

Desarrollo de un sistema de medición de potencia para reactor nuclear RP-10 utilizando radiación de Cherenkov

Eisenk Benancio^{1,*}, Emilio Veramendi¹, Francisco Quiñones²

¹Instrumentación y Control, Dirección de Producción, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú.

²Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Callao, Juan Pablo II 306, Bellavista, Callao, Perú.

Resumen

Se presenta los resultados del estudio sobre medición de la potencia de un reactor nuclear de investigación mediante tratamiento de imágenes con python utilizando una cámara de 1080 pixeles y Raspberry Pi 3 para medir la intensidad del resplandor azul producido a causa de la radiación de Cherenkov.

Palabras clave: Radiación de Cherenkov; Tratamiento de imágenes; Python; Raspberry Pi 3

Development of a power measurement system for RP-10 nuclear research reactor using Cherenkov radiation

Abstract

The results of the study on the measurement of the power of a nuclear research reactor by image processing with python using a 1080-pixel camera and raspberry Pi 3 are presented, to measure the intensity of the blue glow produced by Cherenkov radiation.

Keywords: Cherenkov radiation; Image processing; Python; Raspberry Pi 3

1. Introducción

En un reactor nuclear no hay límite para alcanzar los niveles de potencia y las condiciones de operación vienen determinadas más por limitaciones tecnológicas que por factores propiamente nucleares [1]. Para garantizar la seguridad nuclear se debe tener los sistemas adecuados para medir la potencia, en la medida de lo posible redundantes y diversos.

La potencia de un reactor nuclear es proporcional a la cantidad de fisiones nucleares y es determinado por el flujo de neutrones; por esa razón, el control de operación, puesta en marcha, funcionamiento a cualquier nivel de potencia o SCRAM va a ser determinado variando el flujo neutrónico por las barras de control que capturan los neutrones con facilidad.

Conocer la potencia operación no solamente es vital para la operatividad del reactor nuclear, sino también por la seguridad nuclear, radiológica y técnica, debido a que

permite fijar límites a los parámetros de seguridad, los niveles de alarma y el tiempo a la que van a estar expuestas las muestras a irradiar [2].

La medición de la potencia en un reactor y el monitoreo de su comportamiento en función del tiempo es fundamental para determinar los tiempos de irradiación de una muestra y se realiza a través de la corriente del canal de marcha 4 a través del isótopo nitrógeno 16 [3,4] calculando la potencia térmica.

En la operación del reactor, debido a la emisión de partículas beta de muy alta energía producto de la fisión, se produce en torno al núcleo del reactor un resplandor azul, siempre y cuando su velocidad sea mayor a la velocidad de la luz en dicho medio. Este fenómeno conocido como efecto Cherenkov también es observado en el reactor nuclear RP-10 y es una radiación electromagnética de luz visible de color azul, el cual aumenta de intensidad en función de la potencia del reactor.

El objetivo de este estudio es medir la intensidad de la radiación de Cherenkov, contrastando con alguno de los sistemas de

* Correspondencia autor: pbenancio@ipen.gob.pe
ORCID Id <https://orcid.org/0000-0002-7849-9847>

medición de potencia y hallar un algoritmo que permita medir la potencia del reactor nuclear RP-10 por otro principio para tener una mayor diversidad de sistemas de medición de potencia.

2. Generación del efecto Cherenkov

En los reactores de investigación «tipo piletta», cuando el reactor opera a potencias superiores a 100 kW [5] o en las piscinas de almacenes subacuáticos de elementos combustibles gastados de reactores de potencia se observa en el agua un resplandor azul característico en torno a su núcleo, que se conoce como radiación de Cherenkov o Cerenkov.

Este tipo de radiación recibe el nombre del físico soviético Pavel Alekseyevich Cherenkov, quien junto con el físico Sergéi Ivánovich los descubrieron al observar la emisión de luz azul de una botella de agua sometida a un bombardeo radiactivo de un reactor en 1934, el cual le valió el premio Nobel de Física en 1958 [5].

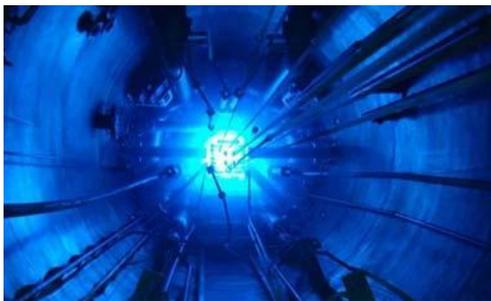


Figura 1. Efecto Cherenkov en el reactor RP-10 a 4,7 MW.

Uno de los dos postulados de la teoría de la relatividad de Einstein sostiene que la velocidad de la luz en el vacío es un límite cósmico, es decir que la velocidad de la luz desempeña el papel de una velocidad límite que no puede alcanzar ni sobrepasar ningún cuerpo real [6,7].

La velocidad de la luz en materiales transparentes como el agua o vidrio no es la misma que en el vacío, su velocidad es menor debido al índice de refracción del material. La velocidad en un material se calcula mediante [8]:

$$v_m = \frac{c}{n}, \quad (1)$$

De donde c es la velocidad de la luz y n es el índice de refracción del material. Para el agua que tiene índice de refracción 1.33 a 20 °C [8], la velocidad de la luz viene a ser 225 000 km/s.

La radiación de Cherenkov ocurre cuando las partículas, como los beta de muy alta energía, emitidas debido a los productos de fisión [5,9] se propagan en un medio transparente como el agua con una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio (aunque menor al vacío).

La explicación en este caso es el siguiente: cuando una partícula beta se mueve al interior del agua a velocidades menores a 225 000 km/s modifica su campo eléctrico alrededor; es decir, los electrones más externos de los átomos cercanos son repelidos y se alejan, y cuando ya hayan pasado, regresan a su posición inicial debido a la atracción del átomo creando un movimiento vaivén en los electrones circundantes. Cuando la velocidad de la partícula beta es mayor a 225 000 km/s, la velocidad de la partícula está superando la velocidad de la luz en el agua, por lo que las ondas electromagnéticas no tienen tiempo de alejarse antes que se genere la siguiente onda electromagnética, comenzando a superponerse una encima del otro, generando la radiación de Cherenkov.

Entonces, la radiación de Cherenkov son radiaciones electromagnéticas de distintas frecuencias fundamentalmente ultravioleta, pero también tiene frecuencias suficientes para ser radiación visible, porque podemos ver el resplandor, muy cercanas al color violeta, debido a que la característica de la radiación de Cherenkov es color azulado [1,5,9].

3. Desarrollo experimental

3.1 Selección de hardware

Se utilizó una cámara web de 1080 píxeles, una Raspberry Pi 3 model que se instaló en el hall del reactor a 1 metro de la boca de tanque y mediante su salida HDMI permite visualizar la información en una pantalla ubicada en la sala de control.

3.2 Desarrollo del software

La imagen adquirida por una cámara de video brinda como información una matriz

conformada por la coordenada y la intensidad de cada pixel de la imagen en dicho punto y en RGB se obtiene una matriz por cada color básico; es decir, se obtiene una matriz de capas roja, verde y azul que en conjunto forman todos los colores.

En el programa solo se toma la capa de color azul debido a que el efecto Cherenkov tiene esa luminosidad intensa y se desactiva las otras. Luego, se saca el promedio de la escala de azules de todos los pixeles que van desde 0

hasta 255. Luego, al promedio de escala de cada uno de los pixeles de la capa azul la definimos como la variable de escala de Cherenkov que va a permitir medir la potencia del reactor nuclear RP-10.

El rango de la escala va de 0 hasta 255 y la resolución depende de la cámara de video. Esta escala y resolución se define como escala de Cherenkov, pero no para el sistema de medición de potencia para el reactor mediante el efecto Cherenkov.

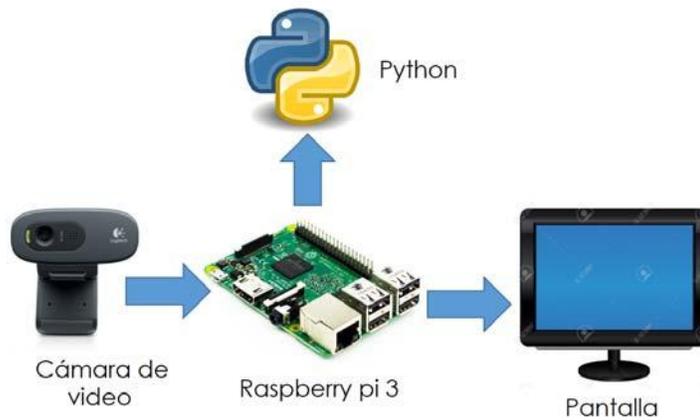


Figura 2. Diagrama general del proyecto.



Figura 3. Instalación de la cámara de video en boca de tanque del reactor RP-10.



Figura 4. Pantalla LCD de 9 pulgadas en la instalación.

La instalación se realiza a 1 metro de boca de tanque, con la cámara de video instalada en el puente de mecanismos tal como se muestra en la Figura 3, que enfoca el núcleo del reactor.

4. Resultados y discusión

4.1 Resultado de los sistemas de medición de potencia actuales

Para el análisis estadístico, el control de la potencia del reactor nuclear y la comparación se realiza tomando como referencia el sistema de medición por nitrógeno 16, se analiza este sistema con respecto a los otros dos sistemas de medición.

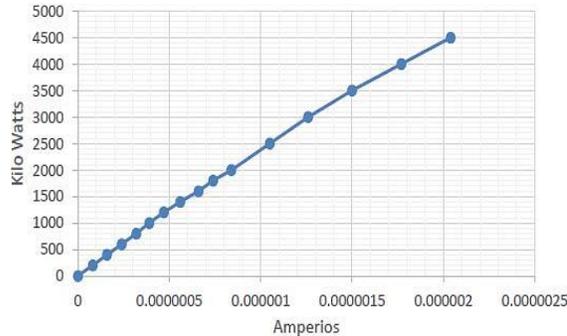


Figura 5. Gráfica del sistema de potencia N16 versus corriente de marcha 4.

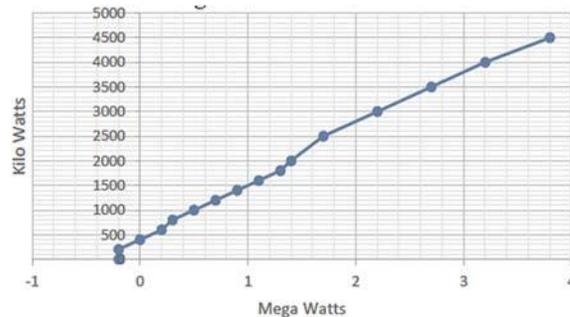


Figura 6. Gráfica del sistema de potencia N16 versus potencia térmica.

La Figura 5 muestra el comportamiento que los sistemas de medición de potencia por corriente de marcha 4 y nitrógeno 16 tienden a ser lineales.

La determinación de la potencia del reactor nuclear RP-10 es mediante la potencia térmica y a partir de esta se realiza la calibración de los otros sistemas de medición. En la Figura 6 se muestra que la potencia térmica tiende a ser lineal a partir de 2 MW.

4.2 Resultados de la escala de Cherenkov

Los resultados se obtienen de forma experimental durante una operación del reactor RP-10 subiendo a distintos niveles de potencia y manteniéndolo estable a una potencia determinada para poder tomar los datos.

Una vez estabilizado la potencia se toma 10 datos del sistema desarrollado mediante el efecto Cherenkov en la escala definida como escala de Cherenkov.

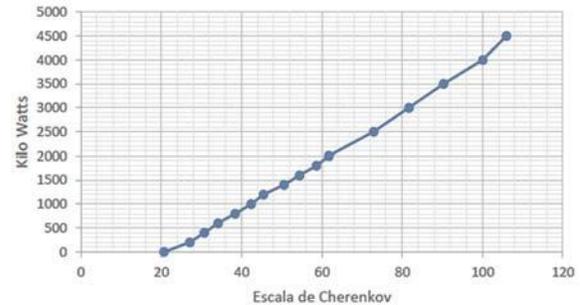


Figura 7. Gráfica sistema de potencia N16 versus Escala de Cherenkov.

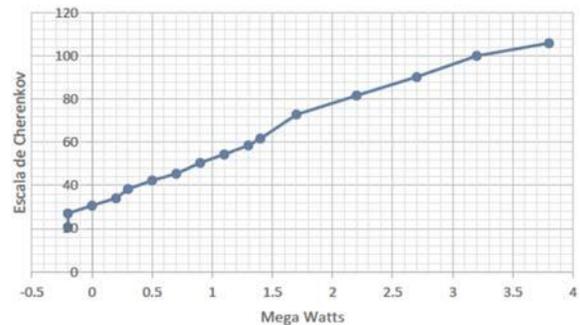


Figura 8. Gráfica Escala de Cherenkov versus potencia térmica.

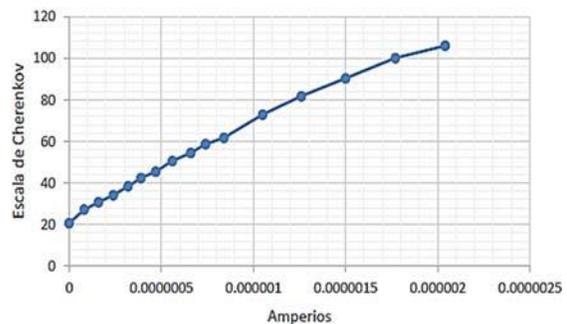


Figura 9. Gráfica Escala de Cherenkov versus corriente de marcha 4.

En la Figura 7 se muestra que la escala de Cherenkov y la potencia por nitrógeno 16 tiende a ser lineal. Las Figuras 8 y 9 nos muestra que la escala de Cherenkov tiene un comportamiento similar al comportamiento del sistema de medición de potencia por nitrógeno 16, respecto de los otros sistemas de medición de potencia como se muestra en las Figura 5 y 6.

Por el comportamiento casi lineal con la escala de Cherenkov se calcula una ecuación para poder medir la potencia, en watts, mediante la escala de Cherenkov a partir de la Figura 7:

$$P. Chrkv = (Esc. de Chrkv) \times 52.151 - 1200.9$$

El monitoreo de la potencia para la prueba se realizó a través del sistema de medición de potencia por nitrógeno 16.

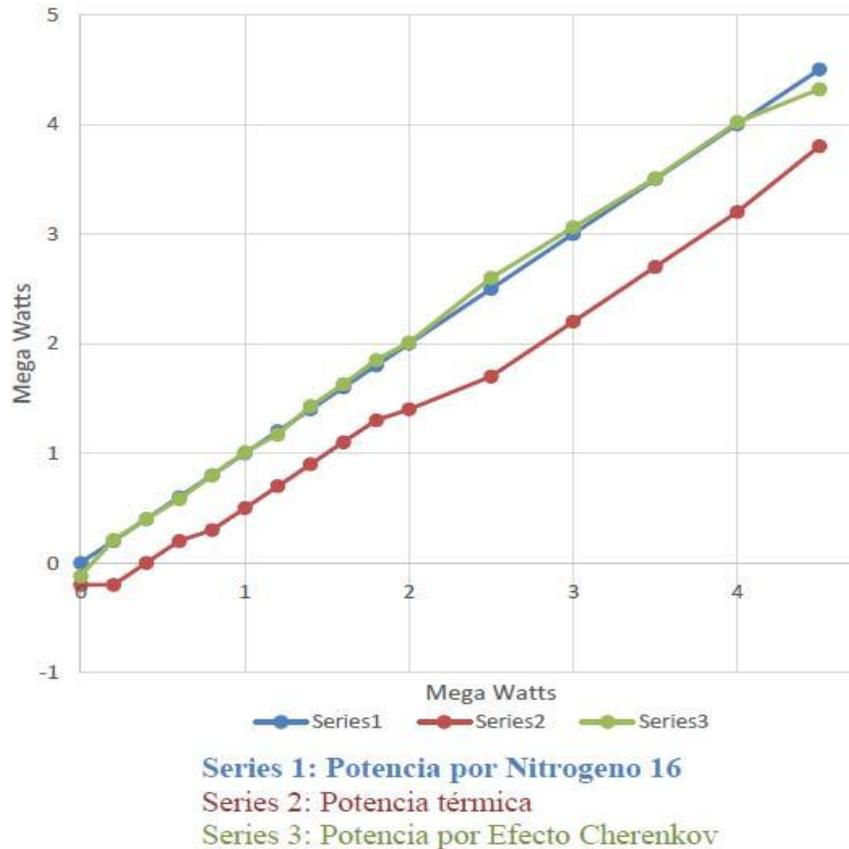


Figura 10. Resultado del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov respecto de los otros sistemas.

5. Conclusiones

Se logró desarrollar un sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov, como una alternativa para las mediciones de potencia en el reactor nuclear RP-10, cumpliendo con el objetivo principal del proyecto.

Al promedio de todos los píxeles de la capa azul en RGB obtenidos por tratamiento de imágenes del resplandor azul del efecto Cherenkov se le denominó escala de Cherenkov, que a una potencia de 4.5 MW alcanza los 105.943 con el cual es posible medir la potencia del reactor RP-10.

Este sistema mejora la seguridad nuclear, radiológica y técnica, porque a operaciones a

baja potencia permite no solo el monitoreo mediante corriente de marcha 4, sino también mediante el sistema de medición de potencia por el efecto Cherenkov. Además, para operaciones a potencia se tendrán 4 sistemas de medición que van a permitir monitorear la potencia del reactor RP-10 aumentando su fiabilidad y disminuyendo la tasa de fallas.

Con el sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov se puede monitorear la potencia del reactor en todos sus rangos de potencia desde el inicio de la operación, desde una baja potencia hasta alcanzar la máxima potencia nominal de diseño. Sin embargo, debido a la autorización de la operación, las pruebas se realizaron solo hasta alcanzar los 4.5 MW, por lo que este

sistema de medición de potencia mediante la radiación de Cherenkov es válido solo hasta 4.5 MW de potencia.

6. Agradecimiento

Al jefe del reactor nuclear RP-10 Roberto Giol, al personal de operación y radioprotección: Alberto Salazar, Rolando Arrieta, Edgar Ovalle, Dionisio Canaza, Agustín Urcia, Sandro Sánchez, Junior Olivares, Yaela Beraun, Santiago Ticona, Fernando Ramos y Mariano Vela por su apoyo y las facilidades brindadas para realizar los experimentos.

7. Referencias

- [1] Glasstone S, Sesonske A. Ingeniería de reactores nucleares. Editorial Reverte, S.A. España, 1975.
- [2] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de Seguridad del RP-10. Capítulo V: El reactor. Informe Interno. Lima, junio 2011.
- [3] Félix J, Vela M, Arrieta R. Monitoreo de potencia del reactor RP-10 mediante la medición de la actividad del ^{16}N : Avances de proyecto. Informe Científico Tecnológico. 2011; Volumen 11:62-66.
- [4] Lázaro G, Bruna R, Vela M, Parreño F. Implementación de monitorización de la potencia del RP-10 por ^{16}N . Informe Científico Tecnológico. 1998–2001, pág. 112-113.
- [5] Fernández Carlos. Una mirada al efecto Cherenkov. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA. Argentina. 2016.
- [6] Lorentz HA, Einstein A, Minkowsky H, Weyl H. The principle of relativity: A collection of original memoirs on the special and general theory of relativity. Dover Publications, INC. United States This Translation First Published in 1923.
- [7] Saavedra Igor. Física de partículas. Unión Panamericana Washington DC. 2da edición, 1978.
- [8] Fishbane Paul, Gasiorowicz Stephen, Thornton Stephen T. Física para ciencias e ingenierías. Volumen II. Prentice-Hall Hispanoamérica. México, 1974.
- [9] Agustín. Grau. La Radiación Cherenkov en Sistemas no Triviales. Editorial CIEMAT. Madrid 2002.
- [10] Organismo Internacional de Energía Atómica. Seguridad de los reactores de investigación. Colección de Normas de Seguridad DS272. Viena, 2004.