

## **Desarrollo de un medidor, en haz de rayos X, para determinar el valor ‘pico’ del Kilo-Voltaje durante disparos en equipos de radiodiagnóstico médico. Informe preliminar**

Miguel Mendoza<sup>1,\*</sup>, Edgard Valdivia<sup>1</sup>, Eduardo Cunya<sup>2</sup>, Ever Cifuentes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> División de Instrumentación, Dirección de Servicios, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Grupo de Desarrollo Electrónico, Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

### **Resumen**

Se presenta los avances del desarrollo de un prototipo medidor de pico del kilovoltaje de los equipos de radiodiagnóstico médico, que de manera similar a los equipos comerciales no solo mida el kVp, sino también mAs, s, mA., etc., pero sacrificando un poco su precisión y bajando significativamente el costo. El método empleado toma 2 señales desde fotodiodos PIN, proporcionales a la intensidad de los rayos X: detectadas bajo distinto espesor de filtro de Cu, y que se muestrean, digitalizan y guardan en memoria –muestra a muestra– para luego computar los respectivos cocientes de sendas muestras, a fin de servir de dominio a una tabla basada en una precisa relación de tales cocientes con el kV, relación que es: directa con la diferencia de espesores de Cu, ... e inversa con el logaritmo de los cocientes. Se usará el avanzado microcontrolador (en ‘Kit USB’) Xmega64 de ATMEL a fin de aprovechar un diseño desarrollado el año 2008 en esta línea.

### **Development of a kVp meter for operational control of radiodiagnostic X-ray equipment**

#### **Abstract**

This development assumed half 2010 seeks to build a prototype of kVp meter, little lowering the normal precision, and strongly the price: for a X-ray operator market. 2 PIN photodiodes intensity signals detected behind 2 different thick Cu filters are sampled, digitalized, stored and processed by an ATMEL Xmega64  $\mu$ -controller.

## **1. Introducción**

Estudios preliminares realizados en el IPEN el año 2008 [1] desarrollan elementos para lograr un medidor –en haz de rayos X– del ‘pico’ máximo a que sube el Kilo-Voltaje de ‘disparo’ en equipos de radiodiagnóstico, pero sin completar el método requerido; por ejemplo, aquel de uso común en los actuales medidores comerciales basados en igual principio (detección por fotodiodos PIN, proceso analógico de señal, su conversión a digital y, luego su proceso y presentación digital mediante microcontrolador AVR).

Las ‘mediciones de kVp’ entonces señaladas eran necesariamente de alcance limitado para este desarrollo. Mas el valor de lo actuado y acopiado resalta al notarse que la realización del método completo no requiere muchos más componentes que lo propuesto en [1], y notar también que una precisión suficiente

(3%) para los fines aquí propuestos, es abordable y permitiría patentar un prototipo factible de producirse y comercializarse en el exterior a menos de S/.1,500 (unos US\$ 500), contra los S/.15,000 (US\$ 5,000) que valen los equipos importados de precisión –para inspección– en el mercado internacional y S/. 24,000 (US\$ 9,000) en Lima.

## **2. Desarrollo**

### *2.1 Principio electrónico y método de medición*

El principio del prototipo es la detección de los rayos X con fotodiodos PIN, proceso análogo de señal, su conversión A-D, almacenaje, procesamiento y presentación digital de resultados: mayormente, mediante un microcontrolador AVR.

---

\* Correspondencia autor: mmendoza@ipen.gob.pe

El método para obtener los valores kVp ocurridos durante los disparos prevé la medida diferencial *on-line* de intensidades [3,4] mediante 2 detecciones cuyas cargas darán 2 señales de corriente proporcionales a la intensidad X: una central  $\alpha_1$  vía 2 a 4 fotodiodos BPW34 ‘en paralelo’, tras ‘filtraje’ de cobre del orden de 1 mm de espesor o menos; y una detección anular  $\alpha_2$  periférica a la central: con 5 a 8 fotodiodos ‘en paralelo’, tras ‘filtro’ de cobre del orden de 1.5 mm de espesor (dentro de un diámetro igual o menor a 5 cm).

Para trabajos en rango alto de energías X –entre 65 y 125 kV se podrá sumar a los anteriores filtros 1 o 2 mm más de cobre, obturándoles manualmente otra placa de cobre– también altamente puro y de fácil obtención como el de los otros 2 filtrajes.

Las dos corrientes ‘intensidad’:  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , luego de convertidas a voltios y amplificadas por sendos circuitos como el de la (Figura 1) ingresarán al AVR por sendas entradas analógicas de su ‘puerto Mux/ Adc’ para su muestreo, conversión análogo-digital y almacenamiento separados, y el posterior cómputo de su cociente, que luego será ‘alimentado’ como dominio o abscisa de una función polinómica de 5° orden [4], tabulada y ajustada a la ecuación (1) con alta correlación (error  $\leq 3 / \text{mil}$ ) y calibrada con datos obtenidos en la práctica (de medidas patrón y del cómputo de dicha ecuación).

Newell y Henry [3] demuestran que [4]:

$$kVp = \frac{C_1 \cdot \Delta X}{C_2 \cdot \ln(S_1 / S_2)} \quad (1)$$

Donde  $\Delta X$  es la diferencia de espesor de los filtros para las detecciones 1 y 2 (o corrientes  $\alpha_i$ );  $S_1$  y  $S_2$  son las señales (de voltaje análogo) amplificadas a partir de las respectivas detecciones  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ .  $C_1$  y  $C_2$  son constantes que dependen de la composición y espesor de los filtros.

Las intensidades suman y promedian el aporte y energía para cada rayo X detectado pese a que el monto de cada energía contiene –en los mayores montos– el valor del kVp. Por ello, de una o ambas detecciones  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , se implementará una detección de cargas:  $\beta_i$ , (más veloz) carga-por-carga de interacción

fotoeléctrica detectada: vía un adecuado pre-amplificador sensible a cargas integrado (PSC) como los CR11X (CREMAT).

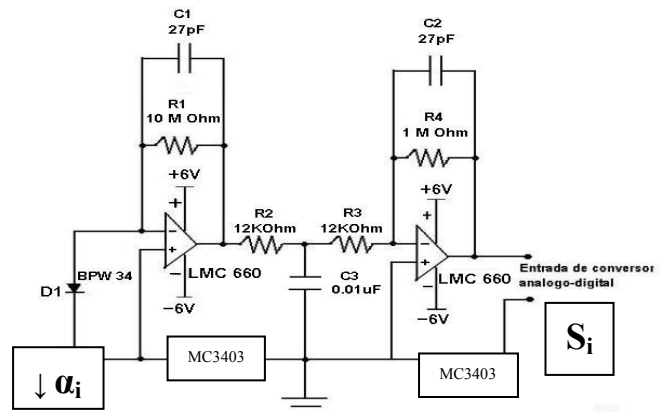


Figura 1. Circuito amplificador individual con las ganancias ya ajustadas.

Este dará pulsos analógicos de altura proporcional a cada carga de interacción fotoeléctrica detectada, cada energía –en KeVs o kVs– de fotón detectado en pulso de carga  $\beta_i$ , cual escalones de voltaje: ‘descargados en exponencial decreciente (‘polo’) a cuya secuencia llamaremos ‘señal física’ o  $\Phi$ , la que en un desarrollo futuro será amplificada tras compensación de polo con cero: ajustable (señal  $\Phi_A$ ), para ir a un amplificador analógico parcial ‘biased’ que seleccione solo pulsos de altura superior a un nivel: regulable entre 50 y 90% (aprox.) del rango de altura de pulsos de trabajo (señal  $\Phi_S$ ). Las alturas de pulso en las secuencias  $\Phi$ , al igual que el monto de las cargas  $\beta_i$  y las energías de todos los fotones de rayos X detectados: conllevan la conocida distribución estadística ‘continua’ del ‘frenado de corriente’ en el tubo de rayos X o de Bremsstrahlung [5], cuyo máximo valor es el kilovoltaje real presente. Así, al procesar estas señales con un sistema multicanal externo[5] o interno, se puede determinar con precisión el valor del kVp.

Así, la señal  $\Phi_S$ , eventualmente ingresaría por otra entrada analógica de Mux/ Adc del AVR: para su retención de pico (mayor valor en cada pulso), su conversión analógico-digital del pico y suma de una cuenta en la posición ‘almacenaje’ en memoria del rango numérico en que cae cada retención numérica individual (acumulación de espectro de amplitudes). Se podría también –eventualmente– recurrir a un conversor tipo

Wilkinson especial o externo para acumular el espectro. Si se calibra en energía tal espectro bastan pocos canales de su parte más alta para que el controlador determine de ellos el kVp [5] con precisión, en un futuro desarrollo.

2.2 Diagrama de bloques del prototipo de medidor de kVp

En la Figura 2 se esquematiza en bloques, las partes que compondrán el prototipo cuyo desarrollo se describió en párrafo anterior.

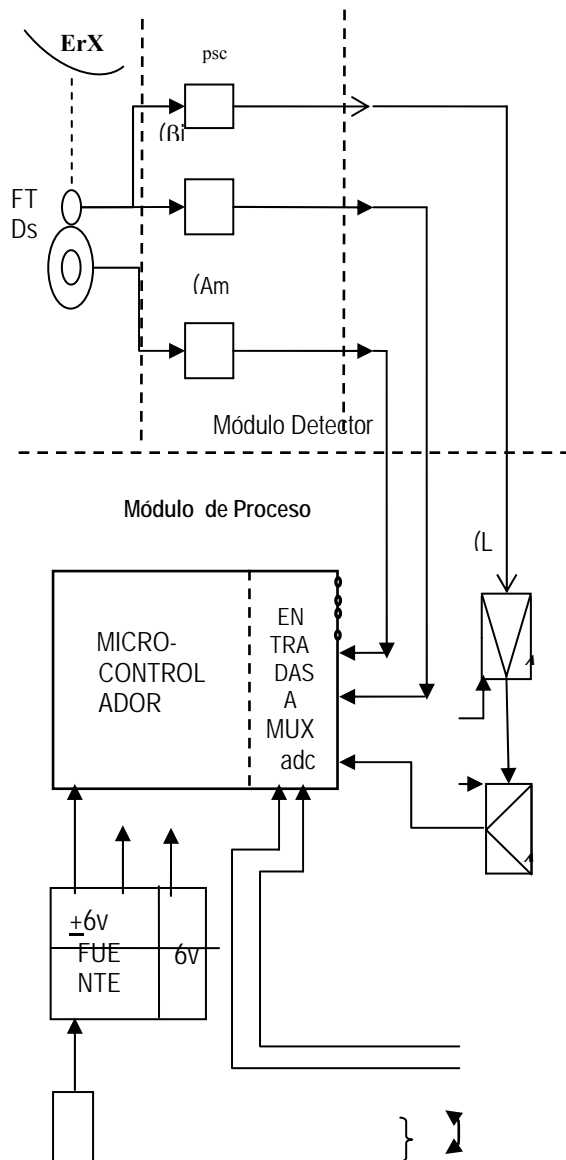


Figura 2. Diagrama bloques para el Prototipo en Desarrollo, en el que las abreviaturas se aclaran como sigue:

- ErX = Equipo emisor de rayos X
- FT Ds = Filtros y arreglos (2) de fotodiodos

2.3 Presentación y proceso digital

Las indicaciones operativas y los resultados se presentarán digitalmente mediante un visor (display) LCD de 2 líneas y 20 columnas.

Todos los valores numéricos resultantes del muestreo y conversión análogo-a-digital de  $S_1$  y  $S_2$  así como de los 'kV' obtenidos serán retenidos en secuencia –como 'formas de onda primarias'– en la memoria del microcontrolador AVR. Desde ella, usando sumas y restas, 'matrizado de Hamard' bajo algoritmo de Plackett-Bonman, rutinas fit-peak u otros, el microcontrolador podrá obtener secuencias 'alisadas' en 2 o 3 'formas de onda secundarias': de intensidad de rayos X y de kV's) desde donde, mediante una rutina adecuada, se pueda proporcionar los valores de intensidad, mAs, kVp, etc, que requiera el operador al medidor de kVp (manualmente) o desde una PC externa por interfase USB.

Tanto el espectro de la señal  $\phi_S$  como las 'formas de onda' primarias y secundarias de  $S_1$ ,  $S_2$  y kV adquiridos o acumulados durante un 'disparo', y 'alisados' podrán ser interrogados, copiados y procesados desde un computador externo (Notebook, PC de inspección-control patrón) mediante un programa para Windows en CD que será parte del prototipo medidor de kVp y que actuará a través de una interfase USB entre la Lap-Top y el prototipo, manejada por su correspondiente rutina interna.

El diseño físico del prototipo es circular para optimizar el aprovechamiento de los espacios y facilitar su estructura modular, montaje, desmontaje, servicio y desarrollo posterior. Los fotodiodos PIN de detección están en un módulo central extraíble y sobre circuito impreso circular de doble cara: del mismo lado (superior) que un integrado cuádruple como el MC 3403 o el LMC660 (que amplifica  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ ) con sus componentes externos asociados (Figura1), mientras en la cara inferior irán el PSC y sus respectivos componentes externos. Este módulo central se enchufa a una tarjeta de procesamiento mediante 3 conectores RCA que llevan hacia la misma:  $\phi$ ,  $S_1$  y  $S_2$ , para allí convertir  $\phi$  en  $\phi_A$  y  $\phi_S$  e introducir esta última -así como  $S_1$  y  $S_2$ - a sendas entradas analógicas para CAD del  $\mu$ controlador (o a un eventual conversor

externo 'Wilkinson' para  $\Phi_S$ ). Prima en la tarjeta de procesamiento el uso de componentes 'de montaje en superficie'. El módulo central también se enchufa al circuito 'de fuentes de alimentación' (adjunta a la tarjeta o módulo de procesamiento del prototipo) mediante 3 conectores tipo 'banana' que le proveen alimentación de +6v, -6v, y 0v.

El circuito de alimentación elabora y regula 3 salidas de voltaje de alimentación (+5v,+6v, -6v) desde 1 banco de baterías de 9 v de NiCd, Ni Mh o PB, con capacidad de carga máxima entre 2.5 y 5 A-h, que brindarán voltajes entre 6 y 10 voltios, una vez recargadas a partir de una entrada coaxial para cargador 220vac a 9vdc, 0.5 A.

#### 2.4 Estándar de calidad del desarrollo

Aunque en el desarrollo básico de la ingeniería se han tenido en cuenta criterios para la máxima calidad del diseño, solo por experiencia el desarrollo del detalle, aún en curso, procura ajustarse a las Normas ISO 2000/2001 aplicables, implementando lo necesario a fin de eliminar o minimizar los vicios de origen en el diseño, que atenten contra la calidad del producto, fabricación o su funcionamiento. Al respecto, se tiene en cuenta la optimización de los siguientes aspectos del estándar de calidad:

*Responsabilidad organizacional:* En cuanto a definición, efectividad, respuesta y eficiencia de las políticas y autoridades con mando organizacional sobre los responsables del diseño, y los de la gestión de la calidad del diseño.

*Procedimientos de control y verificación del diseño:* En cuanto a su existencia y capacidad para asegurar que se cumplan los requerimientos específicos del producto.

*Planificación y desarrollo del diseño:* En cuanto a la existencia, elaboración de planes -y su actualización con el avance del diseño- que señalen responsabilidades en cada actividad del desarrollo, describiendo o haciendo referencia a las mismas, donde se incluyen la asignación de actividades, relaciones organizacionales y técnicas, etc.

*Insumos para el diseño:* En cuanto al establecimiento por escrito de los requisitos que son punto de partida para el diseño:

seleccionándolos, clasificándolos para resolver con las partes responsables, los incompletos, ambiguos o conflictivos.

*Resultados del diseño:* En cuanto a la documentación de los resultados, expresado en términos de requerimientos, cálculos y análisis, satisfaciendo todos los requerimientos de los insumos del diseño, estableciendo los criterios de aceptación, satisfaciendo las disposiciones reglamentarias aplicables -incluso posteriores al inicio-, identificando las características más críticas del diseño para la función y la seguridad.

*Verificación del diseño:* En cuanto a la planificación y establecimiento -por escrito- por parte de la organización de las actividades del personal calificado, asignado a la verificación del diseño y avances.

*Cambios de diseño:* En cuanto a establecer y mantener los procedimientos para la identificación, registro, revisión y aprobación adecuada de todos los cambios y modificaciones del diseño.

*Control de documentos:* En cuanto al establecimiento de procedimientos de control para la aprobación, distribución y archivo de todos los documentos y datos relacionados a los requisitos de norma de calidad, y para registro y archivo adecuado de los cambios y/o modificaciones de los documentos mismos, listas maestras de documentos, etc.

*Compras:* En cuanto al aseguramiento de la conformidad de las compras a los requisitos especificados, evaluación de subcontratistas y proveedores, descripción clara del producto adquirido en los documentos de compra y la verificación del producto.

#### 2.5 Desarrollo actual y avances

Los trabajos de desarrollo se inician con el montaje del módulo detector y filtros circulares en circuito impreso igualmente circular que se aprecian en las Figuras 3 al 5, se aprecian abajo los filtros de Cu puro: con espesor menor en el círculo sobre el arreglo central de fotodiodos (focal, para los rayos X). En la Figura 3 los filtros de Cu puro, con espesor menor en el círculo sobre el arreglo central de fotodiodos (focal, para los rayos X).

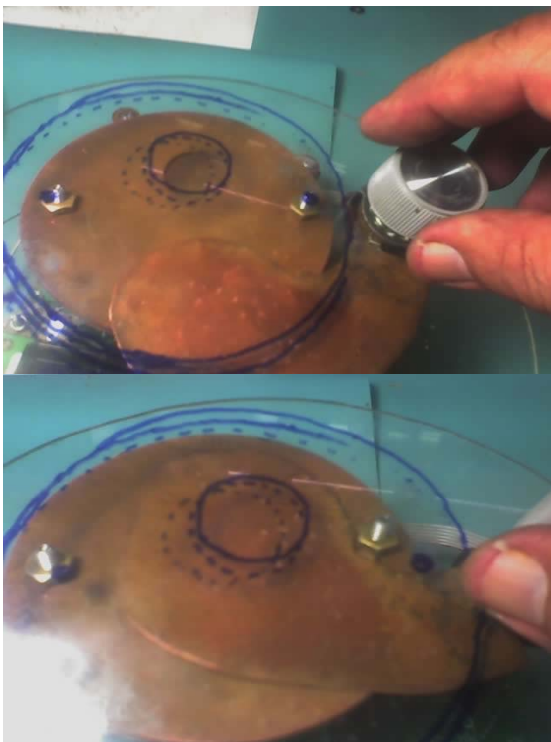
3a



3b



**Figura 3.** Foto del módulo detector extraíble: En vista superior (donde recibe los rayos X).



**Figura 4.** Foto del módulo detector extraíble con su obturación manual de filtro adicional para el rango de altas energías (65-125 keV).

La densidad del Cu es solo 15% menor que el Pb, así el Cu es útil para separar los 2 grupos de detectores, como se puede apreciar en la Figuras 5.



**Figura 5.** Fotos internas del Módulo detector y sus fotodiodos PIN y colimadores concéntricos de Cu.

Para fines de ensayo se consiguió una fuente sellada de rayos X y Gamma de baja energía (16.4 keV @ 12% em, 43.6 keV@0.05%em, 99.85 keV @ 0.0007%/em), Figura 6 donde se observa en su montaje de seguridad portable, que obtura con botón manual externo su colimación (blindaje de iridio), dando total seguridad a los 24.5 mCi de  $^{238}\text{Pu}$  (30mCi al 19 Dic.1980).



**Figura 6.** Fuente radiactiva de rayos X 40-99 keV.



**Figura 7.** El módulo detector es extraíble y se conecta mediante 3 conectores (Fuentes) “tipo banana” y otros 3 conectores tipo RCA (Señales).



**Figura 8.** El Visor (Display) LCD de 20 x 2 se conecta a similar (y más simple) ‘Port C’ del Xmega 64, como se ve en el Atmega32.

El desarrollo del software del microcontrolador para el manejo del visor LCD resulta más simple en un lenguaje básico como el Bascom AVR, mientras que para la implementación del procesamiento de datos de medición y control se puede usar lenguajes de alto nivel como el “C” (para desarrollar las rutinas fuente).

### 3. Agradecimientos

Al MsC Mario Mallaupoma, Lics. Álvaro Aguirre y Walter Cruz de la Div. de Gestión de Residuos radiactivos. Al Ing. Enoc Mamani y Tco. José Maguiña de la Div. de Industria e Hidrología. Al Tco. Ángel Revilla de la Div. de Reactores Nucleares. A la Lic. Paula Olivera de la Div. de Técnicas Analíticas Nucleares y a todo el personal de la División de Instrumentación Nuclear del IPEN por sus aportes y facilidades de equipos y laboratorios.

### 4. Bibliografía

[1] Cunya E, Cifuentes E, Ruíz R, Valdivia E. Medidor digital de alto voltaje no invasivo para generadores de rayos-X de uso médico. Informe preliminar. En: Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe Científico Tecnológico 2008. Lima: IPEN; 2009. p. 228-230.

[2] Mendoza Miguel. Informe Técnico N° 01D-2010-MAMB. Junio 2010. [Informe interno].

[3] Newell RR, Henry GC. Measuring X-ray kilovoltage by absorption in two filters. *Radiology*. 1955; 64:88-93.

[4] Nali IC. Desenvolvimento de um protótipo para determinação da kVp em procedimentos de controle de qualidade em radiodiagnóstico médico e odontológico. [Tesis MsC]. Ribeirão Preto, SP, Brasil: Universidad de Sao Paulo. Departamento de Física Matemática; 2005.

[5] Silva M, Lammoglia P, *et al.* Determinação da tensão aplicada a tubos de raios X a través do espectro de Bremsstrahlung obtido com um fotodiodo PIN. *Revista Brasileira da Engenharia Biomédica*. 2000; 6(1):13-20.