

## **ACTUALIZACION DE SISTEMAS DE RADIOPROTECCIÓN EN CICLOTRON Y RADIOFARMACIA PET**

**Arenas, G.M.<sup>1</sup>, Calderón, G.J.<sup>1,2</sup>, Noya, E.R.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Fundación Escuela Medicina Nuclear,  
<sup>2</sup> Comisión Nacional de Energía Atómica

### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan las actualizaciones realizadas en los Sistemas de Seguridad Radiológica, por medio de las cuales se logró incrementar la seguridad operativa en tareas rutinarias de inspección del bunker de ciclotrón, bombardeo de blancos del ciclotrón, transferencia del material radiactivo hacia celdas calientes y en etapas de síntesis y control de calidad de radiofármacos.

En particular, los cambios realizados en la instalación comprenden: incorporación de sistema de Última Persona, actualización de hardware y de software de control del Ciclotrón, incorporando enclavamiento ante falta de refrigeración líquida de blancos, enclavamientos de válvulas de transferencia desde blancos hacia celdas calientes. En el área de radiofarmacia se incorporan detectores de contaminación con monitoreo en línea de aire con isótopos emisores de positrones, enclavamiento de apertura de celdas calientes por nivel de tasa de dosis en su interior, campana de humos para test de punto de burbuja, monitoreo continuo de contaminantes radioactivos en chimenea del sistema de aire la instalación.

Las mejoras realizadas contribuyen a la seguridad intrínseca de la instalación, por medio de la automatización total o parcial de diversos sistemas de enclavamiento, monitoreo continuo de niveles de contaminación de aire, minimizándose así la probabilidad de incidentes, y permitiendo paliar sus consecuencias, en caso de ocurrencia.

Los cambios introducidos obedecen a las políticas del Sistema de Calidad que posee la instalación, el cual hace énfasis en la Mejora Continuada de los Procesos y en la Cultura de la Seguridad. Por otro lado, le han permitido a esta instalación poder adecuarse a nuevos requerimientos de Autoridad Regulatoria Nuclear.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En las instalaciones de FUESMEN se encuentra un ciclotrón Siemens RDS-112 que CNEA le ha cedido en uso para la producción de radiofármacos para PET. El ciclotrón junto a la radiofarmacia PET son operados de forma rutinaria desde el año 1997. En particular, se trata de un acelerador de H<sup>-</sup> con una energía de 11 MeV, sin autoblandaje, con 4 líneas de extracción y que permite bombardeo simultáneo de 2 blancos. La configuración original del equipo potencialmente permite producir 18O, 11C, 13N y 15O, de acuerdo a las reacciones detalladas en la Tabla 1: Radioisótopos que pueden producirse en ciclotrón CTI RDS112. Sin embargo, según los objetivos institucionales, la instalación de ciclotrón- radiofarmacia PET originalmente se licenció para la producción de 18F-FDG y 13N-Amionio. Actualmente está en proceso de licenciamiento para la producción rutinaria de radiofármacos marcados con 11C.

En el año 2012 FUESMEN sustituyó un antiguo scanner PET dedicado con un moderno PET/CT que permitió satisfacer una creciente demanda. Luego de un corto tiempo, la frontera

---

de posibilidad de producción fue alcanzada debido a la limitada capacidad de producción del blanco original de  $^{18}\text{F}$  del ciclotrón. Como respuesta, durante el año 2014 se realizaron sobre el ciclotrón dos actualizaciones con las que se logró un mayor rendimiento en la producción de  $^{18}\text{F}$  y que simultáneamente permitieron mejoras sustanciales las condiciones radioprotectivas de la instalación. Estas son: nuevo blanco de  $^{18}\text{F}$  y nuevo sistema de control de ciclotrón.

**Tabla 1: Radioisótopos que pueden producirse en ciclotrón CTI RDS112**

Isótopo	reacción	T $\frac{1}{2}$ (min)	Modos decaimiento (%)
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	109.8	$\beta^+$ : 96.9, EC: 3.1
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	20.3	$\beta^+$ : 99.8, EC: 0.2
$^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$	9.96	$\beta^+$ : 100
$^{15}\text{O}$	$^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})^{15}\text{O}$	2.03	$\beta^+$ : 99.9, EC: 0.1

Además, en el resto de la instalación se realizaron otras mejoras importantes en materia de radioprotección:

- Sistema de Última Persona para el cierre de puerta del bunker de ciclotrón.
- Monitoreo en línea de contaminación de aire con emisores  $\beta^+$  en área limpia de radiofarmacia
- Monitoreo de los niveles de actividad de chimenea general de la instalación
- Incorporación de campana de humos en laboratorio de control de calidad de radiofarmacia
- Sistema automático para enclavamiento de puertas de celdas calientes

Previo a la implementación de los nuevos sistemas se diseñó la lógica de funcionamiento de los enclavamientos y sistemas de seguridad siguiendo las recomendaciones publicadas por la guía OIEA RLA/9/064 – ATS 1 Junio 2012 y criterios vertidos por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (1).

## 2. ACTUALIZACIONES DEL CICLOTRÓN

La primera actualización consistió en reemplazar el blanco original de  $^{18}\text{F}$ , con cuerpo de plata y de baja presión de trabajo, con un nuevo blanco con cuerpo de Niobio y alta presión de trabajo.

El nuevo blanco posee una capacidad de disipación térmica muy superior, lo que permite bombardearlo a mayores corrientes sin que el  $^{18}\text{O}$ -agua alcance un punto de ebullición descontrolada, por tanto se logra obtener una mayor actividad neta y alta reproducibilidad al final de bombardeo. Además también se aprecia una mejora en la reproducibilidad de la actividad neta de la  $^{18}\text{-FDG}$ , atribuible a una menor cantidad de trazas que interfieren con el rendimiento durante la síntesis química del radiofármaco.

En segundo lugar se realizó la actualización del sistema de control del ciclotrón. Los cambios permiten la interacción eficaz del operador por medio de una interfaz gráfica moderna y versátil. También se instrumentaron alarmas audiovisuales que advierten rápidamente

cualquier situación anormal en los parámetros operativos, y un exhaustivo sistema de registro que permite un análisis gráfico retrospectivo de varios parámetros en simultáneo, lo que facilita encontrar el origen de distintas fallas.

El nuevo sistema de control integra computadora e interfaces de comunicación de grado industrial, con estándares reconocidos internacionalmente y de alta disponibilidad en el mercado, lo que repercute en una operación con menor probabilidad de falla, y en caso de ocurrencia, un menor tiempo de parada.

El software de control de ciclotrón es un desarrollo que además de contener la plataforma base para la operación, tiene la posibilidad de agregar funciones no previstas en el sistema original. Esto permitió que las necesidades particulares de nuestra instalación en materia de radioprotección sean incorporadas como parte del mismo. Concretamente:

- El sistema de control de ciclotrón conoce el estado de disponibilidad para la transferencia de material radiactivo de todas las celdas calientes, en virtud de dicha condición se permite o inhibe automáticamente la transferencia, según se detallará más adelante.
- El inicio de cada procedimiento de transferencia hacia celdas calientes se indica mediante alarmas visuales en el área limpia de radiofarmacia
- En bombardeo de blancos se inhibe automáticamente si el caudal de agua refrigerante en alguno de ellos es inferior al adecuado

### 3. SISTEMA DE ÚLTIMA PERSONA

La instalación posee una computadora de grado industrial PLC (*Programmable Logic Controller*) con interfaz HMI (*Human Machine Interface*) para el control del sistema independiente de aire de aquellas salas o ambientes susceptibles de sufrir contaminación radiactiva. En dicho PLC se aprovechó cierta capacidad disponible para incorporar el control de un *Sistema de Última Persona*. Este sistema permite el cierre de la puerta de bunker solo si se han presionado en la secuencia correcta y dentro de una ventana de tiempo preestablecida dos pulsadores de habilitación y luego el botón de cierre, en caso contrario la secuencia se aborta y deberá reiniciarse todo el procedimiento de cierre. Los dos pulsadores están ubicados dentro del bunker de forma estratégica (Ilustración 1), garantizando el chequeo visual sin que existan puntos ciegos, pero que a la vez minimiza la exposición del operador a la zona de blancos. En inicio de la secuencia de última persona se anuncia en toda la instalación por medio de alarma sonora. Una vez lograda la habilitación, el cierre de la puerta se realiza por medio del pulsador continuo, al ingreso, junto a la puerta. Durante el movimiento de la puerta la frecuencia de la alarma sonora cambia para anunciar esta situación al personal.

Pulsador 1, zona blancos	Pulsador 2, intercambiado de calor	Pulsador continuo cierre puerta de bunker
--------------------------	------------------------------------	---



Tanto el estado de los pulsadores (si han sido presionados o no), el estado de la puerta (abierta, cerrada o en movimiento), y una cuenta regresiva son representados en una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en el HMI del PLC, ubicado en la sala de control de ciclotrón (Ilustración 2).



Ilustración 2: GUI de Sistema Última Persona

La apertura de la puerta de bunker está condicionada desde el exterior a que la tasa de dosis ambiental en el interior sea inferior a un cierto valor umbral. Sin embargo, el sistema de última persona permite hacerlo desde el interior del bunker en todo momento con un Pulsador de Emergencia, con su correspondiente indicación gráfica en el HMI.

#### 4. TRANSFERENCIA DE MATERIAL RADIATIVO DESDE CICLOTRÓN: ACTUALIZACIÓN DE CELDAS CALIENTES

Relativo a la transferencia de material radiactivo desde ciclotrón hacia celdas calientes se han implementado dos nuevos sistemas: *Sistema de Enclavamiento de Puerta de Celdas Calientes* y el *Sistema de Celda Lista*. Al igual que el Sistema de Última Persona, ambos han sido implementados parcialmente sobre el PLC.

Para el *Sistema de Celda Lista* el PLC está a cargo de informar de forma automática al nuevo sistema de control del ciclotrón el estado de disponibilidad de cada celda para la transferencia de material radiactivo desde blancos de ciclotrón, esto es *celda lista* o *celda no lista*. A partir de dicha información el ciclotrón inhibe o habilita automáticamente la transferencia de

material radiactivo a la celda de destino. El estado de cada celda se muestra tanto sobre el HMI como sobre el sistema de control de ciclotrón. (Ilustración 3 e Ilustración 4)

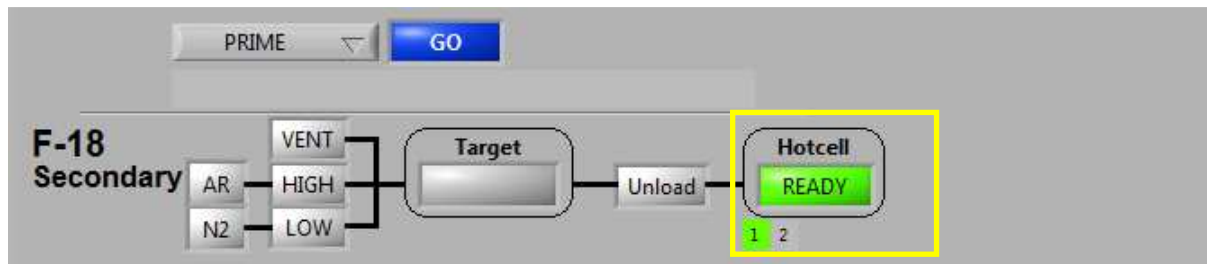


Ilustración 3: blanco 18F. Ejemplo Celda 1 Lista y Celda 2 no lista

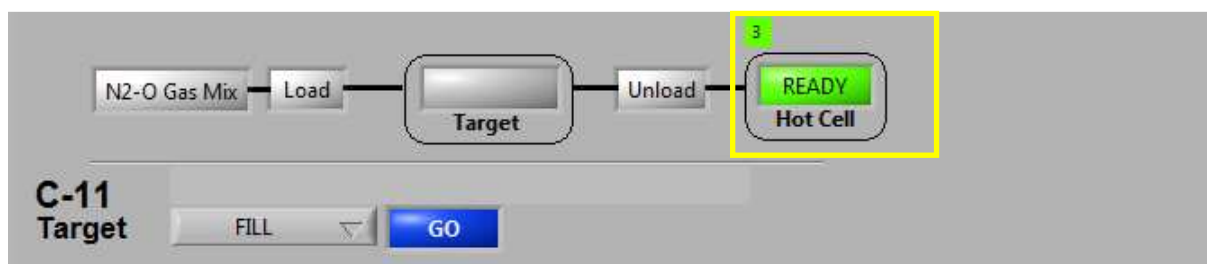


Ilustración 4: blanco 11C. ejemplo Celda 3 Lista

La condición de disponibilidad de celdas calientes se evalúa a partir de la medir sobre ellas distintas variables, por medio de sensores. El laboratorio de radiofarmacia cuenta actualmente con 3 celdas calientes. Una cuarta celda está en proceso de instalación. Dos celdas marca TAEN están en funcionamiento desde 1997, dada su concepción original de estas últimas ambas han debido ser actualizadas mediante la incorporación de algunos sensores, a saber:

- El *Sistema de Enclavamiento de Puerta de Celadas Calientes* utiliza detectores GM para el monitoreo continuo de tasa de dosis ambiental en el interior de las celdas. Esta información previene al operador de celda de exposiciones no planificadas, ya que la central de lectura del GM da una indicación visual de pre-alarma por la superación de un primer valor umbral.

Además, cuando se supera otro umbral más alto, en la central de lectura del GM se activa una alarma visual y también generará una señal de tipo fallo seguro que es leída por el PLC para impedir la apertura accidental de la celda en cuestión (Ilustración 5)



**Ilustración 5: central de GMs para enclavamiento de puerta de celdas TAEN**

- Detectores para el monitoreo continuo del nivel de presión negativa relativa en el interior de la celda. Cuando el valor absoluto de  $\Delta P$  es menor que 0,5 cm de columna de agua la situación se indica sobre el mismo instrumento de cada celda y en el HMI (Ilustración 6). Esta es una de las 2 condiciones que el PLC utiliza para generar un tipo de señal en modo seguro de *celda no lista* para el ciclotrón.
- La segunda condición del *Sistema de Celda Lista* la genera PLC a partir de *Sensores final de carrera*, ubicados al cierre de puerta de celdas calientes. Si la puerta de celda no se encuentra completamente cerrada el PLC informa *celda no lista* al ciclotrón, mientras que el HMI muestra condición y la lectura al Oficial de Radioprotección (Ilustración 6)



**Ilustración 6: GUI en HMI de Sist. Enclavamiento Puerta Celdas y Sist. Celda Lista**

- Una vez habilitado un procedimiento de transferencia de material radiactivo, el sistema de control de ciclotrón envía al PLC una señal de ***inicio efectivo de la transferencia***, por medio de señal tipo modo fallo seguro, activándose el ***Sistema de Enclavamiento de Puerta de Celadas Calientes*** que inhibirá la apertura de todas las puertas de celdas. La inhibición por transferencia se mantendrá hasta que se le indique manualmente al ciclotrón que la transferencia ha sido completada exitosamente.

#### 4. MONITOREO Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AIRE

A los fines tener mayor información y control sobre las condiciones de contaminación de aire se han incorporado a la instalación distintos sistemas:

- El ya mencionado sistema de monitoreo de presión relativa de celdas TAEN y la respectiva inhibición de la transferencia
- Sistema de monitoreo continuo de concentración de emisores de positrones en aire
- Monitoreo de emisiones en chimenea general de la instalación
- Campana de humos para test de punto de burbuja de membrana filtrante

El sistema de monitoreo continuo de emisores de positrones en aire (Ilustración 7) permite conocer en tiempo real la concentración de un cierto isótopo, de acuerdo a factores de calibración calculados *in situ* en la instalación. El procedimiento de caracterización y calibración del instrumento está detallado en el trabajo 'Dosimetría en personal de radiofarmacia PET', del Mg. Joan Fernandez, también presente en este X Congreso Regional Latinoamericano IRPA. Dicho instrumento está diseñado para ser compatible con el área limpia de la instalación, y su función es advertir a los operadores de celdas sobre cualquier valor anormal de concentración dentro del recinto de producción de radiofármacos.



**Ilustración 7: instrumento para monitoreo continuo de contaminación de aire dentro del área limpia**

Para el monitoreo de descargas al ambiente se ha instalado en la chimenea general de la instalación un detector GM construido de forma robusta para soportar las condiciones exteriores (Ilustración 8).

A fin de controlar los niveles de contaminación producidos durante el test de punto de burbuja de membrana filtrante se ha instalado una campana de humos dentro del laboratorio de control de calidad de radiofármacos (Ilustración 9). He han realizado mediciones anemométricas y se corroboraron velocidades de ingreso del aire superior a 0,5m/s.



**Ilustración 8: GM para detección de descargas atmosféricas**



**Ilustración 9: campana de humos en Lab. de Control de Calidad**



## 5. CONCLUSIONES

Muchas de las modernizaciones realizadas en materia de radioprotección en la instalación de ciclotrón y radiofarmacia de FUESMEN se han logrado a partir la oportunidad excepcional de actualización del sistema de control de ciclotrón. Esta oportunidad se aprovechó coordinando una serie de recursos materiales y de mano de obra especializada para lograr los objetivos detallados en el trabajo.

Respecto a los sistemas instalados, aún queda como punto pendiente el modelado de descargas ambientales por chimenea, problema que planea abordarse por medio de convenios con grupos de expertos en la materia.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, *Criterios para el licenciamiento y requisitos de inspección de instalaciones con ciclotrones para producción de radioisótopos utilizados en aplicaciones e investigaciones médicas*, 2013