se instaló la primera versión del sistema, la cual se desarrolló empleando el lenguaje de programación gráfica LabVIEW y contó con dos subsistemas. El primero realizaba la adquisición de una señal de vacío y 6 señales de estado y control de la Temperatura por medio de tres funciones principales: a) adquisición de datos, b) adquisición de datos y control y c) comunicación a través de la red local para transmisión de los datos adquiridos (programa servidor). El segundo subsistema (programa cliente) permite la visualización de los datos adquiridos y transmitidos a través de la red.

Al instalar la versión 2.00, la cual se describe en las secciones posteriores, el sistema de la primera versión funcionaba correctamente. Esta segunda versión se realizó con la finalidad de reducir el número de entradas de personal al laboratorio estéril donde se encuentra la liofilizadora, y ha permitido mejorar la calidad en la producción de equipos reactivos para su uso en la medicina nuclear. Las funciones de control que realiza esta nueva versión son: encendido de la liofilizadora, encendido del calentador, encendido de las bombas de vacío circular e hidráulica, control del selector del compresor de refrigeración, control del selector de refrigeración y control de la temperatura en el interior de la cámara. El sistema adquiere señales de temperatura del interior de la cámara (12 termopares), vacío de la liofilizadora, presión del agua y detección de energía eléctrica.

---

<sup>k</sup> Contacto para correspondencia, email: [elvira.gaytan@inin.gob.mx](mailto:elvira.gaytan@inin.gob.mx)

## 2. MODERNIZACIÓN DE LA LIOFILIZADORA

En la modernización de la liofilizadora se emplearon los módulos ADAM (ver figura 1) para la comunicación con el PC, el control y la adquisición de datos. El sistema se programó con el lenguaje LabVIEW de National Instruments, aplicando las Buenas Prácticas recomendadas por el suministrador para la programación con este lenguaje.

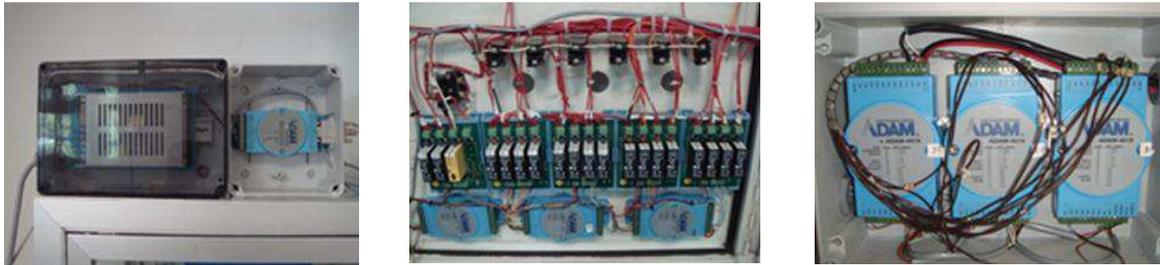


FIG. 1. Elementos del Hardware usado en la actualización de la liofilizadora.

### 2.1. Interfaces del sistema

#### 2.1.1 Inicio del sistema

Una pantalla inicial anuncia al usuario el sistema de adquisición de datos y control de la liofilizadora durante tres segundos.

#### 2.1.2 Contraseña del Usuario

El operador necesita acceder al sistema mediante la introducción de una credencial y su contraseña, la cual puede ser modificada cuando es necesario. La Figura 2 ilustra las opciones disponibles para estas funciones.



a) Tipo de usuario



b) Ingreso



c) cambio de contraseña

FIG. 2. Funcionalidades para acceso y cambio de credenciales.

### 2.1.3. Selección de Subsistemas

Al introducir la contraseña correcta, se accede a las opciones mostradas en la Figura 3 a partir de un menú para la selección de los subsistemas disponibles para el control y adquisición de datos de la liofilizadora. Los subsistemas disponibles son ilustrados en las figs. 3 - 6.

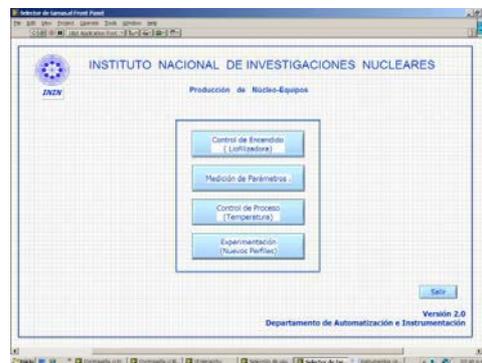


FIG. 3. Menú de selección de subsistemas.

**Control de encendido.** A través del subsistema *Control de encendido* se realiza el encendido y apagado de un grupo de controles siguiendo las recomendaciones del fabricante [1]: interruptor de la liofilizadora, bomba de vacío, bomba hidráulica y bomba circular, calentador, modo de control, compresor de refrigeración y refrigeración. Con este subsistema se realiza también la medición de presión del agua, vacío de la liofilizadora y la notificación de energía eléctrica en el sistema. La figura 4 presenta la ventana del control de encendido de la liofilizadora (interfaz del usuario) y la ventana de programación.

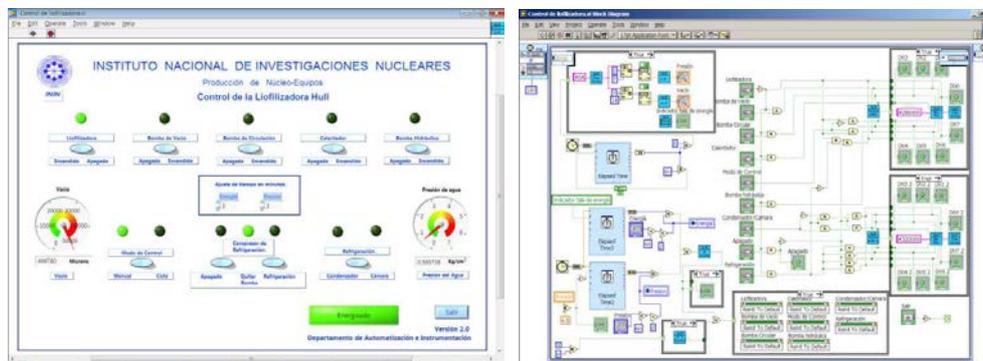


FIG. 4. Ventana para el control de encendido de la liofilizadora y su programación.

**Medición de parámetros.** Este subsistema muestra las lecturas de temperatura, vacío y presión (figura 5). La gráfica de cada termopar se obtiene al especificar el nombre del indicador del termopar requerido. Un ejemplo se muestra en la Figura 6.



FIG. 5. Ventana que muestra los parámetros de temperatura, vacío y presión.

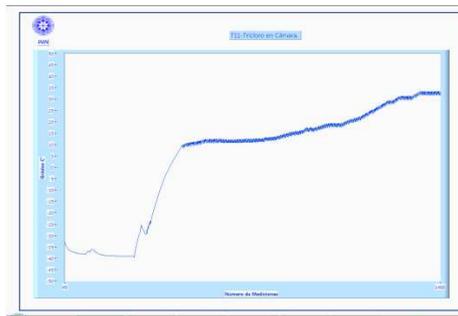


FIG. 6. Gráfica del funcionamiento del termopar 11.

**Control del proceso de Liofilización.** El subsistema *Control de proceso* consta de indicadores de temperatura, de vacío y de presión del agua, los cuales cumplen funciones de monitoreo de forma similar al subsistema *Medición*. La función principal de este subsistema, es el control de temperatura durante el proceso de liofilización, empleando para ello un perfil proporcionado por los usuarios. Las lecturas de registro de los 12 termopares, así como la fecha y la hora de adquisición de los valores, se guardan en un archivo para consultas posteriores. La Figura 7 ilustra la visualización y acceso a estos controles



FIG. 7. Ventana del control del proceso de liofilización.

**Experimentación para la obtención de nuevos perfiles.** La función principal de este subsistema es controlar la temperatura de la liofilizadora a través de los controles de encendido del calentador y refrigerador, contenidos en la ventana del subsistema mostrado en la figura 8 (izquierda). Durante el proceso de experimentación para el establecimiento de nuevos perfiles de liofilización, los datos adquiridos se guardan en un arreglo para posteriormente ser utilizado en el proceso de liofilización del

producto. La figura 8 (derecha) muestra el perfil primario, guardado a través del programa y otros cinco evaluados para su perfeccionamiento o para la obtención de nuevos productos.

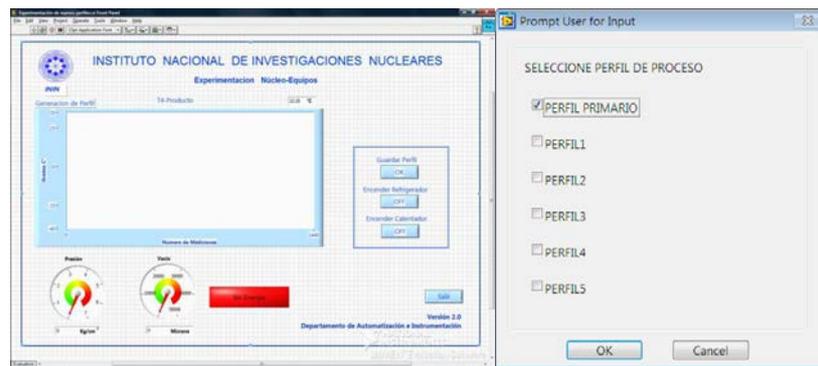


FIG. 8. Perfiles disponibles para experimentación y ventana para obtener un nuevo perfil.

**Alertas del sistema.** La Figura 9 muestra diferentes alertas del sistema cuando se detectan fallas de energía o de suministro de agua en la liofilizadora.



FIG. 9. Alertas del sistema.

### 3. TÉCNICA APLICADA EN EL DESARROLLO

En el desarrollo del software para la adquisición de datos y control de la liofilizadora, se empleó la Metodología de Verificación y Validación de Software (MVVS) [2], La MVVS cumple con los requisitos de los estándares IEEE, ISO e IEC para desarrollo de software, y es aplicada en las etapas que forman el ciclo de vida del software: configuración del software, especificación de requerimientos, diseño, desarrollo e integración del software e integración y entrega del sistema. La verificación se realiza para determinar si los productos de cada etapa satisfacen las condiciones impuestas. La validación se aplica al sistema o producto terminado para determinar si éste satisface los requerimientos especificados. En la adquisición de datos y control de la liofilizadora se elaboraron un total de veintinueve documentos, los cuales se citan a continuación:

- 3.1 Organigrama del sistema de adquisición de datos y control de la Liofilizadora, en base al Plan de Garantía de Calidad de Software [3].
- 3.2 Especificación de Requerimientos de Software (ERS). Se analizaron los requerimientos del sistema y se elaboró la (ERS), de tal forma que los requerimientos fuesen verificados y validados, de acuerdo al procedimiento [4].

- 3.3 Diseño y Desarrollo de Software (DDS), se desarrollaron los documentos de diseño y desarrollo del software en base a los requerimientos especificados y siguiendo las instrucciones del procedimiento [5].
- 3.4 Manual del Usuario (MU), se elaboró tomando como base el procedimiento [6] con el fin de proporcionar a los operadores del sistema el conocimiento necesario para manejo del sistema. Con el Manual del Usuario se impartió el entrenamiento a los usuarios, para uso del nuevo sistema.
- 3.5 Los programas de verificación y pruebas del sistema, los registros de verificación de software y las instrucciones y registros para pruebas de la contraseña de usuario y de los subsistemas desarrollados, así como el reporte de verificación y validación del software se efectuaron en base al Plan de Verificación y Validación del Software [7].
- 3.6 Para la identificación, control, resguardo e información de los elementos de configuración del sistema se empleó el Plan de Administración de la Configuración del Software [8]. Las figuras 10 y 11, muestran el registro de los elementos de configuración del sistema (Software, Hardware y documentos).

|  <b>REGISTRO DE ELEMENTOS DE CONFIGURACIÓN</b><br>Metodología de Verificación y Validación de Software |                   |                                    |
|---|-------------------|------------------------------------|
| Proyecto o Servicio: <b>SISTEMA "AUTOMATIZACIÓN DE LA LIOFILIZADORA"</b><br>(1) Versión: 2.0  |                   | Registro No.<br><b>R. AU/MR-10</b> |
| (2) Nombre  | (3) Versión       | (4) Resguardo Medio/ubicación      |
| <b>Software:</b><br>1. Sistema ALH (Instalación)<br>2. Driver Módulos ADAM<br>3. Sistema ALH (Código fuente)  | 2.0<br>2.0<br>2.0 | CD 1 / CD 2<br>CD 1 / CD 2<br>CD 2 |
| Se incluye anexos No <input checked="" type="checkbox"/> . Si <input type="checkbox"/> No. De Hojas _____   |                   |                                    |
| <b>Hardware</b><br><br><b>VER ANEXO I</b>   |                   |                                    |
| Se incluye anexos No <input type="checkbox"/> . Si <input checked="" type="checkbox"/> No. De Hojas 1   |                   |                                    |
| <b>Documentos</b><br><br><b>VER ANEXO II</b>  |                   |                                    |
| Se incluye anexos No <input type="checkbox"/> . Si <input checked="" type="checkbox"/> No. De Hojas 2   |                   |                                    |
| (5) Fecha: _____ Firma del Responsable del proyecto: _____  |                   |                                    |

FIG. 10. Registro de elementos de configuración del sistema (Software).



REGISTRO DE ELEMENTOS DE CONFIGURACIÓN  
Metodología de Verificación y Validación de Software

ANEXO I

Hardware

| Cantidad | Descripción   | Modelo          |
|----------|---|-----------------|
| 5        | Módulos marca <b>Advantech</b>                            | ADAM-3864       |
| 1        | Módulo marca <b>Advantech</b>                             | ADAM-4015       |
| 3        | Módulos marca <b>Advantech</b>                            | ADAM-4050       |
| 1        | Módulo marca <b>Advantech</b>                             | ADAM-4520       |
| 1        | Fuente de alimentación de 24 Volts marca <b>Advantech</b> | CS050<br>SERIES |
| 12       | Termopares  | Tipo 1          |
| 1        | Sensor de Presión marca Motorola                          | MPX5700         |
| 1        | Transductor de Vacío Marca MKS                            | 622A            |
| 1        | Computadora Personal con procesador Intel R(Celeron)      | Blue 5058       |
| 1        | Monitor marca <b>Eaton</b>                                | 17105H          |
|          |   |                 |
|          |   |                 |
|          |   |                 |
|          |   |                 |
|          |   |                 |
|          |   |                 |
|          |   |                 |



REGISTRO DE ELEMENTOS DE CONFIGURACIÓN  
Metodología de Verificación y Validación de Software

ANEXO II  
Documentos

| No. | (2) Nombre  | (3) Versión<br>Revision | (4) Requisitos<br>Medio/ubicación |
|-----|---|-------------------------|-----------------------------------|
| 01  | Organigrama del Sistema ALH   | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 02  | Especificación de Requerimientos de Software (ERS) IT, AU-0907.             | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 03  | Diseño del Software IT, AU-MR-01.   | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 04  | Desarrollo del Software IT, AU-MR-02.                                       | Rev. 0                  | CD2 / Carpeta 1                   |
| 05  | Manual del Usuario MU, AU-MR-01.  | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 06  | Reporte de Verificación y Validación IT, AU-MR-03.                          | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 07  | Programa de Verificación PR, V, AU-MR-01                                    | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 08  | Registro de Verificación "Verificación de la ERS" R, AU-MR-01               | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 09  | Registro de Verificación "Verificación del DOS" R, AU-MR-02                 | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 10  | Registro de Verificación "Verificación de la ACS" R, AU-MR-11.              | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 11  | Registro de Verificación "Verificación de la EPS" R, AU-MR-12.              | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 12  | Registro de Elementos de Configuración del Sistema "ALH", R, AU-MR-10       | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 13  | Programa de Pruebas PR, PB, AU-MR-01.                                       | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 14  | Instrucción de Prueba "Contraseña del Usuario", I, AU-MR-01.                | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 15  | Instrucción de Prueba "Control de Encendido", I, AU-MR-02.                  | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 16  | Instrucción de Prueba "Medición de Parámetros", I, AU-MR-03.                | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 17  | Instrucción de Prueba "Control de Proceso", I, AU-MR-04.                    | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 18  | Instrucción de Prueba "Experimentación", I, AU-MR-05.                       | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 19  | Instrucción de Prueba "Integración del Sistema", I, AU-MR-06.               | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 20  | Instrucción "Instalación del Sistema", I, AU-MR-07.                         | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 21  | Instrucción de Prueba "Pruebas de la Instalación del Sistema", I, AU-MR-08. | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 22  | Registro de prueba "Contraseña del Usuario" R, AU-MR-03                     | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 23  | Registro de prueba "Control de Encendido" R, AU-MR-04                       | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 24  | Registro de prueba "Medición de Parámetros" R, AU-MR-05                     | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 25  | Registro de prueba "Control de Proceso" R, AU-MR-06                         | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 26  | Registro de prueba "Experimentación" R, AU-MR-07                            | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 27  | Registro de prueba "Integración del Sistema" R, AU-MR-08                    | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 28  | Registro de prueba "Instalación del Sistema" R, AU-MR-09                    | Rev. 0                  | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 29  | Validación de software  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 30  | Manual de uso de los módulos ADAM   |                         | CD 1/ CD2                         |
| 31  | Manual del Transductor de Vacío Baratron 622A Marca MKS                     |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 32  | Folleto de información de uso del Sensor de Presión MPX5700                 |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 33  | Hoja de datos del módulo ADAM-3864  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 34  | Hoja de datos del módulo ADAM-4015  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 35  | Hoja de datos del módulo ADAM-4050  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 36  | Hoja de datos del módulo ADAM-4520  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |
| 37  | Hoja de datos de la Fuente CS050  |                         | CD 1/ CD2 / Carpeta 1             |

FIG. 11. Registro de elementos de configuración del sistema (Hardware y Documentos)

3.7 Validación de Software. El sistema realizado fue validado y cumple con la Norma Oficial Mexicana “Buenas prácticas de fabricación para establecimientos de la industria químico farmacéutica dedicados a la fabricación de medicamentos” [9]. Para la validación se aplicó también el Plan de Verificación y Validación del software.

#### 4. VENTAJAS DEL SISTEMA

Con el sistema “Adquisición de datos y control de la liofilizadora, versión 2.00”, se ha simplificado el trabajo de los operadores. Un grupo de operaciones, tales como el encendido de la liofilizadora, el encendido del calentador, el encendido de las bombas de vacío, circular e hidráulica, así como el modo de control, el selector de refrigeración, y el compresor de refrigeración, pueden realizarse ahora desde un PC. Esta posibilidad permite limitar las entradas al cuarto estéril que contiene a la liofilizadora, evitando la contaminación que el operador pudiese llevar del exterior. Con la medición de varios parámetros de la liofilizadora (vacío, presión del agua, detección de energía eléctrica y temperatura en el interior de la cámara y en diferentes sitios de la liofilizadora) se puede monitorear que estos cumplan con los valores requeridos para el control de la calidad del proceso de liofilización y de los productos finales. El almacenamiento de los datos proporcionados por los termopares y el perfil de cambio, permiten posteriormente analizar el comportamiento del sistema durante el proceso de liofilización. El subsistema “Experimentación (Nuevos Perfiles)”, permite a los investigadores encargados del desarrollo de nuevos productos obtener el perfil adecuado a los equipo-reactivos que requieren ser liofilizados y posteriormente emplearlo con este sistema. Actualmente se utiliza otro perfil, obtenido a través del subsistema experimentación, que mejora el proceso de liofilización, éste se presenta en la figura 14.

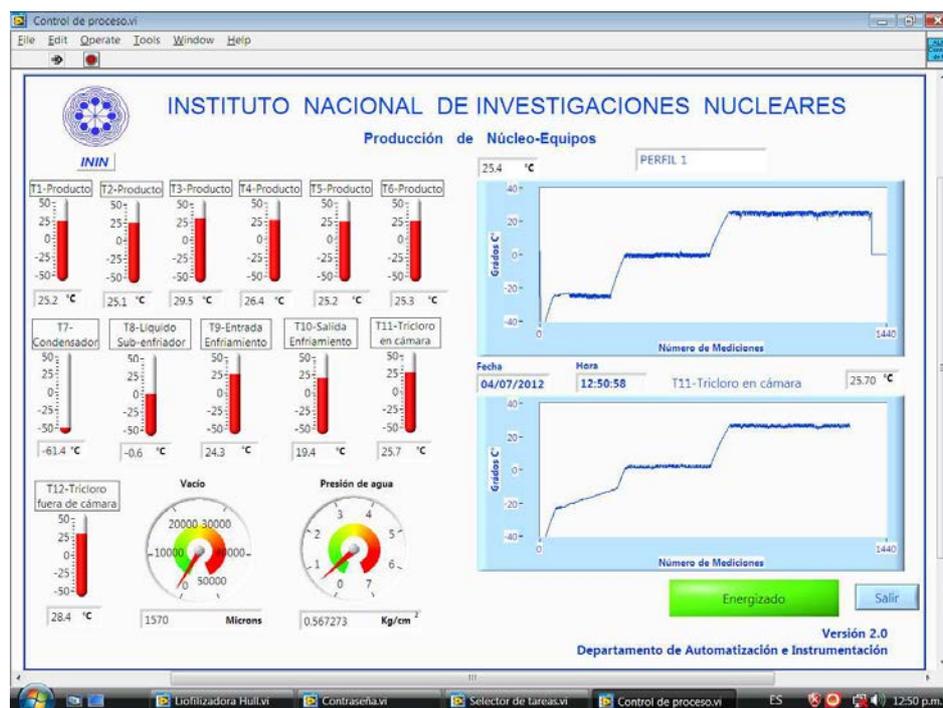


FIG. 12. Perfil utilizado actualmente en la producción de equipos reactivos.

## 5. CALIDAD EN EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema fue probado en el laboratorio antes de ser instalado en la planta de producción y estuvo en funcionamiento dos meses antes de ser aceptado, lo que permitió probar cada uno de los elementos de control y de medición que lo integran. Las pruebas permitieron también verificar la protección de la liofilizadora, ya que al detectarse fallas en el suministro de energía y presión del agua, se suspende el funcionamiento de la liofilizadora, después del tiempo de espera programado para estos casos. La garantía de suministro continuo de energía asegura la calidad del producto, al realizarse el proceso de manera ininterrumpida. Con la detección de fallas en la presión del flujo de agua se protege la liofilizadora. La figura 13 presenta una pantalla correspondiente al caso en el cual se suspendió el funcionamiento de la liofilizadora debido a una falla en la presión de agua, lo cual impidió continuar el proceso.

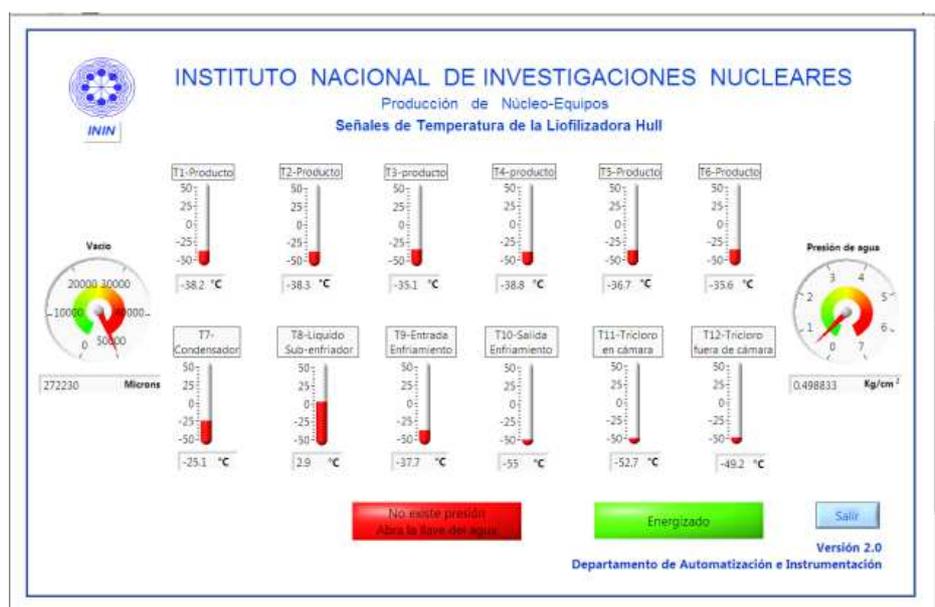


FIG. 13. Falla en el suministro de agua.

## 6. CONCLUSIONES

El aplicar la metodología de verificación y validación de software ha permitido que el sistema diseñado funcione ininterrumpidamente, dado que no se requieren cambios en el sistema por errores de programación. El almacenamiento de datos en archivos facilita su utilización para la detección de fallas normales de la liofilizadora derivados de los años de uso. Con la realización de este proyecto y el anterior, se ha logrado extender la vida útil de la liofilizadora y apoyar al sector de la salud con el abasto de –equipos reactivos producidos en el ININ. Con este sistema, desde su instalación, se han producido varios lotes de los siguientes productos: BZ MAGIII, DMSA III, DTPA, ECD, HYNIC, MAA, MDP, MEBROFENIN, PIROFOSFATO y UBI.

## REFERENCIAS

- [1] GAYTÁN, E., DESALES, G., TENDILLA, I., GARZA, E. Instrucción “Manejo de la Liofilizadora”, revisión. 3, I.MR (PRD-15) ININ, Mexico (2010).
- [2] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Metodología de Verificación y Validación de Software. MVVS-ARCAL-OIEA (2011)
- [3] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Plan de Garantía de Calidad de Software. PGCS-ARCAL-OIEA (2010).
- [4] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Especificación de Requerimientos de Software. ERS-ARCAL-OIEA (2010).
- [5] GAYTÁN, E., AGUILA A., ANDRADE E., VERRASTRO, C., Diseño y Desarrollo de Software. DDS-ARCAL-OIEA (2010).
- [6] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Documentación del Software para el Usuario. DSU-ARCAL-OIEA (2010).
- [7] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Plan de Verificación y Validación de Software. PVVS-ARCAL-OIEA (2010).
- [8] GAYTÁN, E., ANDRADE E., Plan de Administración de la Configuración del Software. PACS-ARCAL-OIEA (2010).
- [9] “Buenas prácticas de fabricación para establecimientos de la industria químico farmacéutica dedicados a la fabricación de medicamentos”, NOM-059-SSA1-2006.

# IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE MONITOREO PARA MEDIR NIVEL DE TASA DE DOSIS DE RADIACIÓN IONIZANTE EN ÁREA DE TRABAJO CON DETECTOR GM Y LABVIEW

Richard R. Florentín Cano<sup>1</sup>), Gerardo G. Gómez<sup>2</sup>, Silvia T. Leiva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) *Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) - Dirección General de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad Nacional de Asunción*

<sup>2</sup>) *Facultad Politécnica - Universidad Nacional de Asunción (UNA)*

*Paraguay*

## **Resumen:**

En este trabajo se presenta el resultado obtenido en el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo del nivel de radiación, el cual responde a la necesidad de realizar monitoreo en área de trabajo donde potencialmente puede existir un nivel de radiación elevado con el propósito de prevenir exposiciones innecesarias de los trabajadores ocupacionalmente expuestos. Este sistema permite realizar mediciones de nivel de radiación en unidades de tasa de dosis ( $\mu\text{Sv/h}$ ) por medio de un detector Geiger Muller (GM) instalado en el área de trabajo el cual se comunica con una PC ubicada en oficina externa a través del puerto USB, en la PC se registra en tiempo real en forma gráfico y en una tabla los registros numéricos. El mencionado sistema de adquisición de datos está desarrollado bajo la plataforma LabVIEW.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el periodo de 2012-2013, La CNEA a través del Laboratorio de Instrumentación Nuclear y conjuntamente con la Facultad Politécnica de la UNA ha participado del proyecto ARCAL LXXIII RLA 1/011 denominado “Apoyo a la Automatización de Sistemas y Procesos en Instalaciones Nucleares”. En el marco del mencionado proyecto se desarrolló un sistema de monitoreo de nivel de radiación en tasa de dosis en área de trabajo, con el objetivo de cubrir la necesidad de los operadores del Laboratorio de Gestión de Fuentes en Desuso de la CNEA, en donde se identificó la necesidad de monitorear nivel de radiación con el propósito de asegurar el control de nivel de radiación con miras a protección radiológica y contar con un registro de niveles de radiación que se pueda disponer como base de datos.

El desarrollo de la interfaz para la implementación del sistema de monitoreo de nivel de radiación en unidad de tasa de dosis, está compuesto por un detector GM con su electrónica asociada que realiza las mediciones de radiación gamma emitidas por las fuentes de radiación, instalado en el área de trabajo y monitoreado desde un PC externo al Laboratorio a través de conexión USB. Las mediciones se realizan en tiempo real y los resultados son registrados en gráficos continuos y almacenados en forma numérica en una tabla.

---

<sup>1</sup> Contacto para correspondencia, email: [florentin\\_77@yahoo.com](mailto:florentin_77@yahoo.com)

## 2. TÉCNICA DE DESARROLLO DE LA INTERFAZ

Para la medición de los niveles de radiación se ha optado por utilizar uno de los métodos más comunes, que es utilizando un detector Geiger Müller. El contador está compuesto por un tubo de Geiger Müller y su electrónica asociada. La técnica de medición consiste básicamente en contar la cantidad de eventos que se generan dentro del tubo y el resultado asociarlo con el nivel de radiación, esto se consigue mediante un algoritmo de calibración que fue desarrollado para tal efecto utilizando LabVIEW.

Para el proyecto se ha utilizado una placa electrónica que se muestra en la Figura 1, que contiene un tubo Geiger Muller, una fuente de alta tensión y el sistema de comunicación serial

Según las especificaciones técnicas del fabricante, la placa envía datos de 1Byte por protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*) por cada evento registrado en el tubo. A partir de estos datos, se puede elegir la unidad de medida a utilizar.

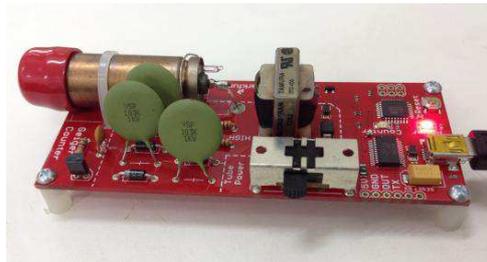


FIG. 1. Contador Geiger Müller Utilizado

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ HOMBRE - MÁQUINA

Para la interfaz se desarrolló una aplicación de software en el entorno de LabVIEW, que gracias a sus herramientas de adquisición de datos permite establecer una comunicación segura con la placa electrónica. LabVIEW además facilita el rápido desarrollo de una interfaz gráfica, en la cual se despliegan los valores registrados, que permite al operador ajustar algunos parámetros. Las Figuras 2 y 3 muestran el aspecto visual de la aplicación de software desarrollado.

El programa desarrollado realiza la función de hacer una lectura en forma continua del puerto serial y contar la cantidad de Bytes que envía la placa electrónica en un período de tiempo determinado. Luego se despliega en un histograma y son registrados en un archivo que contiene los datos relacionados a los valores, la fecha y la hora de la última medición. El sistema también es capaz de medir y mostrar los valores de la medición en tiempo real y activar sistemas de alarmas de forma autónoma.

En la primera versión del sistema desarrollado sólo se desplegaban los valores en conteos por minuto (cpm), pero utilizando la especificación técnica del dispositivo (Gamma Sensitivity Co-60 (cps/mR/HR) = 18) se logró la conversión a unidades de tasas de dosis ( $\mu\text{Sv/h}$ ) aplicando un factor de calibración.

Durante las pruebas realizadas en el Laboratorio se pudo hacer una comparación entre los valores obtenidos con el sistema que se ha desarrollado y los obtenidos con un detector de monitoreo que cuenta con certificado de calibración. Los valores obtenidos en ambos sistemas coincidieron dentro de los intervalos de incertidumbre asociados.

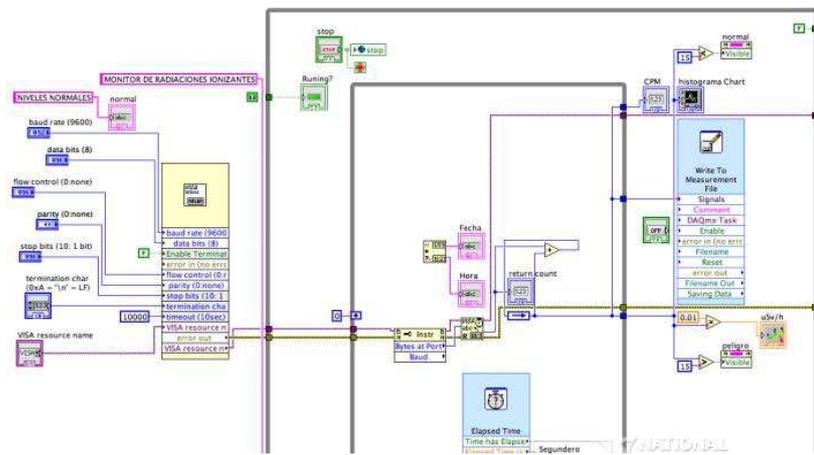


FIG. 2. Código de programa del monitor

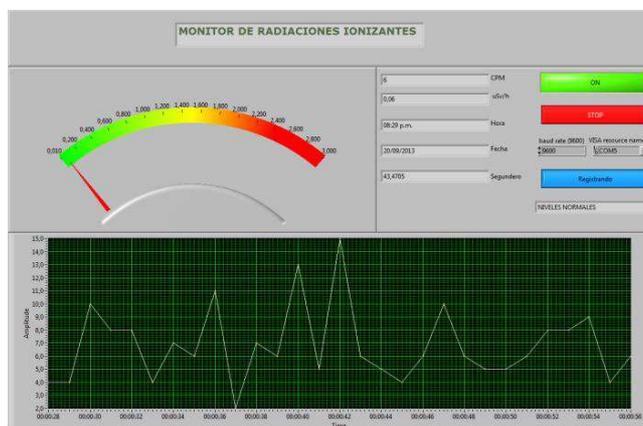
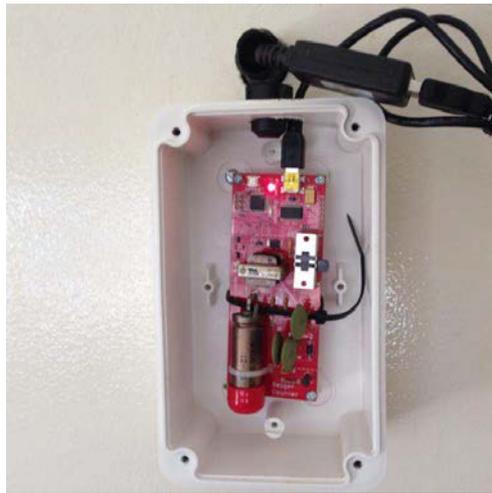


FIG. 3. Interfaz gráfica de usuario

#### 4. UBICACIÓN DEL DETECTOR EN EL LABORATORIO

En las Figuras 4 y 5 se ilustra el montaje e instalación del detector en el Laboratorio de Gestión de Fuentes Radiactiva en Desuso. Como se puede apreciar el detector está alojado en el área de trabajo en una posición cercana a la mesa de trabajo, lugar habitual del operador.



*FIG. 4. Contador Geiger instalado*



*FIG. 5. Laboratorio de almacenamiento de fuentes radiactiva en desuso*

## 6. CONCLUSIÓN

La implementación del sistema de monitoreo de nivel de radiación en unidades de tasa de dosis, ha permitido mejorar la protección radiológica de los trabajadores ocupacionalmente expuestos del Laboratorio de Gestión de Fuentes Radioactivas en Desuso.

Los datos registrados se tendrán disponibles como base de datos para la verificación del nivel de radiación actual, con el propósito de comparar los datos registrados en el futuro.

## REFERENCIAS

- [1] BOSCH, H. E., Metrología de radiaciones ionizantes con detectores gaseosos, Editorial de Belgrano, Buenos Aires, 78 pp (1978).
- [2] KNOLL, G. F., Radiation detection and measurement, 4<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, 860 pp (2010).
- [3] STUMPS, D., Learn LabVIEW 2012 FAST. A primer for automatic data acquisition, SDC publications, <http://www.sdcpublications.com/pdfsamples/978-1-58503-850-3-1.pdf>

# INTEGRACIÓN DE UN ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS Y UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE ESPESOR EN UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DOSIS ABSORBIDA

Juan Carlos Rojas <sup>1</sup>, Carlos Jiménez <sup>1(m)</sup>

Meivis Sánchez <sup>2</sup>, María de los Ángeles Rodríguez <sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *Laboratorio de instrumentación y Electrónica Nuclear (LIEN)*

<sup>2)</sup> *Laboratorio de Dosimetría de altas Dosis (LDAD)*

*Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC),*

*Venezuela*

## Resumen:

Se realizó la integración en un Sistema de Medición de Dosis Absorbida de un espectrofotómetro y de un medidor de densidad, utilizando las tecnologías de Instrumentación Virtual y Micro-controladores. El sistema se introdujo en la instalación industrial de irradiación gamma con fuentes de Co<sup>60</sup> del IVIC (PEGAMMA) con la finalidad de mejorar la validación y control (monitoreo) de la dosimetría rutinaria del proceso de irradiación. Como resultado el proceso de irradiación está en conformidad con el plan de aseguramiento de la garantía de calidad que se está implementando en los irradiadores panorámico multipropósito PEGAMMA. Los instrumentos integrados fueron un Espectrofotómetro (modelo Genesys 20) y un medidor de espesor (modelo S112M) micrométrico, a partir de las lecturas de los cuales se calcula de forma automática la Dosis Absorbida.

## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación denominada IVLAD (Instrumentación Virtual Laboratorio de Altas Dosis) fue desarrollada con el lenguaje gráfico de programación para instrumentación virtual Agilent VEE (Visual Engineering Environment) Pro, versión 9.3 de Agilent Technologies, Inc. El software IVLAD es el Sistema de Medición de Dosis Absorbida para los Irradiadores Industriales Gamma Co<sup>60</sup> IR-216 e IR-236. Para este desarrollo se usaron las tecnologías de Instrumentación Virtual y Microcontroladores, integrando un Espectrofotómetro UV/VIS (Thermo Fisher Scientific Inc., modelo Genesys 20) y un medidor de espesor digital (micrómetro) marca Mitutoyo Absoluto LCD, modelo ID-S112M (543-691 tipo ISO/JIS).

Con el Sistema de Medición desarrollado se fortaleció la capacidad del Laboratorio de Dosimetría de Altas Dosis, en lo que respecta al proceso de medición de Dosis Absorbida en la irradiación industrial de productos. El sistema permitió aumentar la calidad y productividad la medición de la Dosis Absorbida, así como eliminar las dificultades y errores inherentes a la adquisición y la manipulación de los datos manualmente. El almacenamiento de los resultados en formato electrónico permite además su fácil acceso desde el Sistema de Gestión de Irradiadores SGI-1 de la Planta PEGAMMA.

---

<sup>m</sup> Contacto para correspondencia, email: [cjimenez@ivic.gob.ve](mailto:cjimenez@ivic.gob.ve)

## 2. DESCRIPCIÓN SISTEMAS DOSIMÉTRICO Y EL PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Uno de los procedimientos para la medición de altas dosis de radiación gamma se basa en la utilización de polímeros PMMA (Plástico Poli-Metacrilato de Metilo), los cuales son sensibles a la radiación ionizante). En el caso de la planta PEGAMMA se utilizan dosímetros Perspex Red 4034 (Red 4034 corresponde a la formulación de colorante y concentraciones requeridos) y Amber 3042 para monitorear las dosis durante el control y supervisión de rutina de los procesos de radio-esterilización y/o descontaminación de productos biomédicos, cosméticos, hierbas medicinales, alimentos y otros productos. La medición de la Dosis Absorbida en los dosímetros se realiza para evaluar los valores de Dosis logrados durante el control del proceso de Irradiación.

Cuando se expone a radiación ionizante superiores a 1 kGy el polímero Red 4034 (o el Amber 3042) comienza un proceso de oscurecimiento, que es inducido por la radiación y el cual se produce por la formación de una nueva banda de absorción (600 – 700 nm, con máximo en 615 nm). Por consiguiente, la dosis de radiación absorbida [kGy] puede determinarse con una alta precisión a partir de la medición de la Absorbancia inducida por la radiación en la longitud de onda de 640 nm para el dosímetro Red 4034 y de 603 nm o 651 nm para el Amber 3042. Los dosímetros, en forma de rectángulos de 30 mm x 11 mm, se fabrican a partir de hojas de metacrilato color rojo y con código de colorante 4034, y son fabricados en lotes con un espesor de  $3 \pm 0,55$  mm. Los dosímetros son empaquetados en bolsitas selladas hechas de aluminio laminado de poliéster/aluminio/polietileno y cada bolsita está impresa con un código de barras único (figura 1).



FIG. 1. Dosímetros Perspex y Amber utilizados

El uso de los dosímetros basados en el cambios de color en los polímeros PMMA está estandarizado por la norma ISO/ASTM 51276:2002 (E). De una manera general, la evaluación de la dosis a la cual han sido expuestos estos materiales se realiza con la correlación de la Absorbancia (también llamada densidad óptica) Especifica [ $\text{cm}^{-1}$ ] del material y la Dosis Absorbida [kGy]. Por lo general, la Absorbancia [A] del dosímetro se mide a una longitud de onda elegida adecuadamente utilizando un espectrofotómetro. El grosor [mm] se determina con un medidor de espesor micrométrico (micrómetro). Los Dosímetros son usados para el control de los Irradiadores Gamma  $\text{Co}^{60}$  panorámico industriales e Irradiadores Industriales multipropósito. Los irradiadores de la planta PEMAGAMMA son de la marca MDS Nordion, serial IR-216 (modelo JS-9500HD) y serial IR-236.

## 3. BREVE DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS

La Absorbancia se mide de forma cuantitativa utilizando un Espectrofotómetro Ultra-violeta – Visible (UV/VIS, marca Thermo Fisher Scientific Inc., Genesys 20 modelo 4001/4, ver Figura 2). El espectrofotómetro tiene un ancho de ranura espectral de 8nm, un sistema óptico que utiliza una rejilla de difracción (1200 líneas/nm) y permite realizar mediciones en el intervalo a longitudes de onda entre 325 y 1100 nm (establecidas con una exactitud de  $\pm 2,0\text{nm}$ ) en un intervalo fotométrico desde -0,1 hasta 2.5 [A]. Este equipo tiene incorporada una interfaz serial bidireccional con protocolo de

transmisión RS-232C completamente funcional (dúplex completo), la cual permite realizar el control remoto de las funciones de operación desde un Ordenador Personal (PC).



FIG. 2. Espectrofotómetro utilizado

El Espectrofotómetro Genesys 20, cuenta con un conjunto de comandos en código y protocolo ASCII definidos por el fabricante para poder realizar el control vía puerto serial RS-232 desde una PC. El conjunto de comandos realiza las mismas funciones y secuencias de comandos que se pueden seleccionar manualmente desde el teclado del Instrumento. Las funciones incluyen, entre otras: el control de longitud de onda, el control de accesorios, la adquisición de datos y la selección de las lámparas. El conjunto de comandos en código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) se divide en las siguientes categorías:

1. Comandos de control del Instrumento:  
Estos comandos controlan o indican el estado de las funciones básicas del instrumento.
2. Comandos de Utilidades:  
Estos comandos permiten configurar o consultar las funciones de utilidad.
3. Comandos de Comunicación:  
Estos comandos se utilizan para configurar y controlar la comunicación con el instrumento.
4. Órdenes inmediatas:  
Estos comandos funcionan inmediatamente y se implementan con una secuencia de control. La secuencia de control suele representarse como "Ctrl" en los teclados, pero a veces se utilizan en su lugar "Control" o "Ctl", y puede representarse gráficamente como una «punta de flecha hacia arriba» (ASCII 94 o U+2303).

El conjunto de comandos utilizados para la comunicación serial RS-232 son caracteres ASCII, compuestos de un código de tres caracteres, un valor (si aplica) y dos caracteres de fin de comando (fin de línea), el retorno de carro y el salto de línea. En secuencia de escape el retorno de carro es: "\r", abreviado CR, y tiene un valor ASCII 13 decimal (dec) o 0xD hexadecimal (hex), para salto de línea la secuencia de escape es: "\n", abreviado LF o NL, y tiene un valor ASCII 10 dec o 0xA hex. La combinación de ambos es CRLF, es decir el par "\r\n". Los códigos son los mismos sin importar el idioma de operación seleccionado.

El espesor de la placa dosimétrica se mide utilizando un Indicador Digital Digimatic IDC, modelo ID-S112Mde la marca Mitutoyo (ver Figura 3-a). El dispositivo tiene una pantalla con 5-dígitos LCD

(8.5mm de altura) y permite medir espesores de hasta 12.7mm con una resolución de 0.01mm y una incertidumbre de  $\pm 0,003048\text{mm}$ . La fuerza aplicada para realizar la medición es de 1,5 N.



FIG. 3. Medidor de espesor micrométrico (a) e interfaz de transmisión de datos (b)

Para recolectar los datos de lectura del micrómetro ID-S112M se utiliza una interfaz modelo IT-012U, de la marca Mitutoyo. Debido a que la herramienta de entrada utilizada es HIDBP (Human Interface Device Boot Protocol), la interfaz es reconocida automáticamente como un dispositivo USB de teclado HID (las 2 entidades son el "host"-la PC y el "dispositivo"-el micrómetro). Con esta interfaz se obtiene como resultado la implementación de la transferencia de datos de una forma sencilla y amigable.

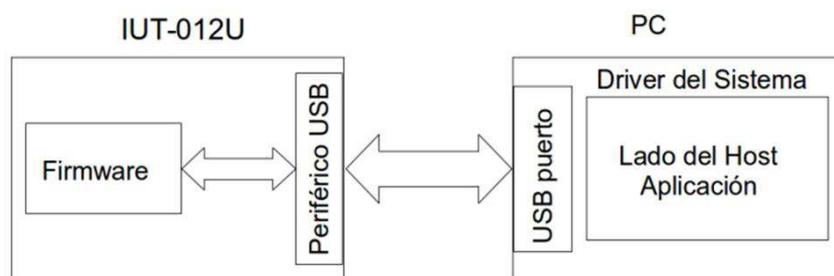


FIG. 4. Esquema de interconexión entre la PC y el adaptador de comunicación con el micrómetro

#### 4. LENGUAJE GRÁFICO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

Para el desarrollo de la aplicación IVLAD (Instrumentación Virtual Laboratorio de Altas Dosis) se seleccionó y utilizó el entorno de desarrollo y Lenguaje de programación gráfica Agilent VEE Pro 9.3 (Visual Engineering Environment). La selección se fundamentó en que los desarrolladores y los usuarios finales u operadores estaban capacitados en lenguaje de programación Agilent VEE Pro y el IVIC contaba con una licencia educativa para 30 máquinas, teniendo experiencia de uso de este lenguaje de programación desde el año 1995. Agilent VEE Pro es un lenguaje de programación orientado a objetos con interfaz gráfica de usuario, que es especialmente adecuado para el desarrollo de aplicaciones para medición, sistemas de medición, adquisición de datos, control y creación de instrumentos virtuales. Otras funciones integradas cerca de 1000 para análisis y visualización de MATLAB®, las más populares de la MathWorks para procesamiento de señal (Processing Toolbox) y otras 1800 funciones más de MATLAB® disponibles a través de la secuencia de comandos (Script) de MATLAB.

El software IVLAD se diseñó con una alta flexibilidad. Una de las líneas fundamentales de diseño fue el uso de la técnica de Hardware Abstraction Layer (HAL) o Abstracciones de Hardware de E/S (Entrada/Salida), con un conjunto de rutinas o subrutinas de software que emulan algunos detalles específicos de los instrumentos, para adaptarse a sus requisitos únicos y optimizar el rendimiento del sistema. Esta técnica aísla la aplicación del hardware o instrumento, dando así al programa el acceso directo a los recursos de hardware sin identificarse con un equipo específicamente. La técnica de Abstracción de Hardware es de vital importancia para disminuir la obsolescencia del hardware y software, para minimizar el tiempo y los costes asociados a la migración o actualización de los

sistemas de medición o instrumentos virtuales. El HAL tiene tres grandes categorías: el estándar de la industria, el definido por el fabricante, y el definido por el usuario. En las Figuras 5 a y b se muestran los diagramas de flujos correspondientes a las subrutinas de Abstracciones de Hardware de E/S para el espectrofotómetro Genesys 20 y el micrómetro ID-S112M (con su interfaz IT-012U) respectivamente.

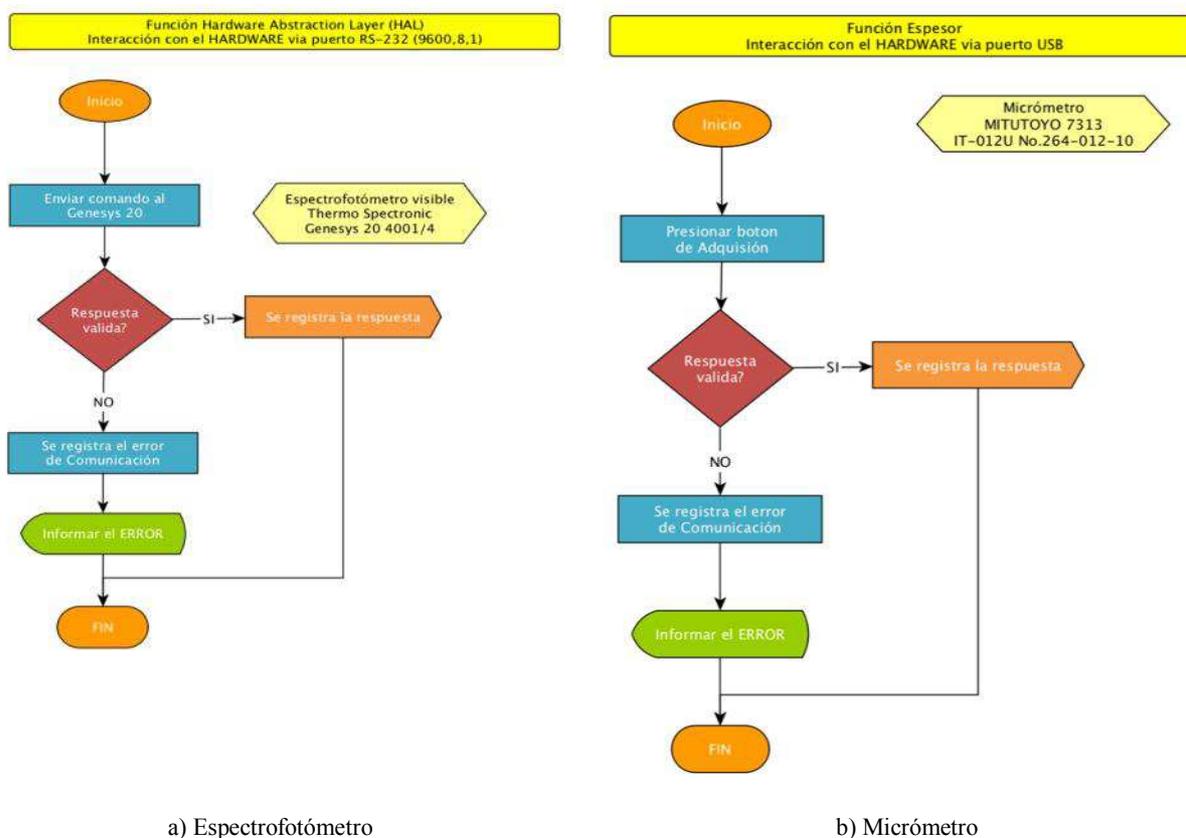


FIG. 5. Diagramas de flujo de las subrutinas HAL para cada uno de los equipos

## 5. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

Este proyecto se desarrolló aplicando la Metodología para Validación y Verificación de Software (MVVS) de software creada en el proyecto OIEA-ARCAL RLA4022, la cual fue revisada, corregida y ampliada en el proyecto OIEA-ARCAL RLA1011. Como marco de desarrollo de software se utilizaron dos de los procesos-tipo más conocidos y difundidos en el ámbito mundial de los programadores: el Proceso Unificado Racional (RUP - Rational Unified Process) y el proceso ágil de desarrollo de software o programación extrema (XP - eXtreme Programming).

El ciclo de vida RUP es una implementación del desarrollo en espiral y su marco de desarrollo divide en cuatro fases el desarrollo del programa:

- Inicio. Se determina la visión del proyecto.
- Elaboración. Se determina la arquitectura óptima.
- Construcción. Se obtiene la capacidad operacional inicial.
- Transición. Se obtiene la liberación del proyecto.

La Programación Extrema (XP) consiste en un desarrollo rápido o extremo, cuya particularidad es tener como parte del equipo al usuario final, pues es uno de los requisitos para llegar al éxito del proyecto. El marco de desarrollo XP se basa en:

- Pruebas Unitarias: pruebas realizadas a los principales procesos, de tal manera que adelantándose en algo hacia el futuro, se puedan hacer pruebas de las fallas que pudieran ocurrir.
- Re-fabricación o refactorización: se basa en la reutilización de código, para lo cual se crean patrones o modelos estándares, siendo más flexible éste a los cambios.
- Programación en pares: una particularidad de esta metodología es que propone la programación en pares, la cual consiste en que dos desarrolladores participen en un proyecto en una misma estación de trabajo. Cada miembro lleva a cabo la acción que el otro no está haciendo en ese momento.

La XP propone: ir de menos a más añadiendo funcionalidad con retroalimentación continua; convertir el manejo de los cambios en parte sustantiva del proceso; el costo del cambio no dependerá de la fase o etapa; no se introducirán funcionalidades antes de que sean necesarias; y se considerará al cliente o al usuario como miembro del equipo.

## 6. INTERCONEXIÓN, PERIFÉRICOS Y COMUNICACIÓN

El sistema de medición (Figura 6) consta de un PC, el espectrofotómetro Genesys 20 (conectado vía RS-232) y el micrómetro ID-S112M con su interfaz IT-012U. La conexión del espectrofotómetro con la PC es vía un puerto serial RS-232-C con conector de 9-terminales (formato DCE).

Los parámetros de la interfaz RS-232 están ajustados con los siguientes valores por defecto: Sistema de codificación: 8 Bits, protocolo para el control de la transferencia ASCII, velocidad de transmisión: 9600 Bits/sec, bits de datos: 8, Paridad: ninguna, 1 bit de parada y un 1 de comienzo.



FIG. 6. Esquema de interconexión

El conjunto de comandos RS-232 del espectrofotómetro Genesys 20 utiliza códigos de tres caracteres, estos códigos son los mismos sin importar el idioma seleccionado, carácter de fin de comando, retorno de carro (0x0D) y line feed (0x0A). La respuesta es el comando más los valores (si hay lectura) y un “OK”, indicando la correcta ejecución del comando o un “ER” en caso de error. Por ejemplo, Leer la longitud de onda actual y luego establecerla en 640 nm implica la siguiente secuencia:

| Operación | Función   | Comando | Valor | Repuesta | Valor | Estatus |
|-----------|---|---------|-------|----------|-------|---------|
| Leer      | Devuelve el valor de la longitud de onda actual (GTO) | GTO     |       |          | 640   | OK      |
| Fijar     | Establece la longitud de onda en el valor "n" (GTO n) | GTO     | 640   | 640      |       | OK      |

El micrómetro requiere que el usuario presione un botón para realizar la lectura del grosor y en ese momento, el valor llega a la computadora de forma similar como si escribiéramos el valor en el teclado numérico y luego presionáramos la tecla Enter (Return).

## 7. PARÁMETROS Y CÁLCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA

Una vez obtenidas las dos magnitudes (la Absorbancia y el espesor) se procede a calcular la Absorbancia Específica [ $\text{cm}^{-1}$ ] dividiendo la lectura de Absorbancia [A] entre el espesor [en cm]. A partir de los valores de la Absorbancia Específica medidos para una serie de dosímetros de referencia se realiza una calibración por interpolación de Absorbancia Específica [ $\text{cm}^{-1}$ ] (eje X, ordenada) versus Dosis Absorbida [kGy] (eje Y, abscisa). Dentro del programa IVLAD se implementó una rutina dedicada a realizar la calibración a partir de los datos contenidos en un archivo CSV (Comma-separated values), la cual permite a los operadores realizar la calibración de los lotes de dosímetros Harwell Red 4034 o Amber 3042.

Otra forma para el cálculo es teniendo la regresión (ajuste de curvas de los datos) de los valores digitalizados, con lo cual obtenemos la curva de absorbancia óptica (k) versus dosis absorbida (D), a partir de un modelo basado en la función polinómica racional:

$$k = k_0 + \frac{aD}{1 + bD + cD^2}$$

donde  $k_0$  es el valor medio de k a cero Dosis, típicamente  $0,1 - 0,2 \text{ cm}^{-1}$ , y  $a, b, c$  son los coeficientes de la regresión. Para el caso particular de Dosis entre 5 y 50 kGy el ajuste de la curva se realiza utilizando como modelo un polinomio de cuarto orden:

$$k = a + bD + cD^2 + dD^3 + eD^4$$

## 8. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se logró diseñar e implementar la Integración de subsistemas y control del proceso de lectura en tiempo real de la absorbancia y espesor de los dosímetros Harwell Red 4034 y Amber 3042, logrando así automatizar este proceso. La definición precisa, concisa y rigurosa de los requisitos funcionales (función del sistema o sus componentes) y no funcionales (o atributo de calidad) del sistema permitió el desarrollo organizado del sistema hasta lograr una versión beta que satisfizo los requerimientos planteados por los usuarios y las fases de desarrollo previstas (ciclo de vida del software), lográndose obtener una interfaz sencilla y amigable. Una vez realizadas las verificaciones y validaciones pertinentes se procederá a liberar las versiones candidata a definitiva y la de disponibilidad general del producto.

El desarrollo realizado permite eliminar los posibles errores inherentes a la operación manual de los instrumentos y la interpretación de los resultados, así como realizar el almacenamiento electrónico de los datos en el Sistema de Gestión de los Irradiadores SGI-1 o en otras etapas del proceso.

Consideramos que toda la experiencia obtenida en la realización de este proyecto puede ser de provecho a otras instituciones y países miembros de ARCAL. En particular, el personal que trabajó en el proyecto ha adquirido y consolidado conocimientos en las herramientas y tecnologías utilizadas, así

como se ha ganado una valiosa experiencia en el proceso de desarrollo de aplicaciones de instrumentación virtual, la cual puede ser transferida tanto en el ámbito local como regional.

## 9. RECOMENDACIONES

En el futuro se pretende implementar el proceso de lectura en modo de barrido, para obtener la absorbancia en un intervalo de longitudes de onda. Esta modalidad permitiría introducir el desarrollo en otros tipos de ensayos químicos. Se precisaría además añadir las nuevas funcionalidades que se generen a partir de los requerimientos específicos de cada ensayo y del intercambio con los usuarios, así como elaborar las ventanas de ayuda para cada una de las interfaces de usuario que lo requieran.

La aplicación IVLAD se integrará con el Sistema de Gestión de Irradiadores 2 SGI-2, actualmente en desarrollo, y se utilizará la capacidad que tiene Agilent VEE Pro 9.3 para manejar conexiones Internet TCP/IP, en particular con protocolo encapsulado (túnel o tunneling) ssh (Secure SHell) y el sistema de gestión de bases de datos relacional orientado PostgreSQL para la transferencia de datos.

Montar la versión final de la aplicación en una máquina virtual (p. ej. VirtualBox) con un Sistema Operativo (SO) Unix-Like (Ubuntu, Fedora, Debian, Linux Mint, Elementary, PC-BSD u otro). Como Host OS “SO Anfitrión” se usaría alguno de los SO Unix-Like y como Guest SO “SO Invitado” al SO Microsoft Windows 7 Professional (versión con licencia en donde se está corriendo la aplicación). Esto permitiría obtener todas las ventajas que de las máquinas virtuales con respecto a las máquinas físicas, tales como velocidad, integridad, portabilidad, respaldo, recuperación, así como el inicio, pausa, reinicio y parada que se pueden hacer con las máquinas virtuales.

## REFERENCIAS

- [1] ISO/ASTM 51276:2002(E): Practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system.
- [2] RS232 Command Set for the GENESYS 20 Spectrophotometer, ThermoSpectronic User Manuals, Spectronic Unicam (2000)
- [3] <http://www.harwell-dosimeters.co.uk/harwell-red-4034>
- [4] <http://ecatalog.mitutoyo.com/ABSOLUTE-Digimatic-Indicator-ID-S-Series-543-with-Simple-Design-C1196.aspx>



## LISTADO DE ABREVIATURAS UTILIZADAS EN EL INFORME

| <b>Abreviatura</b> | <b>English</b>                                     | <b>Español</b>   |
|--------------------|--|--|
| ADC                | Analog-to-Digital Converter                        | <i>Conversor Análogo - Digital</i>                                       |
| APM                | Air Particulate Matter                             | Material particulado aero-transportado                                   |
| ARM                | Advanced RISC Machine                              |  |
| ASCII              | American Standard Code for Information Interchange | <i>Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información</i> |
| BGA                | Ball Grid Array                                    |  |
| COF                | Commercial off the Shelf                           | <i>Producto de estantería</i>  |
| CPLD               | Complex Programmable Logic Device                  | <i>Dispositivos Programables con Lógica Compleja</i>                     |
| CRC                | Cyclic Redundancy Check                            | <i>Verificación por redundancia cíclica</i>                              |
| DAC                | Digital - to Analog - Converter                    | <i>Conversor Digital - Análogo</i>                                       |
| DBA                | Design Base Accident                               | <i>Accidente base de diseño</i>  |
| DC                 | Direct Current                                     | <i>Corriente Directa</i>   |
| DEC                |  | Dispositivos Electrónicos Complejos                                      |
| DLS                | Dynamic Light Dispersion                           | <i>Dispersión dinámica de la luz</i>                                     |
| DSP                | Digital Signal Processing                          | <i>Procesamiento digital de señales</i>                                  |
| FPGA               | Field Programmable Gate array                      | <i>Arreglo lógico configurable</i>                                       |
| GM                 | Geiger Muller (detector)                           |  |
| GPIB               | General Purpose Interface Bus                      | <i>Bus de interfaz de propósito general</i>                              |
| GPRS               | General Packet Radio Service                       |  |
| HAL                | Hardware Abstraction Layer                         | <i>Abstracciones de Hardware</i>   |
| HDL                | Hardware Description Language                      | <i>Lenguaje de descripción de Hardware</i>                               |
| HMI                | Human – Machine Interface                          | <i>Interfaz de usuario</i>   |
| IP                 | Internet Protocol                                  |  |
| ISP                | In-System Programming                              | <i>Programación en el sistema</i>  |
| LAN                | Local area Network                                 | <i>Red de área local</i>   |
| LED                | Light Emitting Diode                               | <i>Diodo emisor de luz</i>   |
| LOCA               | Loss of Coolant Accident                           | <i>Accidente de pérdida de refrigerante</i>                              |
| μC                 | Micro-controller                                   | <i>Microcontrolador</i>  |
| MPSoC              | Multiprocessor system on chip                      | <i>Sistema en circuito integrado con múltiples procesadores</i>          |
| MVVS               |  | Metodología de Verificación y Validación de Software                     |
| PC                 | Personal computer                                  | <i>Ordenador personal</i>  |
| PCB                | Printed circuit board                              | <i>Tarjeta de circuito impreso</i>                                       |

|        |   |  |
|--------|---|--|
| PID    | Proportional, Integral and Derivative         | <i>Proporcional Integral Derivativo</i>  |
| PLC    | Programmable Logic Controller                 | <i>Controlador Lógico Programable</i>  |
| PMMA   |   | <i>Plástico Poli-Metacrilato de Metilo</i>   |
| PWM    | Pulse width modulator                         | <i>Modulador por ancho de pulso</i>  |
| RAM    | Random Access Memory                          | <i>Memoria de acceso aleatorio</i>   |
| RC     | Resistor - Capacitor                          | <i>Resistor - Condensador</i>  |
| RISC   | Reduced Instruction Set Computer              | <i>Ordenador de juego de instrucciones limitado</i>  |
| RTOS   | Real Time operating systems                   | <i>Sistema operativo de tiempo real</i>  |
| RUP    | Rational Unified Process                      | <i>Proceso Unificado Racional</i>  |
| SAR    |   | <i>Sistema de apagado del reactor</i>  |
| SD     | Secure Digital                                |  |
| SoC    | System on Chip                                | <i>Sistema en circuito integrado</i>   |
| SPI    | Serial Peripheral Interface                   | <i>Bus de interfaz de periféricos serie</i>  |
| SPR    |   | <i>Sistema de protección del Reactor</i>   |
| SVGA   | Super Video Graphics Array                    |  |
| TTL    | Transistor – Transistor Logic                 | <i>Lógica de transistor a transistor</i>   |
| UART   | Universal Asynchronous Receiver / Transmitter |  |
| UDP    | User Datagram Protocol                        | <i><u>protocolo</u> del <u>nivel de transporte</u> basado en el intercambio de <u>datagramas</u></i> |
| UPS    | Uninterruptible Power Supply                  |  |
| USB    | Universal Serial Bus                          | <i>Bus universal en serie</i>  |
| UV/VIS | Ultraviolet / Visible                         | <i>Ultravioleta / visible</i>  |
| VHSIC  | Very High Speed Integrated Circuit            | <i>Circuito integrado de alta velocidad</i>  |
| VI     | Virtual instruments                           | <i>Instrumentos virtuales</i>  |
| WiFi   | Wireless Fidelity                             |  |
| XP     | eXtreme Programming                           | <i>Programación Extrema</i>  |

## LISTADO DE SIGLAS UTILIZADAS EN EL INFORME

| <b>Sigla</b> | <b>English</b>  | <b>Español</b>  |
|--------------|---|---|
| ARCAL        |   | Acuerdo Regional para la Cooperación en América Latina      |
| CCHEN        |   | Comisión Chilena de Energía Nuclear                         |
| CEADEN       |   | Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear    |
| CICANUM      |   | Centro de Investigación en Ciencias Nucleares y Moleculares |
| CNAII        |   | Central Nuclear de Atucha II                                |
| CNEA         |   | Comisión Nacional de Energía Atómica                        |
| IEC          | International Electrotechnical Commission                   | <i>Comisión Electrotécnica Internacional</i>                |
| IEEE         | Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards |   |
| ININ         |   | Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares             |
| IPEN         |   | Instituto Peruano de Energía Nuclear                        |
| ISO          | International Standardization Organization                  | <i>Organización Internacional de Normalización</i>          |
| IVIC         |   | Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas         |
| LDAD         |   | Laboratorio de Dosimetría de altas Dosis                    |
| LIEN         |   | Laboratorio de instrumentación y Electrónica Nuclear        |
| MEER         |   | Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador  |
| NSIL         | Nuclear Sciences and Instrumentation Laboratory             |   |
| OIEA         | <i>International Atomic Energy Agency</i>                   | Organismo Internacional de Energía Atómica                  |
| UNA          |   | Universidad Nacional de Asunción                            |



## RELACIÓN DE EXPERTOS QUE CONTRIBUYERON A LA REDACCIÓN DEL INFORME

### Reunión Técnica de RLA1011/9004/01

La Habana, Cuba: 27–29 Enero 2014

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Arteche Díaz, R.             | Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, La Habana, Cuba   |
| Conejo Rodríguez, E.         | Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM), San José, Costa Rica                     |
| Cunya Carmona, E.            | Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), Lima, Perú   |
| Florentín, R.                | Comisión de Energía Atómica, Asunción, Paraguay   |
| Gaytán Gallardo, E.          | Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Ocoayac, México  |
| Hofer, C. G.                 | Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Buenos Aires, Argentina  |
| Jiménez Montes de Oca, C. A. | Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Venezuela   |
| Mesa Pérez, G.               | Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, La Habana, Cuba   |
| Padilla Alvarez, R.          | Nuclear Science and Instrumentation Laboratory (NSIL), NAPC, International Atomic Energy Agency, Vienna                   |
| Pavon Vallejos, W. D.        | Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCIAN), Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Quito, Ecuador |
| Piña Orellana, P. A.         | Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), Santiago, Chile  |



# IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 23

## PEDIDOS FUERA DEL OIEA

En los siguientes países, las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse por medio de los proveedores que se indican a continuación, o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA. Al final de la lista de proveedores se proporcionan los datos de contacto.

### ALEMANIA

#### **Goethe Buchhandlung Teubig GmbH**

Schweitzer Fachinformationen

Willstätterstrasse 15, 40549 Düsseldorf, ALEMANIA

Teléfono: +49 (0) 211 49 8740 • Fax: +49 (0) 211 49 87428

Correo electrónico: s.dehaan@schweitzer-online.de • Sitio web: <http://www.goethebuch.de>

### AUSTRALIA

#### **DA Information Services**

648 Whitehorse Road, Mitcham, VIC 3132, AUSTRALIA

Teléfono: +61 3 9210 7777 • Fax: +61 3 9210 7788

Correo electrónico: books@dadirect.com.au • Sitio web: <http://www.dadirect.com.au>

### BÉLGICA

#### **Jean de Lannoy**

Avenue du Roi 202, 1190 Bruselas, BÉLGICA

Teléfono: +32 2 5384 308 • Fax: +32 2 5380 841

Correo electrónico: jean.de.lannoy@euronet.be • Sitio web: <http://www.jean-de-lannoy.be>

### CANADÁ

#### **Renouf Publishing Co. Ltd.**

5369 Canotek Road, Ottawa, ON K1J 9J3, CANADÁ

Teléfono: +1 613 745 2665 • Fax: +1 643 745 7660

Correo electrónico: order@renoufbooks.com • Sitio web: <http://www.renoufbooks.com>

#### **Bernan Associates**

4501 Forbes Blvd., Suite 200, Lanham, MD 20706-4391, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Teléfono: +1 800 865 3457 • Fax: +1 800 865 3450

Correo electrónico: orders@bernan.com • Sitio web: <http://www.bernan.com>

### ESLOVENIA

#### **Cankarjeva Založba dd**

Kopitarjeva 2, 1515 Liubliana, ESLOVENIA

Teléfono: +386 1 432 31 44 • Fax: +386 1 230 14 35

Correo electrónico: import.books@cankarjeva-z.si • Sitio web: [http://www.mladinska.com/cankarjeva\\_zalozba](http://www.mladinska.com/cankarjeva_zalozba)

### ESPAÑA

#### **Díaz de Santos, S.A.**

Librerías Bookshop • Departamento de pedidos

Calle Albasanz 2, esquina Hermanos García Noblejas 21, 28037 Madrid, ESPAÑA

Teléfono: +34 917 43 48 90 • Fax: +34 917 43 4023

Correo electrónico: compras@diazdesantos.es • Sitio web: <http://www.diazdesantos.es>

### ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

#### **Bernan Associates**

4501 Forbes Blvd., Suite 200, Lanham, MD 20706-4391, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Teléfono: +1 800 865 3457 • Fax: +1 800 865 3450

Correo electrónico: orders@bernan.com • Sitio web: <http://www.bernan.com>

#### **Renouf Publishing Co. Ltd.**

812 Proctor Avenue, Ogdensburg, NY 13669, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Teléfono: +1 888 551 7470 • Fax: +1 888 551 7471

Correo electrónico: orders@renoufbooks.com • Sitio web: <http://www.renoufbooks.com>

### FINLANDIA

#### **Akateeminen Kirjakauppa**

PO Box 128 (Keskuskatu 1), 00101 Helsinki, FINLANDIA

Teléfono: +358 9 121 41 • Fax: +358 9 121 4450

Correo electrónico: akatilaus@akateeminen.com • Sitio web: <http://www.akateeminen.com>

### FRANCIA

#### **Form-Edit**

5 rue Janssen, PO Box 25, 75921 París CEDEX, FRANCIA

Teléfono: +33 1 42 01 49 49 • Fax: +33 1 42 01 90 90

Correo electrónico: fabien.boucard@formedit.fr • Sitio web: <http://www.formedit.fr>

#### **Lavoisier SAS**

14 rue de Provigny, 94236 Cachan CEDEX, FRANCIA

Teléfono: +33 1 47 40 67 00 • Fax: +33 1 47 40 67 02

Correo electrónico: livres@lavoisier.fr • Sitio web: <http://www.lavoisier.fr>

### **L'Appel du livre**

99 rue de Charonne, 75011 París, FRANCIA

Teléfono: +33 1 43 07 50 80 • Fax: +33 1 43 07 50 80

Correo electrónico: livres@appeldulivre.fr • Sitio web: <http://www.appeldulivre.fr>

### **HUNGRÍA**

#### **Librotade Ltd., Book Import**

PF 126, 1656 Budapest, HUNGRÍA

Teléfono: +36 1 257 7777 • Fax: +36 1 257 7472

Correo electrónico: books@librotade.hu • Sitio web: <http://www.librotade.hu>

### **INDIA**

#### **Allied Publishers**

1<sup>st</sup> Floor, Dubash House, 15, J.N. Heredi Marg, Ballard Estate, Bombay 400001, INDIA

Teléfono: +91 22 2261 7926/27 • Fax: +91 22 2261 7928

Correo electrónico: alliedpl@vsnl.com • Sitio web: <http://www.alliedpublishers.com>

#### **Bookwell**

3/79 Nirankari, Delhi 110009, INDIA

Teléfono: +91 11 2760 1283/4536

Correo electrónico: bkwel@nde.vsnl.net.in • Sitio web: <http://www.bookwellindia.com/>

### **ITALIA**

#### **Libreria Scientifica "AEIOU"**

Via Vincenzo Maria Coronelli 6, 20146 Milán, ITALIA

Teléfono: +39 02 48 95 45 52 • Fax: +39 02 48 95 45 48

Correo electrónico: info@libreriaaeiou.eu • Sitio web: <http://www.libreriaaeiou.eu/>

### **JAPÓN**

#### **Maruzen Co., Ltd.**

1-9-18 Kaigan, Minato-ku, Tokyo 105-0022, JAPÓN

Teléfono: +81 3 6367 6047 • Fax: +81 3 6367 6160

Correo electrónico: journal@maruzen.co.jp • Sitio web: <http://maruzen.co.jp>

### **NACIONES UNIDAS (ONU)**

300 East 42<sup>nd</sup> Street, IN-919J, Nueva York, NY 1001, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Teléfono: +1 212 963 8302 • Fax: +1 212 963 3489

Correo electrónico: publications@un.org • Sitio web: <http://www.unp.un.org>

### **PAÍSES BAJOS**

#### **Martinus Nijhoff International**

Koraalrood 50, Postbus 1853, 2700 CZ Zoetermeer, PAÍSES BAJOS

Teléfono: +31 793 684 400 • Fax: +31 793 615 698

Correo electrónico: info@nijhoff.nl • Sitio web: <http://www.nijhoff.nl>

#### **Swets Information Services Ltd.**

PO Box 26, 2300 AA Leiden

Dellaertweg 9b, 2316 WZ Leiden, PAÍSES BAJOS

Teléfono: +31 88 4679 387 • Fax: +31 88 4679 388

Correo electrónico: tbeysens@nl.swets.com • Sitio web: <http://www.swets.com>

### **REINO UNIDO**

#### **The Stationery Office Ltd. (TSO)**

PO Box 29, Norwich, Norfolk, NR3 1PD, REINO UNIDO

Teléfono: +44 870 600 5552

Correo electrónico: (pedidos) books.orders@tso.co.uk • (consultas) book.enquiries@tso.co.uk •

Sitio web: <http://www.tso.co.uk>

### **REPÚBLICA CHECA**

#### **Suweco CZ, spol. S.r.o.**

Klecakova 347, 180 21 Praga 9, REPÚBLICA CHECA

Teléfono: +420 242 459 202 • Fax: +420 242 459 203

Correo electrónico: nakup@suweco.cz • Sitio web: <http://www.suweco.cz>

## **Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, se pueden enviar directamente a:**

Sección Editorial del OIEA, Dependencia de Mercadotecnia y Venta,

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria

Teléfono: +43 1 2600 22529 ó 22488 • Fax: +43 1 2600 29302

Correo electrónico: sales.publications@iaea.org • Sitio web: <http://www.iaea.org/books>

**Organismo Internacional de Energía Atómica**  
**Viena**  
ISBN 978-92-0-303915-4  
ISSN 1011-4289