

Sistema Detector Portal:

Una aplicación actual para un detector poco convencional.

F. Izraelevitch(1), E. Matatagui(1), J.L. Regueiro Veiga(2)

(1) Instituto Dan Beninson, UNSAM ; (2) Ingeniería Solydes SA
ematatagui@hotmail.com

Un Sistema Detector Portal sirve para alertar sobre el eventual transporte de material radiactivo no declarado por parte de vehículos y o personas, y se ubica en lugares claves, tales como el acceso a facilidades nucleares, en cruce de fronteras, en aeropuertos. El Sistema tiene requerimientos técnicos específicos, considerados en normas internacionales. Se ha desarrollado, construido, instalado, y está actualmente operativo, un Sistema Detector Portal para medición de radiación gamma de diseño no convencional, basado en un sensor tipo cámara de ionización de gran volumen (60 litros) y gran longitud (2 metros) y una electrónica asociada de muy bajo nivel (fAmp) y alta estabilidad, que, junto con un procesamiento digital de las señales, permite obtener un instrumento de excelentes características. La radiación de referencia para el Sistema es el nivel de radiación ambiental, que mide en forma continuada y con alta resolución el mismo instrumento, y la compara con la señal generada durante el tránsito del vehículo y o persona por el Portal, y toma decisiones estadísticas al respecto

Se hará una descripción del sistema diseñado y construido, así como algunos de los resultados obtenidos de su caracterización.

1. INTRODUCCIÓN

La detección de material radiactivo no declarado y que pudiera ser desviado y utilizado para propósitos ilícitos es una preocupación permanente, e incrementada luego de los ataques terroristas del 11 sept. 2001.

Entre otros aspectos, esa preocupación ha incentivado el desarrollo de instrumentación adecuada. Una consideración importante es que esos instrumentos de detección serán utilizados en campo y por personal no especializado.

El Monitor Portal de Radiación (MPR), objeto del presente trabajo, es uno de esos equipos, y se constituye en el primer paso en el proceso de detección.

Dado las características especiales de este tipo de instrumentos, una serie de normas han aparecido en la última década para ayudar en el diseño y ensayo de este tipo de equipos. Para el MPR son pertinentes las referencias ^{1, 2, 3,}

2. MPR: ASPECTOS GENERALES

Un MPR vigila un tráfico de personas, vehículos o cosas. El objeto es alertar sobre la presencia de material radiactivo en ese tráfico. A esos efectos, el tráfico es dirigido a ciertos Puntos Críticos o Nodales, donde el MPR está instalado. Ejemplos de Puntos Críticos son:

1. Aeropuertos, puertos, cruce de fronteras

Se procura la detección de material radiactivo que, en forma inadvertida o ilícita se pretenda hacer pasar por el Punto Crítico.

2. Acceso a facilidades e instalaciones nucleares

En esta aplicación es de especial interés el control radiactivo de personas, vehículos o cosas que entran o salen de la facilidad o instalación. En particular podría haber contaminación radiactiva no advertida, lo que podría tener implicancias reales y o legales.

3. Otras aplicaciones.

Este tipo de instrumentos podrían utilizarse en el control de chatarra en acerías y en el control de basura en depósitos de residuos.

3. MPR: REQUERIMIENTOS

En una aplicación típica, el MPR vigila un flujo continuo de personas (o vehículos, o equipajes, o correo, o cargas,...) y ese flujo debe ser perturbado lo menos posible. Deben cumplirse las condiciones:

- . Pasaje directo por el Punto Crítico
- . Alta sensibilidad en la medición de radiación
- . Tiempo corto de medición
- . Medición y toma de decisiones automática
- . Operación en forma continuada
- . Registro histórico de los datos de interés

El MPR objeto de este trabajo detecta radiación gamma. La detección de neutrones podría seguir pautas semejantes. En la detección de material fisible se podrían utilizar métodos de interrogación por neutrones que exceden las posibilidades del presente concepto.

4. MPR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

El MPR consiste en un arreglo de detectores de radiación, electrónica asociada y sensores de proximidad. Estos sensores indican que el objeto a examinar está en el área de medición.

La medición, y la toma de decisiones, se hacen en forma automática:

- . El sistema registra el nivel de radiación cuando el objeto a controlar circula por el área de medición.
- . Compara ese nivel con el nivel de radiación de fondo y toma su decisión. Esa decisión podría ser el accionamiento de una alarma de excederse límites preestablecidos.
- . El nivel de radiación de fondo se mide y actualiza mientras el área de medición no esté ocupada. La medición continua del nivel de fondo y el ajuste automático del umbral de alarma permiten mantener la estadística de falsas alarmas a niveles constantes.

5. DETECTORES CONVENCIONALES (RADIACIÓN GAMMA)

Los MPR comerciales usan un centellador acoplado a un fotomultiplicador como unidad de detección. Algunos equipos usan INa(Tl); la mayoría emplea centelladores plásticos. En todos los casos es necesaria una fuente de alta tensión para operar el fotomultiplicador. Algunas de sus características son:

- . Alta sensibilidad

El INa(Tl) es altamente eficaz y es muy usado en múltiples aplicaciones. Detectores plásticos son menos eficientes pero permiten volúmenes de detección de varios litros. En ambos casos, por razones prácticas, el volumen del detector está acotado. Para cubrir más homogéneamente la zona de detección se usan dos o más unidades de detección. Ello incrementa costo y complejidad.

. Señal conveniente

La señal consiste en una sucesión de pulsos eléctricos. El fotomultiplicador amplifica, prácticamente sin introducir ruido, los pulsos originados en el foto cátodo, y son amplificados y conformados por la electrónica. Este tipo de señal es conveniente para un análisis estadístico.

. Tiempo de medición controlable

El tiempo de medición T puede ser prefijado y se asocia con la tasa de falsas alarmas. En efecto, si se supone que N' es la tasa de cuentas registrada en un proceso de medición y que se cumple la estadística de Poisson, el error estadístico de esa medición es, aproximadamente:

$$(\Delta N' / N') \approx \text{SQR} (1 / (\langle N' \rangle_B T))$$

y donde $\langle N' \rangle_B$ es la tasa media de cuentas para la radiación de fondo y T es el tiempo empleado en la medición. En consecuencia, una alta sensibilidad, o sea una alta tasa de cuentas para la radiación de fondo, involucra un tiempo T de medición corto, y una rápida toma de decisión.

. Componentes críticos

La mayoría de los componentes que se emplean en los MPR convencionales, tales como centelladores, foto multiplicadores, electrónica nuclear, tienen una tecnología que no está disponible en el país, y deben ser adquiridos en el exterior. En consecuencia, el desarrollo y construcción local de un MPR con esa filosofía no es atractiva. La tarea se reduciría al ensamblado y puesta en marcha de un conjunto de partes importadas.

6. DETECTOR CIP (RADIACIÓN GAMMA)

La propuesta de usar un tipo de detector de desarrollo propio en un MPR daría lugar a un sistema modular, versátil, simple, eficiente. El uso de tal detector requiere una modificación conceptual en los criterios de adquisición de señal y su procesamiento para la toma de decisiones, pero el resultado es un sistema MPR de realización en extremo simple.

La cámara de ionización es el dispositivo clásico en la medición de radiación. En este trabajo se propone usar una cámara de ionización presurizada (CIP) como sensor en el desarrollo de un MPR de tecnología local.

El proceso de detección es como sigue:

1. la radiación incidente ioniza un gas contenido en el detector

2. la ionización producida es colectada por electrodos internos del detector
3. la señal es una corriente eléctrica cuyo valor es una medida de la intensidad de la radiación incidente

Algunas características de la operación de una CIP son:

1. Aunque la señal generada es, en principio, una sucesión de pulsos de corriente, estos pulsos son en extremo pequeños, y no es posible observarlos individualmente. En la práctica, la señal generada es una corriente, valor medio de las corrientes individuales.
2. Una consecuencia importante es la imposibilidad de hacer espectroscopía con una CIP
3. El dispositivo CIP no tiene mecanismo de amplificación interno. En las condiciones de operación de un MPR la señal es de muy bajo nivel.
4. La sensibilidad gamma de una CIP es proporcional al volumen activo del detector y a la presión del gas de colección. Para una CIP con argón, de volumen activo de V litros y presión de llenado de P atmósferas, vale, para la sensibilidad gamma K_g la relación:

$$K_g = (I / X') \approx C_1 (PV)_{STP} \quad \text{donde}$$

$$C_1 = 0.164 \text{ (f amp / } (\mu \text{ R H}^{-1}) \text{ (litro-atmosfera)}^{-1}$$

Siendo el campo de radiación ambiental típico para un MPR del orden de $10 \text{ } (\mu \text{ R H}^{-1})$

5. La respuesta en energía de una CIP es prácticamente plana. Esto significa que la sensibilidad K_g es casi independiente de la energía de la radiación incidente.

Por otro lado la atenuación de la radiación en la pared del detector impone un límite inferior a la energía a detectar, que en nuestro desarrollo es del orden de 30 keV

6. En nuestro desarrollo de CIP se usa geometría cilíndrica, lo que permite una sensibilidad aproximadamente constante a lo largo del detector.
7. También permite una construcción modular. Los módulos, de una longitud conveniente, pueden ubicarse en forma vertical u horizontal. Un módulo puede tener metros de longitud.
8. El tiempo de respuesta del CIP depende del tiempo de colección de los electrones generados por la radiación. En las condiciones de operación elegidas el tiempo de tránsito electrónico es del orden de 0.1 seg.

9. La tensión de polarización debe ser suficiente alta como para:

- . Colectar eficientemente, y para los niveles de radiación de interés, la ionización generada por la radiación es colectada totalmente.
- . Un tiempo de tránsito electrónico suficientemente corto, y asegurar, así, una rápida respuesta para la detección.

Deben tomarse algunas precauciones en la operación de la CIP:

10. La fuente de polarización debe ser ultra estable, ya que sus fluctuaciones se acoplan, por capacidad, a la señal del detector

11. El detector y su señal son susceptibles a microfonismo. El montaje del detector de tener en cuenta esta circunstancia, y ser antisísmico.

7. CARACTERÍSTICAS DEL CIP

7.1 ASPECTOS MECÁNICOS

El prototipo del detector diseñado y construido tiene geometría cilíndrica, con un diámetro de 203 mm y una altura de 2 mts. Descontando partes estructurales internas, el detector posee un volumen sensible de 57.6 litros. El gas de llenado es argón, a una presión de 10 bar. El material de las paredes del detector es aluminio, así como el material de los electrodos y otros internos estructurales. La figura muestra un esquema de los electrodos cilíndricos y en la foto se puede apreciar su tamaño.

Con el objeto de maximizar el volumen de detección, el tubo externo cumple con la triple función de contenedor del gas a presión, de electrodo de polarización y de blindaje a la interferencia electromagnética. El espesor de este tubo es de 4 mm, y es elegido como un compromiso entre la atenuación gamma del aluminio a bajas energías y su capacidad de soportar la presión de llenado del detector.

7.2 ASPECTOS ELECTRICOS

La CIP funciona como una fuente de corriente cuya magnitud debería ser proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Sin embargo, en ausencia de radiación, la corriente entregada por el detector no es cero, sino que existe una corriente que llamamos oscura. En ciertos casos, la corriente oscura puede ser lo suficientemente grande como para enmascarar la señal de la radiación que se desea medir. Esta corriente oscura depende del diseño y detalles constructivos del detector, y debe ser lo más chica posible.

El fondo de radiación natural es del orden de 2 mSv/año, lo que equivale aproximadamente a 0.2 μ Sv/hora. La señal generada por CIP es del orden del pico amper. En consecuencia se imponen muy severas

condiciones tanto para la corriente oscura como para la corriente de pérdida del preamplificador de señal, las que deben ser menores a 10 femto ampere para lograr un comportamiento satisfactorio.

Hay varios aspectos relacionados con la fuente de polarización del detector:

1. Con tan bajos niveles de señal, esta fuente debe ser en extremo estable, pues sus fluctuaciones se acoplan al electrodo de señal.
2. La eficiencia de colección de la ionización generada por la radiación se observa con las curvas de Plateau. Se nota que unos pocos volt son suficientes para coleccionar toda la ionización producida.
3. El consumo de corriente por parte del detector es ínfimo.

Dadas las consideraciones anteriores, resulta conveniente polarizar al detector con 100 volt, y obtener esa tensión de un paquete de baterías.

7.3 RESPUESTA ESPECTRAL

La respuesta espectral del CIP es la relación entre su señal y la señal de un detector estándar, equivalente a aire, en función de la energía de la radiación gamma. En condiciones de equilibrio electrónico, la respuesta de un detector tipo cámara de ionización es proporcional a:

$$N' E_g (\mu_{en} / \rho)$$

Donde la cantidad (μ_{en} / ρ) es el coeficiente de absorción de energía para los respectivos gases y E_g es la energía de la radiación. La relación entre la respuesta del argón y la respuesta del aire, en función de la energía:

$$(\mu_{en} / \rho)_{\text{argon}} / (\mu_{en} / \rho)_{\text{aire}}$$

es la respuesta espectral de nuestro detector. Esta cantidad es aproximadamente constante, y cercana a 1.0 para altas energías, donde predomina la interacción Compton, y aumenta para bajas energías donde predomina el efecto fotoeléctrico. Este aumento es significativo por debajo de 100 keV, pero, a energía suficientemente baja, importa la atenuación en la pared de aluminio del detector. Un espesor de 4 mm de aluminio tiene una transmisión del orden de 30% para energías gamma de 30 keV, y tal valor podrá considerarse como el umbral inferior de detección,

En consecuencia, la respuesta espectral del detector es aproximadamente constante por encima de los 100 keV, significativamente incrementada entre 30 y 100 keV por la influencia del efecto fotoeléctrico, y fuertemente reducida por debajo de 30 keV por la atenuación de la pared de aluminio del detector.

7.4 RESPUESTA A FUENTE PUNTUAL

Expuesto a un campo uniforme de radiación gamma el detector genera una señal proporcional a la tasa de exposición, pero es de especial interés su respuesta a una fuente puntual de radiación.

Una fuente puntual de actividad A da lugar, a una distancia r , a una tasa de exposición N'

$$N' = \Gamma A / (r^2)$$

Notar que a una corta distancia de la fuente, el campo de radiación es fuertemente inhomogéneo. Integrando el efecto de esa irradiación sobre el volumen sensible del detector, se obtiene el resultado aproximado:

$$I \approx K (1/a) (\theta_2 - \theta_1)$$

Donde a es la distancia normal de la fuente al detector y $(\theta_2 - \theta_1)$ es el ángulo con que la fuente ve al detector.

En consecuencia, como es de esperar, un detector de geometría cilíndrica presenta una menor dependencia, en la detección de una fuente puntual, con las distancias que un detector convencional (el que sería quasi puntual), lo que es preferible para un sistema MPR.

La figura muestra los resultados de un ensayo de respuesta a una fuente puntual por nuestro detector CIP.

8. CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL

La señal consiste en una sucesión aleatoria de pulsos de corriente, siendo cada evento consecuencia de un proceso de detección. Suponer que cada evento da lugar a una carga Q colectada por el detector. Aunque no es posible resolver esos pulsos, supongamos que lo podemos hacer, y que, en un tiempo de medición T registramos C_j cuentas. En consecuencia, se tiene:

1. Una muestra de la tasa de cuentas N'_j definida como:

$$N'_j = C_j / T \quad \text{y su valor medio:}$$

$$\langle N' \rangle = \langle C \rangle / T$$

2. Una muestra de la corriente colectada I_j definida como:

$$I_j = Q C_j / T \quad \text{y su valor medio:}$$

$$\langle I \rangle = Q \langle N' \rangle$$

3. Una muestra de la varianza, o fluctuación de la corriente:

$$(I_j - \langle I \rangle)^2 = (Q^2 / T^2) (C_j - \langle C \rangle)^2 \quad \text{y su valor medio:}$$

$$\langle (I_j - \langle I \rangle)^2 \rangle = (Q^2 / T^2) \langle (C_j - \langle C \rangle)^2 \rangle$$

$$= (Q^2 / T^2) \langle C \rangle$$

$$\langle (\Delta I)^2 \rangle = Q \langle I \rangle (1 / T)$$

Suponemos vale la estadística de Poisson, y la relación:

$$\langle (C_j - \langle C \rangle)^2 \rangle = \langle C \rangle$$

En consecuencia la señal generada por el detector consiste en una corriente de valor medio $\langle I \rangle$ y una señal fluctuante de varianza $\langle (\Delta I)^2 \rangle$, cuyo valor depende del tiempo de muestreo T . El error relativo en una medición está dado por la relación:

$$(\Delta I / I) = \text{SQR} (Q / (\langle I \rangle T))$$

El tiempo T está limitado, principalmente, por el tiempo de respuesta de la electrónica, y puede ser de algunos segundos.

9. ELECTRÓNICA ANALÓGICA

1. Sistema básico

El amplificador básico para procesar la corriente generada por el detector es un amplificador operacional, conectado en modo inversor, constituyendo un sistema conversor corriente a tensión.

Esta configuración tiene las características de un medidor de corriente ideal. En particular, no hay caída de tensión para la corriente a medir, y la entrada del amplificador funciona como un cero virtual, con una resistencia de entrada muy baja. La salida del amplificador es una señal de tensión con baja resistencia interna, y que se podrá usar para el procesamiento siguiente sin mayores problemas.

En un caso ideal, entre la tensión de salida del amplificador e_0 y la señal de corriente I_D de entrada al mismo, vale la relación:

$$e_0 = - R_F I_D$$

donde R_F es la resistencia de realimentación. En nuestra aplicación tiene el valor de 10^{11} ohm. Notar que:

$$(e_0 / I_D) = 0.1 \text{ volt / pico ampere}$$

2. Errores en DC

En un amplificador real, el amplificador presenta una tensión de offset e_{os} y una corriente de bias I_B tal que la tensión de salida e_0 es:

$$e_0 = -R_F (I_D + e_{os} (R_F + R_D) / (R_F R_D) + I_B)$$

$$e_0 = -R_F (I_D + e_{os} / R_F + I_B)$$

La última expresión supone que la resistencia del detector es mucho mayor que la resistencia de realimentación, lo que es usual en nuestra aplicación. Tanto e_{os} como I_B presentan corrimiento térmico. En particular I_B se duplica cada 10°C .

En consecuencia, deberá elegirse un dispositivo con muy baja corriente de bias (electrométrico) y baja tensión de offset, para que su efecto sobre la medición de la corriente de interés I_D sea despreciable.

3. Fuentes de Ruido

. Un ruido fundamental corresponde al proceso de detección, ya mencionado. Es intrínseco y debe ser considerado como parte de la señal.

. Los resistores son una fuente de ruido térmico. Una resistencia R a la temperatura absoluta T genera, entre bornes, una tensión fluctuante con valor cuadrático medio:

$$\langle (\Delta e)^2 \rangle = (e_R)^2 \Delta f = 4 k T R \Delta f$$

Donde Δf es el ancho de banda de la medición.

. El amplificador genera un ruido adicional que se debe, principalmente, a sus primeras etapas de amplificación. Se caracteriza una densidad de tensión de ruido (e_n) y en una de corriente de ruido (i_n) tal que:

$$\langle (\Delta(e_n)^2) \rangle = (e_n)^2 \Delta f \quad \text{es el valor cuadrático medio de la tensión de ruido equivalente a la entrada en } (\Delta f)$$

$$\langle (\Delta(i_n)^2) \rangle = (i_n)^2 \Delta f \quad \text{es el valor cuadrático medio de la corriente de ruido equivalente a la entrada en } (\Delta f)$$

Donde (Δf) el ancho de banda utilizado en la medición. Las cantidades (i_n) y (e_n) dependen de la frecuencia f y los datos correspondientes son dados por el fabricante. En esta aplicación deberá elegirse un dispositivo amplificador con bajos niveles de ruido a la entrada.

Las contribuciones de los diferentes tipos de ruido a la señal de salida se adicionan cuadráticamente, por tratarse de ruidos no correlacionados.

4. Un modelo realista

4.1 Respuesta temporal

El esquema muestra un modelo más realista del sistema amplificador, donde se han introducido capacidades que determinarán respuesta temporal y su comportamiento en ruido. Se observa:

. La respuesta para la señal i_s está determinada por la impedancia de realimentación $R_F C_F$. En efecto, la tensión de salida V_{os} , y el ancho de banda efectivo B de la medición están dados por:

$$V_{os} = -i_s R_F / (1 + j (f / f_p)) \quad \text{y} \quad B = (\pi/2) f_p$$

y donde

$$f_p = 1 / (2 \pi R_F C_F)$$

es la frecuencia de corte del lazo de realimentación.

Esto nos indica que la respuesta del circuito es constante para $f < f_p$ y cae con la frecuencia como $1/f$ para $f > f_p$.

Se impone así un límite práctico al tiempo de respuesta al circuito. Con $R_F = 10^{11}$ ohm y $C_F = 1$ pico farad, se tiene

$$f_p = 1.6 \text{ Hz} \quad B = 2.5 \text{ Hz}$$

como frecuencias limitantes al tiempo de medición.

4.2 Ruido

El modelo considerado permite el análisis de la contribución de e_R , i_n y e_n a la salida del amplificador, así como la influencia de la capacidad de entrada C_D , de lo que resulta que es conveniente:

- . Reducir en lo posible la capacidad C_D
- . Reducir en lo posible la contribución de e_n filtrando a la salida del amplificador las componentes de frecuencia mayor a f_p

El amplificador seleccionado es MOS y se caracteriza por tener muy baja corriente de bias I_B y muy baja corriente de ruido i_n . En estas condiciones toma importancia el ruido térmico generado por la resistencia R_F . Una resistencia de 10^{11} ohm da lugar a un ruido e_R de densidad espectral de

40 $\mu\text{volt} / \sqrt{\text{Hz}}$ tal que, con un ancho de banda efectivo $B = 2.5 \text{ Hz}$ dará lugar al ruido rms en tensión:

$$e_R (\text{rms}) = 40 (\mu\text{volt} / \sqrt{\text{Hz}})(1.6 \sqrt{\text{Hz}}) = 64 \mu\text{volt}$$

Equivalente a un ruido en corriente a la entrada $i_n (\text{rms})$

$$i_n (\text{rms}) = 0.64 \text{ femAmp}$$

10. ELECTRÓNICA DIGITAL

10.1 COMPONENTES DEL SISTEMA

En la electrónica digital se utilizan componentes comerciales para digitalizar y procesar la señal, tomar las decisiones que correspondan, exponer resultados y guardar registros históricos.

- . El bloque NI USB-6210 es la etapa de conversión analógica a digital, de salidas digitales y con comunicación con una PC.
- . La etapa electrónica Driver hace de interfaz entre los periféricos (barrera óptica, sirena, baliza) y la placa NI USB-6210.
- . Se utiliza una PC de tipo industrial (Fanless) en donde un software desarrollado especialmente procesa los datos y toma las decisiones de alarma.
- . El VGA-TX Extensor es un módulo que toma la señal VGA de la PC Fanless y la convierte a un protocolo potenciado tal que pueda ser transmitida a una distancia mayor a 100 metros. El VGA-TX Extensor la decodifica y reconvierte en señal VGA para alimentar el Monitor ubicado en la Oficina de Guardia.
- . Una UPS toma tensión de línea y alimenta todo el sistema. El botón de encendido / apagado de todo el sistema se encuentra en la UPS, y es el único punto de interacción con el usuario.
- . El sistema cuenta con dos sensores de barrera óptica, que poseen un emisor y un receptor en el mismo dispositivo y un espejo difusor colocado a distancia. La interrupción de señal de uno de esos sensores por una persona u objeto advierten al sistema que inicie el Modo Medición.
- . La señal Alarma es el resultado de una decisión, y sirve para accionar un alerta audible y luminoso en las cercanías del CIP.

10.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El sistema MPR mide en forma continua la tasa de dosis producto de la radiación de fondo. Cuando una persona u objeto pasan frente al CIP, el sistema detecta su presencia mediante la señal de la barrera óptica. En ese instante, el sistema compara la Tasa de Dosis Actual con la radiación de fondo previamente registrada. Si la Tasa de Dosis Actual supera el Umbral de Alarma, el sistema activará la señal Alarma. Si la Tasa de Dosis Actual no supera el Umbral de Alarma el sistema recupera su estado normal, en el cual registra la radiación de fondo.

. Para ello, la tensión de salida del amplificador de señal es digitalizada por un conversor analógico a digital y enviado a la PC para su análisis. Allí un software adquiere datos a alta frecuencia y aplica una serie de filtros digitales, lo que permite obtener la señal filtrada y actualizada con frecuencia de 10 Hz.

. El Fondo de Radiación se calcula en un lapso T_F tomando en cuenta los valores de la señal obtenidos en dicho lapso (T_F 2.5 minutos típico). Se calculan así el valor medio M y el valor cuadrático medio σ^2 que corresponden a ese intervalo. El Umbral de Alarma U es:

$$U = M + F \sigma$$

Y donde F es el Factor de Umbral, un número entero. El factor F se fija en 7, pero puede ser ajustado a través de un archivo de configuración.

Cada T_F el Fondo de Radiación y el Umbral de Alarma se actualizan. Si dentro de este lapso se activa la Alarma, el sistema dejará de utilizar el nivel de fondo para actualizar el Umbral de Alarma, y evitar que esta variable suba producto de irradiación generada por el tránsito.

. Las señales lógicas Umbral Superado y Barrera Interrumpida son variables binarias de nombre sugestivo, y son usadas por la lógica de MPR para determinar la activación de Alarma:

Umbral Superado: La variable toma el valor lógico 1 cuando la Tasa de Dosis Actual es mayor o igual que el Umbral de Alarma. Si la Tasa de Dosis Actual es menor que el Umbral de Alarma toma el valor lógico cero.

Barrera Interrumpida: La variable toma el valor lógico uno cuando alguno de los sensores de Barrera óptica es interrumpido. Dicha variable es una suma lógica (OR) de cada una de las barreras.

. Para que el sistema active Alarma, las señales lógicas Umbral Superado y Barrera Interrumpida deben estar en uno y el sistema aplica la operación AND a esas variables: Es decir que para que se active Alarma debe estar alguna Barrera Óptica interrumpida y la Tasa de Dosis Actual por sobre el Umbral de Alarma. Si bien es necesaria la presencia de ambas variables lógicas no es necesaria la simultaneidad estricta. Si ambos ocurren dentro de Tiempo de Inspección, Alarma se activará.

. El Tiempo de Inspección es un intervalo de tiempo dentro del cual el sistema aplica la señal lógica AND a las señales Umbral Superado y Barrera Interrumpida, aplicando auto retención en cada variable. Para que se active Alarma, ambas señales no necesitan ser simultáneas, y pueden estar temporalmente hasta un lapso igual al Tiempo de Inspección.

10.3 MONITOR

El Monitor podrá instalarse en la Oficina de Guardia, hasta 100 metros del MPR. El Monitor, junto con el botón de encendido/apagado de la UPS, son las únicas partes del equipo accesibles al usuario.

En Pantalla hay tres indicadores numéricos:

- . Tasa de Dosis Actual. Es la tasa de dosis que se está midiendo. Este indicador se actualiza a una frecuencia de 10Hz
- . Umbral de Alarma. Es el valor que al ser superado por la Tasa de Dosis actual da lugar a un uno en la variable binaria Umbral Superado. Este indicador se actualiza cada 2.5 minutos.
- . Radiación de Fondo. Es la tasa de dosis producto de la radiación de fondo. Este indicador se actualiza cada 2.5 minutos, junto con el Umbral de Alarma.

Hay en Pantalla, además, tres indicadores lumínicos:

- . Registrando Fondo. Luz verde, que se enciende cuando el sistema mide la tasa de dosis para actualizar el indicador Radiación de Fondo y Umbral de Alarma.
- . Midiendo Tránsito. Luz amarilla, que se enciende cuando se interrumpe alguno de los sensores de la Barrera Óptica.
- . Alarma. Luz roja que se enciende cuando se activa Alarma.

En Pantalla también aparece un gráfico que representa los últimos 10 minutos de la Tasa Dosis Actual en función del tiempo.

10.4 REGISTROS HISTÓRICOS

El MPR registra el fondo de radiación ambiental en forma continua. Cada 10 minutos guarda en un archivo el valor de fondo registrado junto con la fecha y hora. El MPR genera un archivo plano de texto por día, cuyo nombre es la fecha del mismo con extensión txt. Con 144 datos. Este registro del fondo es continuo y no es interrumpido aunque el sistema esté midiendo tránsito o se accione Alarma. Es decir, que el fondo registrado es lo que el detector ha recibido.

10.5 REGISTRO DE DETECCIONES

El sistema guarda en un archivo plano de texto la fecha y hora y la Tasa de Dosis de cada activación de Alarma. Los últimos datos registrados aparecen en Pantalla.

11. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido un Sistema Detector Portal, el cual se encuentra en operación, y se basa en un detector de ionización de alta sensibilidad y gran volumen de detección, con diseño y desarrollo propio. El Sistema presenta muy buenas características operacionales y puede tener un carácter modular y adaptarse para diversas aplicaciones.

12. REFERENCIAS

(1) IAEA-TECDOC-1312/S

Detección de materiales radiactivos en las Fronteras (Mayo 2004)

(2) ANSI N42.32-2006

American National Standard for Evaluation Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security (January 2007)

(3) IAEA Nuclear Security Series No. 1

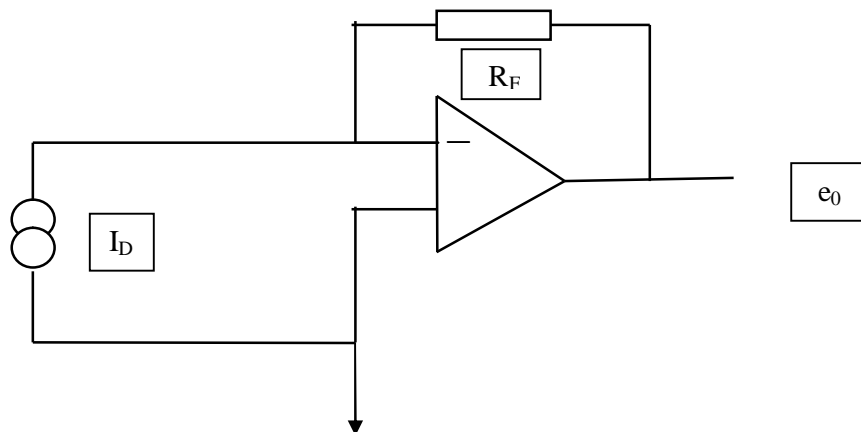
Technical and Functional Specifications for Border Monitoring Equipment (2006)

13. ANEXO 1

ELECTRÓNICA ANALÓGICA

ANEXO: ELECTRÓNICA ANALÓGICA

1. Sistema Básico



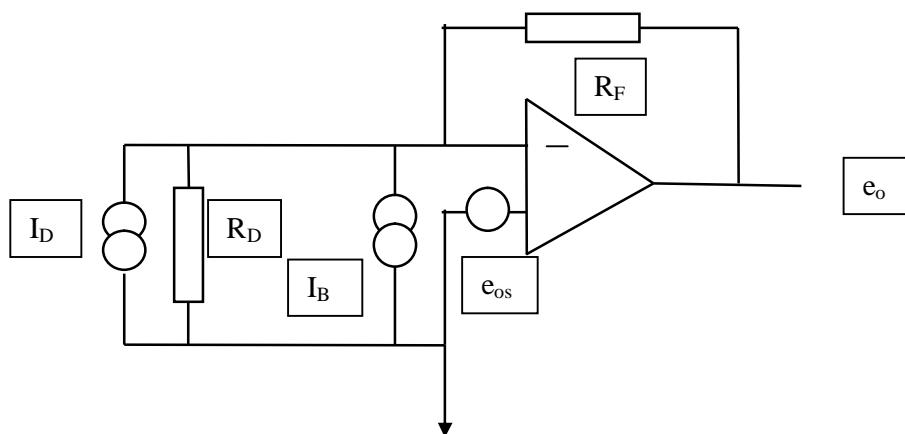
En un caso ideal, entre la tensión de salida del amplificador e_0 y la señal de corriente I_D de entrada al mismo, vale la relación:

$$e_0 = - R_F I_D$$

donde R_F es la resistencia de realimentación. En nuestra aplicación tiene el valor de 10^{11} ohm. Notar que:

$$(e_0 / I_D) = 0.1 \text{ volt / pico ampere}$$

2. Errores en DC



En un amplificador real, el amplificador presenta una tensión de offset e_{os} y una corriente de bias I_B tal que la tensión de salida e_0 es:

$$e_0 = - R_F (I_D + e_{os} (R_F + R_D) / (R_F R_D) + I_B)$$

$$e_0 = -R_F (I_D + e_{os} / R_F + I_B)$$

3. Fuentes de Ruido

. Un ruido fundamental corresponde al proceso de detección, ya mencionado. Es intrínseco y debe ser considerado como parte de la señal.

. Los resistores son una fuente de ruido térmico. Una resistencia R a la temperatura absoluta T genera, entre bornes, una tensión fluctuante con valor cuadrático medio:

$$\langle (\Delta e)^2 \rangle = (e_R)^2 \Delta f = 4 kT R \Delta f$$

Donde Δf es el ancho de banda de la medición.

. El amplificador genera un ruido adicional que se debe, principalmente, a sus primeras etapas de amplificación. Se caracteriza una densidad de tensión de ruido (e_n) y en una de corriente de ruido (i_n) tal que:

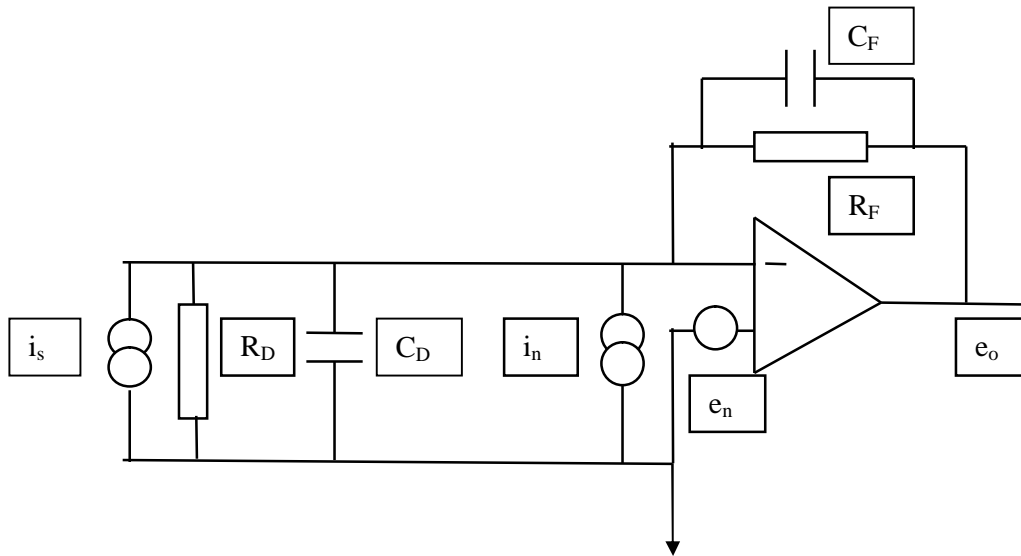
$$\langle (\Delta(e_n))^2 \rangle = (e_n)^2 \Delta f \quad \text{es el valor cuadrático medio de la tensión de ruido equivalente a la entrada en } (\Delta f)$$

$$\langle (\Delta(i_n))^2 \rangle = (i_n)^2 \Delta f \quad \text{es el valor cuadrático medio de la corriente de ruido equivalente a la entrada en } (\Delta f)$$

Donde (Δf) el ancho de banda utilizado en la medición. Las cantidades (i_n) y (e_n) dependen de la frecuencia f y los datos correspondientes son dados por el fabricante. En esta aplicación deberá elegirse un dispositivo amplificador con bajos niveles de ruido a la entrada.

Las contribuciones de los diferentes tipos de ruido a la señal de salida se adicionan cuadráticamente, por tratarse de ruidos no correlacionados.

4. Un modelo más realista



4.1 Respuesta temporal

El esquema muestra un modelo más realista del sistema amplificador, donde se han introducido capacidades que determinarán respuesta temporal y su comportamiento en ruido. Se observa:

. La respuesta para la señal i_s está determinada por la impedancia de realimentación $R_F C_F$. En efecto, la tensión de salida V_{os} , y el ancho de banda efectivo B de la medición están dados por:

$$V_{os} = -i_s R_F / (1 + j (f / f_p)) \quad \text{y} \quad B = (\pi/2) f_p$$

y donde

$$f_p = 1 / (2 \pi R_F C_F)$$

es la frecuencia de corte del lazo de realimentación.

Esto nos indica que la respuesta del circuito es constante para $f \leq f_p$ y cae con la frecuencia como $1/f$ para $f \geq f_p$.

Se impone así un límite práctico al tiempo de respuesta al circuito. Con $R_F = 10^{11}$ ohm y $C_F = 1$ pico farad, se tiene

$$f_p = 1.6 \text{ Hz} \quad B = 2.5 \text{ Hz}$$

como frecuencias limitantes al tiempo de medición.

4.2 Ruido

El modelo considerado permite el análisis de la contribución de e_R , i_n y e_n a la salida del amplificador, así como la influencia de la capacidad de entrada C_D . Los resultados del análisis de este circuito son los siguientes:

Para una señal de entrada i_s se tiene una tensión de salida V_{os}

$$V_{os} = -i_s R_F [1 / (1 + j \omega R_F C_F)]$$

Para un ruido de tensión e_n la tensión de salida V_{oen} es:

$$V_{oen} = e_n [1 + R_F/R_D] [(1 + j (f/f_z)) / (1 + j f/f_p)]$$

Para un ruido de corriente i_n la tensión de salida V_{oin} es:

$$V_{oin} = -i_n R_F / (1 + j (f/f_p))$$

La resistencia R_F , generadora de ruido térmico e_R , dará lugar, en un ancho de banda B , a un ruido total $V_{oRF} = \sqrt{4 kT R_F B}$. El ancho de banda B tiene el valor $B = (\pi/2) f_p$, y está determinado por la frecuencia f_p .

Las frecuencias características f_p y f_z tienen los valores

$$f_z = 1 / [2 \pi (R_F // R_D) (C_F + C_D)] \approx 1 / [2 \pi (R_F (C_F + C_D))]$$

$$f_p = 1 / [2 \pi (R_F C_F)]$$

Suponemos que R_F es mucho menor que R_D . Notar que f_p es una frecuencia de corte que limita el tiempo de respuesta del circuito, y también filtra las componentes de alta frecuencia del ruido i_n y de e_R .

Especial atención merece V_{oen} , pues las componentes de alta frecuencia del ruido e_n , en lugar de ser atenuadas, pueden ser muy amplificadas, y degradarían el comportamiento del amplificador.

En consecuencia, para evitar estos efectos:

- Las componentes de alta frecuencia, para frecuencias superiores a f_p , deben ser fuertemente filtradas a la salida del amplificador.
- También se debe cuidar de reducir en lo posible la capacidad C_D de entrada al amplificador. El amplificador debería ser montado directamente sobre la cabeza del detector.

Radioactivity Portal Monitor: An actual application and its unconventional detector

F. Izraelevitch(1), E. Matatagui(1), J.L. Regueiro Veiga(2)

A Radioactivity Portal Monitor is an instrument designed to be used at traffic check points to detect the presence of ionizing radiation in goods, vehicles, people, in critical places such as those at border road crossing, airports and seaports, the entrance at nuclear facilities etc. and alert the officer to the presence of radioactive and nuclear material. We have developed and built, and is in operation a Radioactivity Portal Monitor for gamma radiation. The detector and the associated electronics does not follow a conventional design concept and is based on a pressurized ionization chamber with a very large sensitive volume (60 liters) and a very large length (2 meters), and a very low level DC electronics (fAmp). The System is simple, and its operational characteristics are excellent. The reference radiation level is the background radiation, which is continuously measured, and compared with the radiation level measured when a subject (vehicle, person, good) goes trough the Monitor. The system automatically takes a decision, and alert the officer with an alarm signal if the detected radiation level is larger than the reference (dynamical) level. We will describe the designed system and some of its characterization results will be shown.