

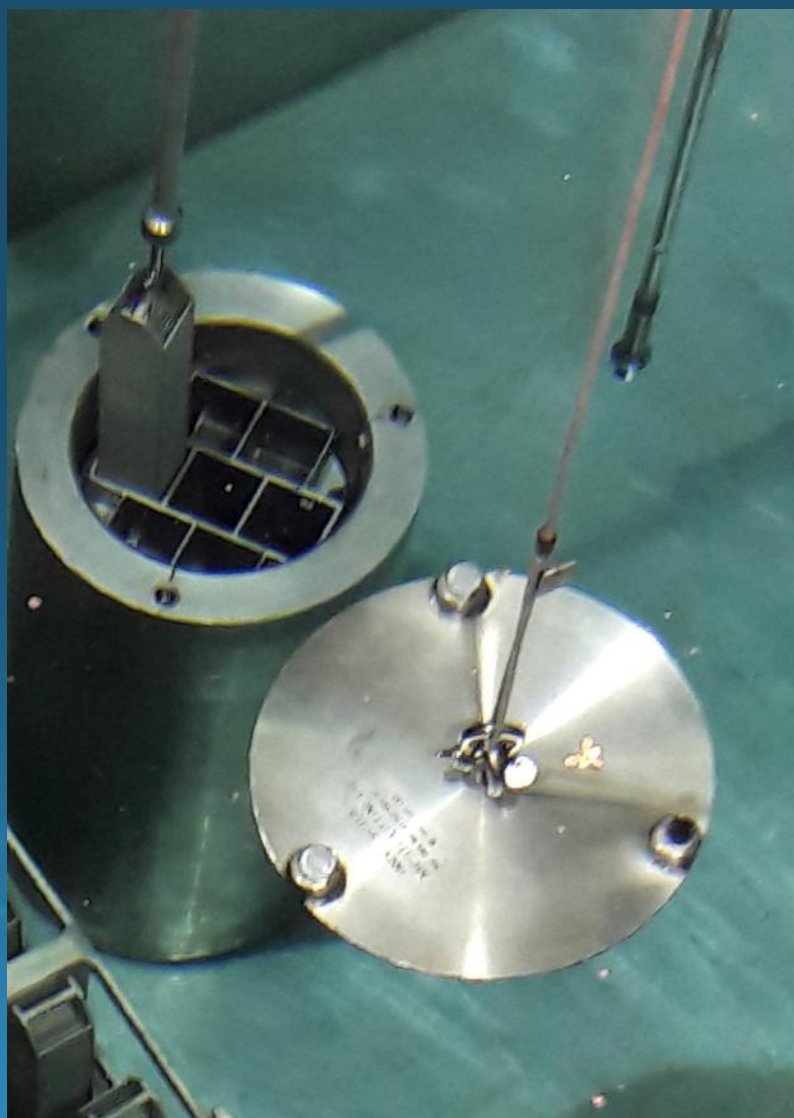
REVISTA

ISSN 1684-1662 (Impresa)
ISSN 2225-2029 (En línea)



Informe Científico Tecnológico

Vol.16 N°2 jul-dic, 2016



INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR

Revista

Informe Científico Tecnológico

Volumen 16, N° 2, julio-diciembre 2016

Inf. Cient. Tec.

ISSN 2225-2029 (Versión electrónica)

ISSN 1684-1662 (Versión impresa)

Foto de carátula: José Castro Palomino

Los artículos publicados en el Informe Científico Tecnológico son indexados en:

- INIS Database (International Atomic Energy Agency)
- ETDEWEB World Energy Base
- Google Scholar

La revista *Informe Científico Tecnológico* es una publicación de acceso abierto y se distribuye bajo la licencia:



Revista Informe Científico Tecnológico

Auspiciada por:

INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR – IPEN

Presidenta: Susana Margarita Petrick Casagrande

Comité Editor:

Juan Agapito Panta
Instituto Peruano de Energía Nuclear
Susana Gonzáles Villalobos
Instituto Peruano de Energía Nuclear
Antonio Prado Cuba
Instituto Peruano de Energía Nuclear
Edith López Moreno
Instituto Peruano de Energía Nuclear

Consejo Consultivo:

Pablo Cristini
Centro Atómico Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina
Jorge Rodríguez Bailón
Universidad Peruana Cayetano Heredia, Perú
Gonzalo Walwyn Salas
Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Cuba
Ana Cristina de Melo Ferreira
Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Brasil
Susana Petrick Casagrande
Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú
Julio Santiago Contreras
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú
Aurelio Arbildo López
Universidad de Lima, Perú
Betty Millán
Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú
Armano Hung
Universidad Peruana Cayetano Heredia, Perú
Alcides López Milla
Universidad Nacional de Ingeniería, Perú
Cecilia Chang Ching
Asociación Civil Impacta Salud y Educación, Perú
Guido Arroyo Pauca
Sesuveca del Perú, Perú

Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)

<http://www.ipen.gob.pe>

E-mail: postmaster@ipen.gob.pe

Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Lima, diciembre 2019

Editorial

El Informe Científico Tecnológico –ICT– del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) es una publicación periódica, especializada en temas de Ciencia, Tecnología e Innovación, que se publica desde el año 1998 como un medio de difusión de la producción científica institucional, cumpliendo un importante rol de soporte en la gestión del conocimiento para la comunidad científica nacional e internacional. El ICT desde el año 2015 se edita con una periodicidad semestral, a fin de cumplir con los criterios de las publicaciones admisibles en la colección Scientific Electronic Library Online, SciELO Perú.

El IPEN como entidad dedicada a impulsar y difundir la ciencia, la tecnología y el conocimiento nucleares para el desarrollo nacional presenta en esta edición un tema relacionado con el ámbito de los reactores con el estudio sobre el «Desarrollo de un sistema de medición de potencia para reactor nuclear RP-10 utilizando radiación de Cherenkov» con resultados sobre la medición de la potencia de un reactor nuclear de investigación mediante tratamiento de imágenes digitales para medir la intensidad del resplandor azul producido a causa de la radiación de Cherenkov.

También, en el artículo «Comportamiento de empaques en un módulo de torre de enfriamiento para un sistema de refrigeración» se determina la tasa de transferencia de calor de un prototipo de torre de enfriamiento utilizando dos configuraciones de empaques diferentes. El análisis de la eficiencia de ambas configuraciones se realiza mediante un estudio teórico experimental en un prototipo de torre de enfriamiento buscando replicar la distribución de sus componentes. Los resultados obtenidos, por extensión, demuestran la conveniencia de utilizar empaques en una configuración ordenada en las torres de enfriamiento del reactor RP-10 para mejorar su eficiencia.

El IPEN comercializa radiofármacos de gran utilidad en el campo de la medicina nuclear. Bajo este contexto se realizó el estudio «Validación de un método analítico por TLC-Scanner para la determinación de pureza radioquímica del pertecnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable» mediante un método analítico por cromatografía en capa delgada (TLC) con un sistema de Escáner radio-TLC donde se evaluaron diversos parámetros verificándose la validez del método propuesto para su uso en el proceso de elaboración del pertecnetato de sodio ^{99m}Tc .

El ^{99m}Tc es el radionúclido más utilizado clínicamente en todo el mundo y la cromatografía en columna con alúmina como fase estacionaria la técnica de separación por excelencia. En esa orientación, el «Estudio de la cinética en el proceso de adsorción de molibdeno en alúmina ácida usando ^{99}Mo como radiotrazador» busca evaluar la cinética y el mecanismo de adsorción del sistema alúmina ácida activada-molibdeno empleando ^{99}Mo como radiotrazador.

En el campo de la energía presentamos los resultados de la «Proyección de la demanda nacional de energía para el período 2012–2050 usando el modelo para el Análisis de la Demanda de Energía (MAED)» asociado a escenarios de crecimiento económico empleando datos de consumo de energía de diversos sectores, proyectos y fuentes energéticas. Los resultados obtenidos indican que la proyección de demanda de energía para el año 2050 será de 60.25 GWh, 68.56 GWh y 88.33 GWh para los escenarios de crecimiento bajo, medio y alto, respectivamente.

Los estudios que presentamos muestran los trabajos desarrollados por los especialistas que laboran en el IPEN y pone de manifiesto las grandes posibilidades para contribuir al desarrollo nacional utilizando la tecnología nuclear.

Susana Gonzáles Villalobos

Contenido

	Pág.
Estudio de la cinética en el proceso de adsorción de molibdeno en alúmina ácida usando ^{99}Mo como radiotrazador	3
Emily Vivanco, Pablo Mendoza	
Desarrollo de un sistema de medición de potencia para reactor nuclear RP-10 utilizando radiación de Cherenkov	9
Eisenk Benancio, Emilio Veramendi, Francisco Quiñones	
Validación de un método analítico por TLC-scanner para la determinación de pureza radioquímica del pertecnetato de sodio $^{99\text{m}}\text{Tc}$ solución inyectable	15
Miguel Vásquez, Bertha Ramos	
Comportamiento de empaques en un módulo de torre de enfriamiento para un sistema de refrigeración	23
Javier Gago, Jamir Herrera, Raúl Palomino, Nicolás Boujeat, Yuri Hernandez, Renzo Chan, Oscar Baltuano	
Proyección de la demanda nacional de energía para el período 2012–2050 usando el modelo MAED: Caso Perú	31
Juan Ávila, Luis Aguirre Pesantes, Edward Rebaza, César Pizarro	

Estudio de la cinética en el proceso de adsorción de molibdeno en alúmina ácida usando ^{99}Mo como radiotrazador

Emily Vivanco^{1,*}, Pablo Mendoza²

¹ Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rímac, Lima, Perú.

² Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú.

Resumen

El tecnecio 99 metaestable, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, es el radionúclido clínicamente más utilizado en todo el mundo y la cromatografía en columna con alúmina como fase estacionaria la técnica de separación del ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ por excelencia. En el presente trabajo se evalúa la cinética y el mecanismo de adsorción del sistema alúmina ácida activada-molibdeno bajo sistema discontinuo (por lotes) a un pH = 3.0 y a una temperatura ambiente ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) empleando ^{99}Mo como radiotrazador. Se seleccionó las ecuaciones de Lagergren (pseudo primer orden), Ho (pseudo segundo orden) y Elovich para evaluar el comportamiento de la cinética del proceso, siendo la ecuación de Ho la que mejor la describe. En tanto, las ecuaciones de difusión intrapartícula y difusión de película líquida fueron empleadas para el estudio del mecanismo de adsorción, siendo ésta última la que mejor lo define.

Palabras clave: Adsorción; Alúmina ácida; Técnica de radiotrazadores; Molibdeno; Modelos cinéticos; Mecanismos de adsorción

Kinetic study of in the adsorption process of molybdenum in acidic alumina using ^{99}Mo as a radiotracer

Abstract

Technetium 99 metastable, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, is the clinically most widely used radionuclide worldwide, with column chromatography using alumina as a stationary phase, the separation technique of the ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ par excellence. In the present work, the kinetics and the adsorption mechanism of the activated acid alumina-molybdenum system are evaluated under a batch system at pH = 3.0 and at room temperature ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) using ^{99}Mo as a radiotracer. The Lagergren equations (pseudo first order), Ho (pseudo second order) and Elovich were selected to evaluate the behavior of the kinetics of the process; with the equation Ho as the one that best describes it. Meanwhile, the adsorption mechanism was studied by the intraparticle diffusion and the liquid film diffusion equations, being the latter those which defines it best.

Keywords: Adsorption; Acidic alumina; Radiotracer technique; Molybdenum; Kinetic models; Adsorption mechanisms

1. Introducción

El $^{99\text{m}}\text{Tc}$ es el radioisótopo más utilizado en medicina nuclear, especialmente en cardiología y diagnóstico oncológico [1]. Su obtención a través de generadores $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ se basa en la fuerte unión entre la alúmina ácida activada y los iones molibdato y la elución de los iones de pertecnetato ($^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$) mediante solución salina [2].

El estudio de la cinética de adsorción del molibdeno en alúmina ácida activada está enfocado en aclarar el mecanismo que controla el proceso de interacción adsorbato-adsorbente

de naturaleza fisicoquímica así como las diversas variables que influyen en la velocidad del proceso de adsorción. En ese sentido, el empleo del ^{99}Mo como radiotrazador puede proporcionar información valiosa al respecto, considerando su naturaleza isotópica con la ventaja intrínseca de una medición de la actividad en forma inmediata y directa. Para el presente estudio se aplicó el ajuste numérico considerando tres modelos cinéticos conocidos: pseudo primer orden [3], pseudo segundo orden [4] y modelo de Elovich [5].

* Correspondencia autor: emilyvivancocuba@uni.pe
ORCID Id <https://orcid.org/0000-0003-0314-4280>

2. Parte Experimental

2.1. Coeficiente de distribución

El adsorbente en evaluación es la alúmina súper activada, ácida, Grado I Alfa Aesar TM con tamaño de partícula 150-200 μm . Para la prueba de coeficiente de distribución (K_d) se pesó 0.200 g de Al_2O_3 ácida en cada tubo para centrifuga y se añadió 20 ml de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio conteniendo la mezcla $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ y ajustando el pH de cada tubo a valores de 1, 2, 3... 10 y 11. Los tubos se agitaron en un agitador orbital a 800 rpm durante 60 minutos a temperatura del laboratorio (20 °C) para luego filtrarse a través de microfiltros de membrana Millipore de 0.22 μm . Se extrajo 1 ml del filtrado y se separó en un vial de vidrio de 10 ml para la posterior medición de radioactividad. Las mediciones de radioactividad se realizaron en un sistema de espectrometría gamma de alta resolución con detector HPGe con un 70 % de eficiencia relativa y resolución de 1.9 keV para el pico de 1332.5 keV de ^{60}Co . Para cuantificar la radioactividad se analizó el pico gamma de 739.5 keV utilizando el programa de adquisición Genie2000 vs 2.1 de Canberra, calculando mediante MS-Excel la actividad considerando la corrección por coincidencia del pico de 739.5 keV por la geometría de medición aplicada (18 mm) y por el valor de eficiencia relativa respectiva.

2.2. Modelos cinéticos

Para el estudio de la cinética de adsorción se irradió 0.25 g de MoO_3 en el reactor de investigación RP-10 del Centro Nuclear de Huarangal mediante el sistema neumático de irradiación de muestras (SNIM) por 5 minutos bajo un flujo neutrónico térmico de $1.25 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El MoO_3 irradiado se disuelve en solución NaOH 5M (pH 13) trasvasando a fiola de 100 ml añadiendo HNO_3 1M hasta obtener un pH de 3 y una concentración de 0.1 mgMo/ml. Se extrajo 10 mL de esta solución para llenar diversos tubos de plástico de centrifugación agregando a cada uno de ellos 0.1 g de alúmina ácida activada. La muestra se agitó en un mezclador a 800 rpm por un minuto filtrando mediante membrana micropore de 0.22 μm para luego extraer 1 mL del filtrado en vial de vidrio de 8 mL de capacidad para su posterior medición de actividad del ^{99}Mo . Se repitió la operación variando los tiempos de

agitación en 5, 10, 20, 40, 60 y 80 minutos, respectivamente.

3. Resultados y discusión

3.1. Coeficiente de distribución

Es la relación de la concentración de una sustancia en una sola forma definida en el extracto y su concentración en la misma forma en la otra fase en equilibrio [6].

$$K_d(\text{ml/g}) = \frac{(A_i - A_{eq})}{A_{eq}} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

Donde A es la radioactividad de la especie a estudiar, aunque también podría ser las unidades de medida de masa o concentración de la misma. A_i es la radioactividad total inicial de 1 ml de solución, A_{eq} es la radioactividad de 1 ml de la solución en equilibrio, V es el volumen de la solución (ml), y m es la masa de adsorbente (g).

En la Figura 1 se muestran los resultados donde se aprecia que el pH óptimo de adsorción es igual a 3 fijando el estudio de los modelos cinéticos y mecanismos de adsorción bajo este valor de pH.

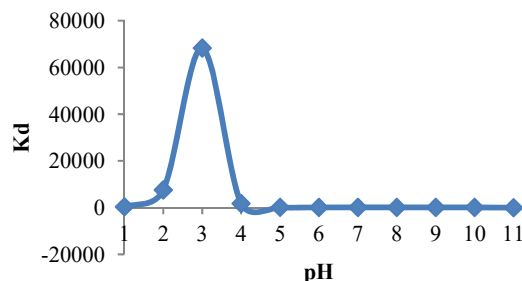


Figura 1. Coeficiente de distribución K_d del ^{99}Mo en alúmina ácida activada.

3.2. Modelos cinéticos

La cantidad adsorbida de molibdeno en alúmina por masa de adsorbente se cuantifica mediante la ecuación 2.

$$q_t = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (2)$$

Donde C_t es igual

$$C_t = \frac{A_t}{A_{inicial}} C_0 \quad (3)$$

C_0 es la concentración inicial de la solución (mg/ml), C_t es la concentración en un instante t una vez iniciado el proceso, $A_{inicial}$ y A_t es la

actividad de ^{99}Mo de la solución al inicio y en un instante t , respectivamente, V es el volumen de la solución (ml) y m es la masa del adsorbente (g).

El resumen de los resultados y cálculo de q_t se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada con ^{99}Mo como radiotrazador.

Tiempo de agitación (min)	Actividad ^{99}Mo (μCi)	Concentración (mgMo/ml)	Cantidad adsorbida q_t (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
0	51.195	0.1000		
1	31.029	0.0606	3.94	39.4%
5	14.951	0.0292	7.08	70.8%
10	3.209	0.0063	9.37	93.7%
20	2.183	0.0043	9.57	95.7%
40	0.210	0.0004	9.96	99.6%
60	0.231	0.0005	9.95	99.5%
80	0.206	0.0004	9.96	99.6%

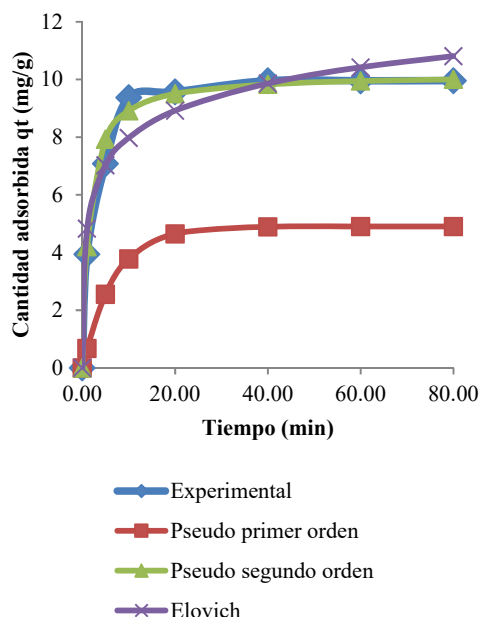


Figura 1. Cantidad adsorbida de molibdeno en alúmina ácida en el tiempo.

El efecto del tiempo de contacto de la adsorción de molibdeno en alúmina ácida se estudió a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ y los resultados se muestran en la Figura 2. Se observó que la cantidad adsorbida aumentaba con el incremento del tiempo de contacto hasta los 40 minutos alcanzando el equilibrio. La rápida adsorción en las etapas iniciales (>70 % en 5 minutos)

puede deberse al hecho de que inicialmente los sitios de adsorción estaban vacíos adsorbiendo fácilmente los iones molibdato; sin embargo, la tasa de adsorción disminuye debido a la ocupación de iones molibdato en los poros de la alúmina [7] manteniéndose finalmente la curva de adsorción constante, indicando una saturación completa de los sitios de adsorción.

La forma linealizada de la ecuación de pseudo primer orden es:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

Donde q_t y q_e representan la cantidad de molibdeno adsorbida (mg/g) en un momento t y en el tiempo de equilibrio respectivamente, q_e debe ser establecido previamente antes de determinar el ajuste del modelo y, k_1 representa la constante de velocidad de adsorción (min^{-1}).

Los datos cinéticos de adsorción obtenidos experimentalmente para cada variable de proceso se ajustaron como una gráfica de " $\ln(q_e - q_t)$ vs t " como se muestra en la Figura 3 (1a). Se encontró que las gráficas resultantes obedecen a la cinética de primer orden hasta los 10 primeros minutos del proceso de adsorción, observándose la no linealidad para tiempos mayores. Además, el valor de R^2 del coeficiente de correlación para el pseudo primer orden no es considerable y el valor de q_e pronosticado difiere significativamente del experimental, lo que indica que el modelo cinético de pseudo primer orden es insuficiente para la correcta predicción de la cinética de la adsorción de molibdeno. Por ello, se aplica el modelo cinético de pseudo segundo orden para ajustar los datos experimentales. Los parámetros calculados para los modelos cinéticos se muestran en la Tabla 2.

El modelo de pseudo-segundo orden en forma linealizada se da como:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \dots \quad (5)$$

Usualmente, se atribuye este modelo al proceso que envuelve un mecanismo de quimisorción, donde k_2 ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$), es la constante de tasa de segundo orden que se puede calcular a partir de la intersección de la gráfica trazada entre t/q_t versus t . Los valores de los parámetros de este modelo se muestran en la Tabla 2. La gráfica de la ecuación linealizada se muestra en la Figura 3(1b). Este modelo arrojó una relación lineal durante todo el período de tiempo;

además, el valor de q_e calculado se aproxima bastante al valor experimental y el valor de R^2 obtenido es el más alto ($R^2 > 0.995$), esto sugiere que el sistema de adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada sigue una cinética de pseudo segundo orden.

El modelo de Elovich, de aplicación general en procesos de quimisorción, implica una variación de la energía de la quimisorción con el grado de cobertura de la superficie [8], otra explicación plausible es que los sitios activos del adsorbente son heterogéneos y por ello presentan diferentes energías de activación [8]. La ecuación linealizada del modelo de Elovich viene dada por:

$$q_t = \frac{1}{b} \ln(ab) + \frac{1}{b} \ln(t) \quad (6)$$

La gráfica de la ecuación linealizada se muestra en la Figura 3 (1c). Este modelo arrojó una relación lineal hasta el minuto 10 en que cambia de pendiente para volverse nuevamente lineal hasta el minuto 80. El valor de R^2 obtenido no es considerable, esta cifra nos sugiere que el modelo de Elovich no es el adecuado para el sistema de adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada.

Tabla 2. Parámetros cinéticos de adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada.

<i>Modelos de cinética de adsorción</i>			
	$q_e(\text{mg g}^{-1})$	$k_1(\text{min})$	R^2
Pseudo primer orden	4.9023	0.1472	0.8345
Pseudo segundo orden	10.1819	0.069	0.9998
Elovich	46.9619	0.7326	0.867

3.3. Mecanismos de adsorción

En general, un proceso de adsorción ocurre a través de varios pasos, que implican difusión masiva, difusión de película y difusión intrapartícula y finalmente adsorción en los sitios activos [9]. El paso más lento será el limitante de la velocidad, que gobierna la velocidad general del proceso de adsorción. Por ello, para comprender el mecanismo del proceso de adsorción, los datos cinéticos se utilizaron para ajustarlos a modelos matemáticos bien conocidos como la difusión intrapartícula y el modelo de difusión de película líquida.

El modelo de difusión intrapartícula se basa en la suposición de que los iones del soluto se difunden a través del interior de los poros del adsorbente y se adhieren. Esta vía es el paso determinante de la velocidad, en el que la adsorción de solutos varía proporcionalmente con $t^{1/2}$ [10]:

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (7)$$

Donde, k_{id} es la constante de difusión intrapartícula y se obtiene a partir de la pendiente de la gráfica q_t vs $t^{1/2}$ (Figura 3 (1d)). El modelo se ajusta a los 10 primeros minutos de la operación. Sin embargo, su pendiente cambia para mostrarse lineal nuevamente a partir del minuto 10 hasta el min 40. El valor de k_{id} para 0.1 mg/ml de concentración de molibdeno durante todo el proceso fue de 0.61 $\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$ (Tabla 3) y el valor del R^2 es de apenas 0.62, también se observa que la línea recta no pasa por el origen. Todas estas observaciones sugieren que la difusión intrapartícula no es el paso limitante de la velocidad durante la adsorción.

La insuficiencia del modelo de mecanismo de adsorción de difusión intrapartícula da paso al estudio de la difusión de película líquida para el proceso de adsorción en el presente estudio. Por lo tanto, se aplica la ecuación (7) a los datos cinéticos obtenidos que describe la difusión de película líquida.

$$\ln(1 - f) = -k_{fd} t \quad (8)$$

$$f = q_t / q_e \quad (9)$$

Donde, f es la fracción de equilibrio y k_{fd} representa la constante de velocidad de difusión de la película. La gráfica $\ln(1-f)$ vs t se muestra en la Figura 3 (1e). La recta mantiene la linealidad hasta el minuto 40 con un R^2 de 0.96, punto en que se ha llegado al equilibrio; sin embargo, al considerar el minuto 60, el valor de la constante de velocidad de difusión de la película fue de 0.14 g/mg (Tabla 3) mientras que el R^2 de 0.81. El valor del coeficiente de regresión R^2 sigue siendo mayor en ambos casos que el de la difusión intrapartícula. Se asume que la linealidad disminuye debido a la interferencia de las incertidumbres en el cálculo una vez llegado al equilibrio en el minuto 40. Teniendo en cuenta estas observaciones, se deduce que la difusión de película es un paso determinante de la velocidad en el proceso de adsorción.

El valor de la intersección (-0.96) muestra que la desviación respecto al cero es pequeña.

Tabla 3. Parámetros de difusión intrapartícula y película líquida para la adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada.

<i>Mecanismos de adsorción</i>			
	k_{id} (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	Intercepto	R ²
Difusión intrapartícula	0.6107	5.5921	0.6233
Difusión película líquida	0.1411	-0.9648	0.8073

4. Conclusiones

El valor de pH de mayor adsorción de molibdeno en alúmina ácida activada fue de 3. Los parámetros de la cinética de adsorción indicaron que el proceso se rige bajo la ecuación de pseudo segundo orden siendo la difusión de película líquida el mecanismo de adsorción predominante.

Para una concentración inicial de 0.1 mg Mo/ml se logró un porcentaje de adsorción máximo de un 99.6 % a un tiempo de equilibrio de 40 min.

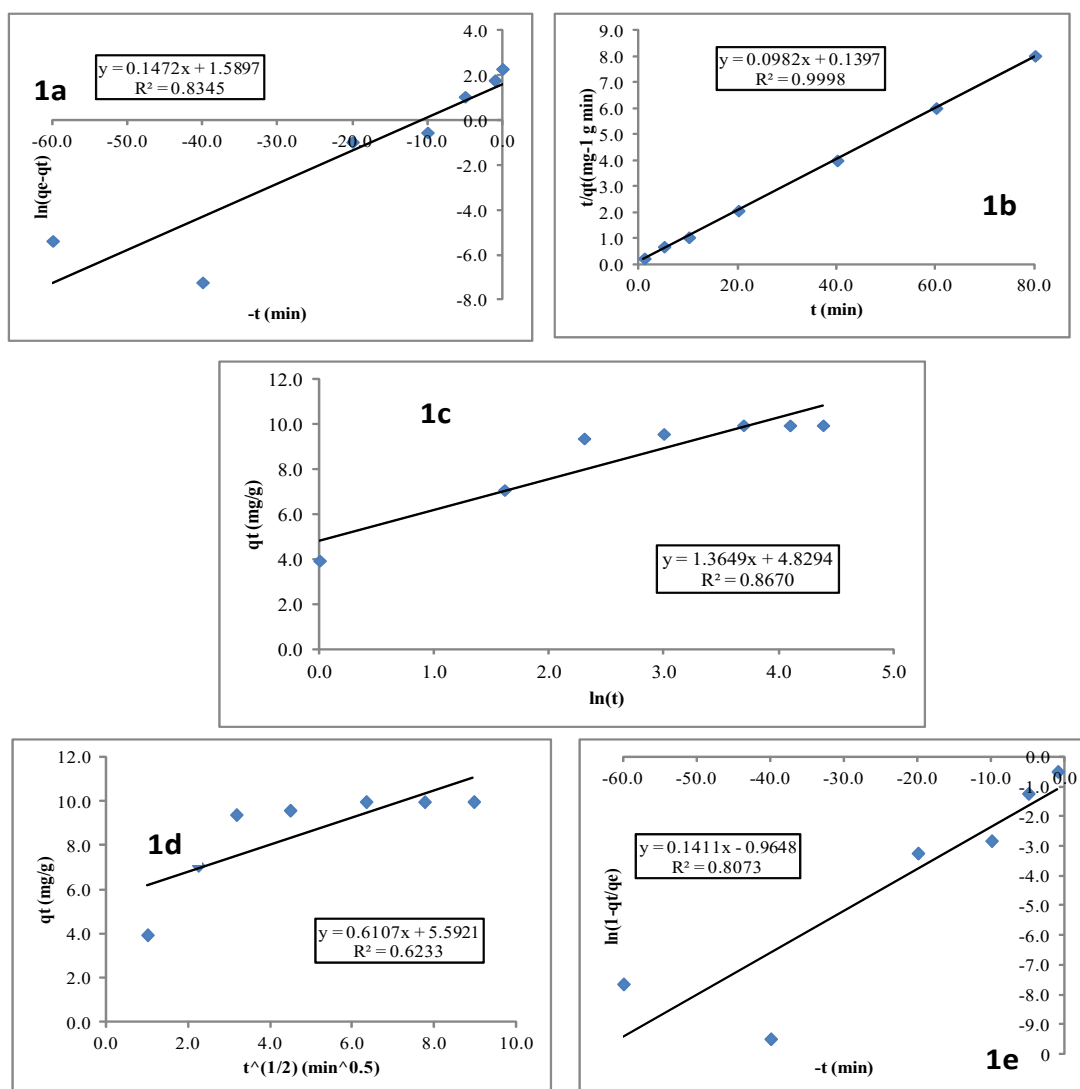


Figura 3. Modelos cinéticos y mecanismos de adsorción a) Pseudo primer orden b) Pseudo segundo orden c) Elovich d) Difusión intrapartícula e) Difusión de película líquida.

5. Agradecimientos

Al personal del Laboratorio Control de Calidad de la Planta de Producción de Radioisótopos del Instituto Peruano de Energía Nuclear por su apoyo a la presente investigación. Asimismo, al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por su soporte financiero en la ejecución del trabajo a través del proyecto CRP Contrato N° 22460.

6. Bibliografía

- [1]. Eckelman WC. Unparalleled Contribution of Technetium-99m to medicine over 5 decades. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2009; 2(3):364-368.
- [2]. Molinski VJ. A review of ^{99m}Tc generator technology. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 1982; 33(10):811-819.
- [3]. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar*, Band 24(4):1-39. Handlingar.
- [4]. Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 1999; 34(5):451-465.
- [5]. Roginsky S, Zeldovich YB. The catalytic oxidation of carbon monoxide on manganese dioxide. *Acta Physicochimica. URSS*. 1934; 1:554.
- [6]. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book"). 2014. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- [7]. Ghaedi M, Tavallali H, Sharif M, Kokhdan SN, Asghari A. Preparation of low cost activated carbon from *Myrtus communis* and pomegranate and their efficient application for removal of Congo red from aqueous solution. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2012; 86, 107-114.
- [8]. Teng H, Hsieh CT. Activation energy for oxygen chemisorption on carbon at low temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1999; 38(1):292-297.
- [9]. Khan TA, Chaudhry SA, Ali I. Thermodynamic and kinetic studies of As (V) removal from water by zirconium oxide-coated marine sand. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013; 20(8):5425-5440.
- [10]. Weber Jr. WJ, Morris JC. Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. 1963; 89 31-59.

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].

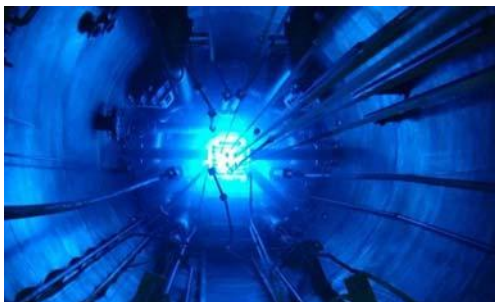


Figura 1. Efecto Cherenkov en el reactor RP-10 a 4,7 MW.

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 uno 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 pixeles, 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.

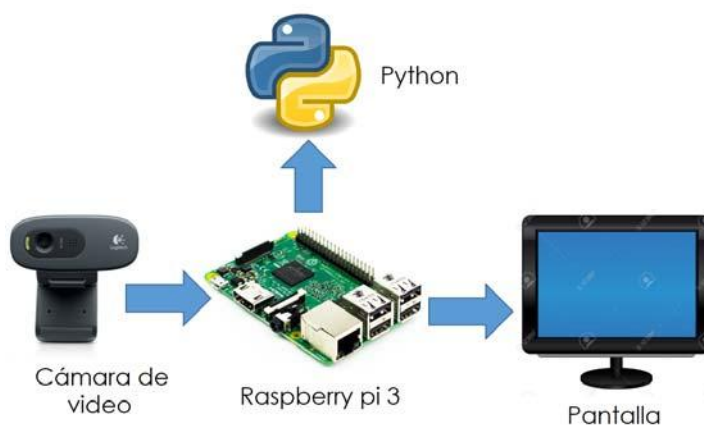


Figura 2. Diagrama general del proyecto.



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

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.

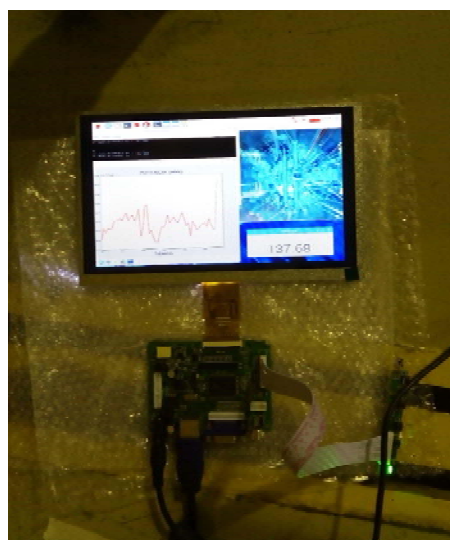


Figura 4. Pantalla LCD de 9 pulgadas en la instalación.

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.

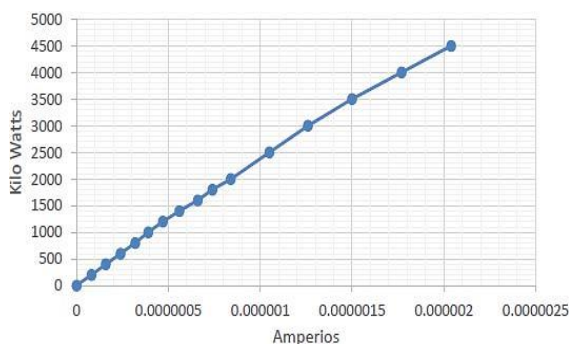


Figura 5. Gráfica del sistema de potencia N16 versus corriente de marcha 4.

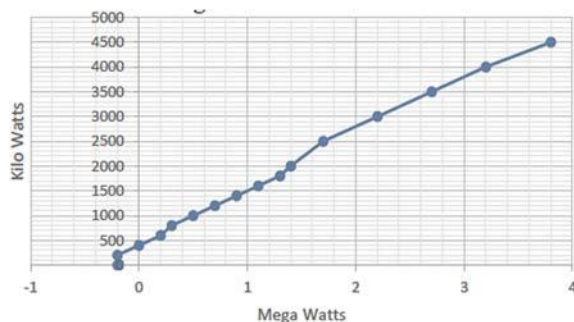


Figura 6. Gráfica del sistema de potencia N16 versus potencia térmica.

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.

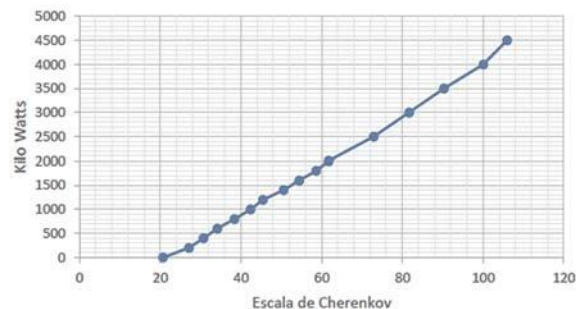


Figura 7. Gráfica sistema de potencia N16 versus Escala de Cherenkov.

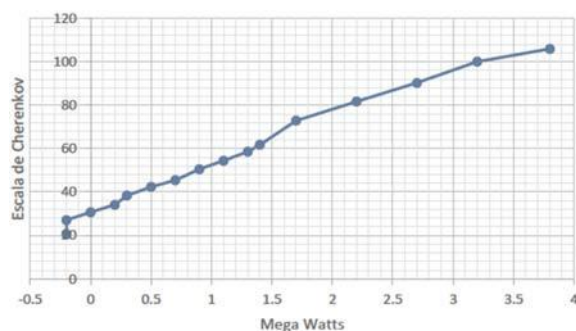


Figura 8. Gráfica Escala de Cherenkov versus potencia térmica.

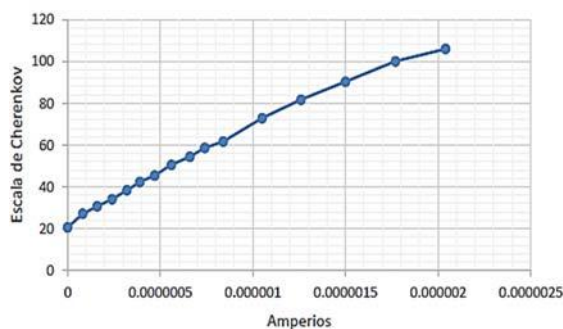


Figura 9. Gráfica Escala de Cherenkov versus corriente de marcha 4.

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.

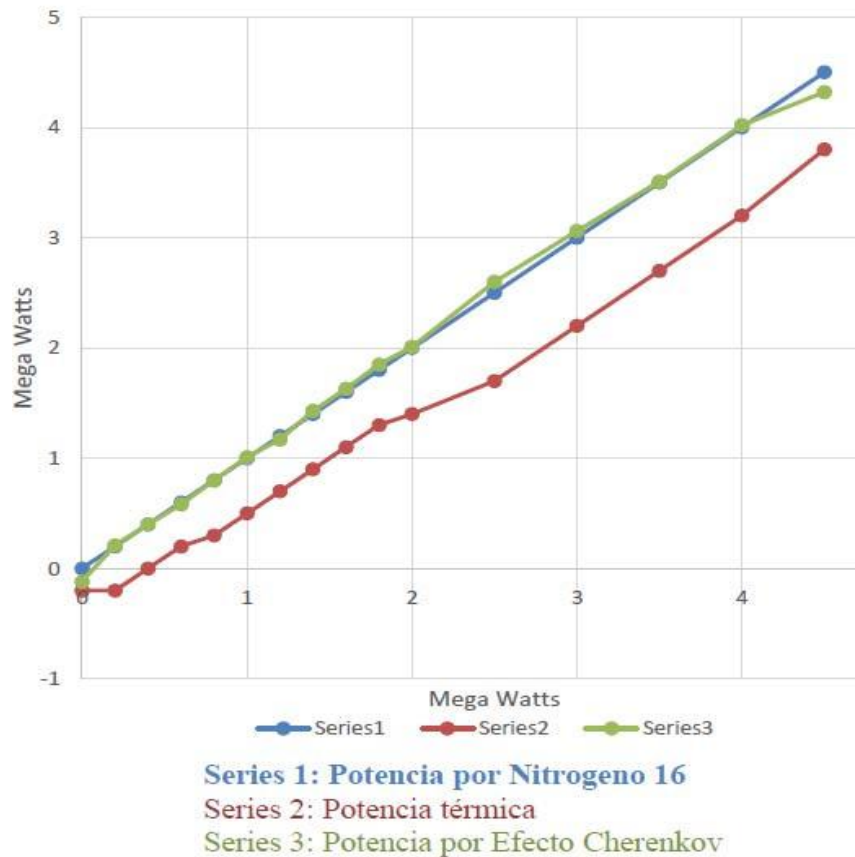


Figura 10. Resultado del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov respecto de los otros sistemas.

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 pixeles 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.

Validación de un método analítico por TLC-scanner para la determinación de pureza radioquímica del pertecnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable

Miguel Vásquez*, Bertha Ramos

Planta de Producción de Radioisótopos, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. José Saco km 12.5, Lima 6, Perú.

Resumen

Se realizó la validación de un método analítico para la determinación de la pureza radioquímica del radiofármaco Pertecnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable, mediante cromatografía en capa delgada (TLC) con un sistema de Escáner radio-TLC, el mismo que permite evaluar la calidad del producto. Se evaluaron los parámetros de selectividad, linealidad, precisión, robustez, límite de detección, límite de cuantificación, rango y estabilidad de la solución muestra. En las condiciones experimentales se demostró estadísticamente que el método por TLC-scanner es selectivo para la banda de pertecnetato TcO_4^- Rf de 0,9 y para la impureza radioquímica TcO_2 Rf de 0,1, la linealidad desde 0,25 a 3,0 mCi/mL, la precisión intermedia con RSD global de 0,237%, la robustez con RSD global 0,012%, el límite de detección de 0,03% mCi/mL, límite de cuantificación de 0,24 mCi/mL, rango conforme y la estabilidad de la solución muestra evaluado en los tiempos 0, 2 y 3 horas con un RSD global de 0,196% obteniéndose resultados conformes. En todas las operaciones se verificaron la conformidad de las pruebas a los criterios de aceptación en cada una de las etapas de validación. Se concluye la validez de nuestro método en las condiciones establecidas y es apta para su uso en el proceso de elaboración del pertecnetato de sodio ^{99m}Tc .

Palabras clave: Validación; Pureza radioquímica; Pertecnetato de sodio; Radiofármacos

Validation of an analytical method by TLC-scanner for the determination of radiochemical purity of sodium pertechnetate ^{99m}Tc injectable solution

Abstract

The validation of an analytical method was carried out for the determination of the radiochemical purity of the radiopharmaceutical Pertecnetate sodium ^{99m}Tc solution for injection, by means of thin layer chromatography (TLC) with a Radio-TLC scanner system, which allows to evaluate the quality of the product. The parameters of selectivity, linearity, precision, robustness, limit of detection, limit of quantification, range and stability were evaluated in the sample solution. Under the experimental conditions, the TLC-scanner method was statistically demonstrated to be selective for the pertechnetate band TcO_4^- Rf of 0.9 and for the radiochemical impurity TcO_2 Rf of 0.1, the linearity from 0.25 to 3.0 mCi / mL, intermediate precision with overall RSD of 0.227 %, robustness with overall RSD 0.012 %, detection limit of 0.03 % mCi / mL, limit of quantification of 0.24 mCi/mL, conformal range and stability of the sample solution evaluated at times 0, 2 and 3 hours with a global RSD of 0.196 % obtaining compliant results. In all the operations, the conformity of the tests to the acceptance criteria was verified in each of the validation stages. Under the established conditions, the validity of our method is concluded to be suitable for use in the process of making ^{99m}Tc sodium pertechnetate.

Keywords: Validation; Radiochemical purity; Sodium pertechnetate; Radiopharmaceuticals

1. Introducción

El ^{99m}Tc es el radioisótopo más utilizado en medicina nuclear debido a su período de

semidesintegración física de solo 6 horas, que posibilita administrar actividades del orden de los mCi sin que signifique una alta dosis para un paciente. La naturaleza química de los radiofármacos de ^{99m}Tc es amplia e incluye

* Correspondencia autor: mvasquez@ipen.gob.pe
ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-8725-7156>

radionucleídos primarios, como el caso del ^{99m}Tc -pertechnetato y compuestos marcados [1]. El control de calidad para radiofármacos abarca categorías como: controles físico-químicos, controles biológicos y controles nucleares. Dentro de los controles físico-químicos encontramos la pureza radioquímica, definida como la fracción de radioactividad total en la forma química deseada presente en el radiofármaco. Estas impurezas pueden ser causadas por descomposición del radiofármaco debido a la acción del solvente usado, temperatura, luz, radiólisis o marcación de una impureza con el mismo radionucleído; por ejemplo, la presencia de ^{99m}Tc reducido hidrolizado en complejos marcados con ^{99m}Tc . Los métodos analíticos más usados para detectar y determinar las impurezas radioquímicas de un radiofármaco son la precipitación, cromatografía en papel, capa fina y en gel, electroforesis en papel y en gel, cromatografía líquida de alta eficiencia, extracción por solvente, extracción fase sólida y destilación [2].

El método más utilizado, sencillo y rápido es el cromatográfico que esencialmente es un método físico de separación, en el cual los componentes a separar se distribuyen en dos fases, una de ellas es un lecho estacionario, mientras que la otra se mueve por percolación a través de este lecho, alcanzándose la separación gracias a las diferencias en los coeficientes de distribución de los componentes de la muestra. Los tipos de cromatografía más utilizados, debido a su fácil realización y el tiempo corto que requieren son las cromatografías en papel (TLC) y en capa delgada instantánea (ITLC) [3]. El método farmacopéico oficial descrito por la USP 40 para Pertechnetato de sodio ^{99m}Tc inyección indica que se debe colocar un volumen de inyección de 20000 cuentas por minuto aproximadamente en una tira de 25 mm x 300 mm, desarrollándose la cromatografía usando una mezcla de acetona y ácido clorhídrico 2 N (80:20). Luego, se determina la distribución de radioactividad mediante barrido del cromatograma con un detector de radiación colimada [4].

Para el control de la pureza radioquímica, donde se utilizan papel y tiras cromatográficas de tamaño reducido, hay técnicas simples que permiten realizar la cromatografía en un tiempo breve [3]. Por eso, se pueden usar

métodos o procedimientos alternativos que proporcionen alguna ventaja en cuanto a exactitud, sensibilidad, precisión, selectividad o adaptabilidad a la automatización, reducción de datos computarizados. Sin embargo, los métodos y procedimientos alternativos deben validarse de acuerdo con las pautas del capítulo general Validación de Procedimientos Farmacopéicos <1225> y debe demostrarse que proporcionan resultados equivalentes o mejores; por esa razón, el método propuesto requiere de una validación analítica.

La validación de un procedimiento analítico es el proceso que se establece mediante estudios en laboratorio, para evaluar si las características de desempeño del procedimiento cumplen los requisitos previstos [5]. El objetivo del procedimiento analítico debe entenderse claramente porque regirá las características típicas de validación a evaluarse, tales como exactitud, precisión, repetibilidad, precisión intermedia, especificidad, límite de detección, límite de cuantificación, linealidad y rango. Cabe señalar que la robustez no se incluye en la tabla, pero debe considerarse en una etapa apropiada durante el desarrollo del procedimiento analítico [6].

Este estudio se enfoca en la validación del método analítico para la determinación de la pureza radioquímica del radiofármaco Pertechnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable en un sistema de Escáner radio-TLC, que es un escáner versátil para la detección confiable de radioisótopos en tiras y placas estrechas (Figura 1). El sistema es ideal para el control de calidad de rutina de ^{99m}Tc , que consiste en una etapa móvil y un PMT basado en detector.

2. Experimental

El proceso de validación de la metodología analítica de pureza radioquímica por TLC-scanner para el radiofármaco Pertechnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable, por tratarse de una metodología no farmacopéica se ha tomado como base los parámetros de validación indicados en la USP y en el Informe 40 de la Organización Mundial de Salud. Se utilizó como muestra de análisis el lote: 1030728, a la que se aplicó la validación de tipo concurrente al método analítico de pureza radioquímica en el producto Pertechnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable para los parámetros selectividad, linealidad, estabilidad

de la muestra, robustez, límite de detección y cuantificación, precisión y rango. Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente para cada parámetro de la validación.

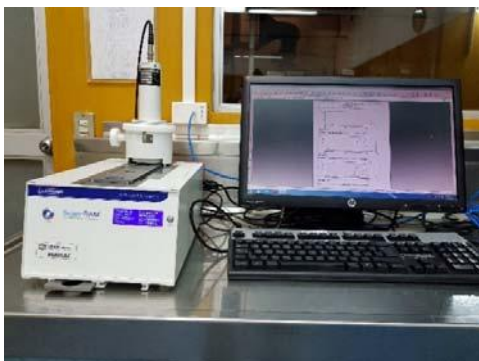


Figura 1. TLC-scanner Scan-RAM.

2.1 Descripción del proceso

El proceso de validación se desarrolló en el Departamento de Control de Calidad, Laboratorio de Radioquímica I de la Planta de Producción de Radioisótopos del IPEN. Los equipos usados en el proceso de validación de la metodología para determinación de la pureza fueron un escáner radio-TLC con código PM05AC, marca Scan-RAM, modelo SR1A, Serie SR1A/0117/380 (Figura 1) y una cadena de espectrometría gamma monocanal con código PM03AC, marca Canberra (Figura 2).

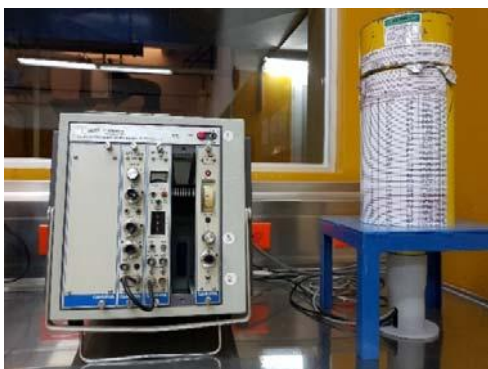


Figura 2. Cadena de espectrometría gamma monocanal.

2.2 Método analítico

El método analítico utilizado es el ensayo: Pureza radioquímica de Pertecnetato de sodio ^{99m}Tc Solución Inyectable.

2.2.1 Equipos, materiales y reactivos

Materiales:

- Papel cromatográfico N° 1 de 10 x 100 mm

- Tiras de ITLC-SG de 10 x 110 mm
- Cámaras o cubas cromatográficas.
- Micropipeta de 2 a 20 μL código TH80AC y micropipeta de 20 a 200 μL código TH82AC.

Equipos:

- Escáner radio-TLC, código PM05AC, marca Scan-RAM.
- Cadena de espectrometría gamma monocanal, código PM03AC, marca Canberra.
- Calibrador de dosis, código CA05AC, marca Capintec.
- Monitor de radiaciones, código DP28JP, marca Technical Associates.

Reactivos:

- Metiletilcetona ACS, marca J.T. Baker Lote: 57168.
- Cloruro de estaño, marca Sigma, Lote MKBZ7691V.
- Peróxido de hidrógeno, marca Merck, Lote K447934310.

2.2.2 Sistema cromatográfico cromatografía en capa fina (TLC)

- o Detector : NaI (Ioduro de sodio).
- o Fase móvil : Metiletilcetona ACS
- o Fase estacionaria : Tira ITLC-SG
- o Volumen : 5 μL .
- o Tiempo : 5 minutos aprox.
- o Valores de Rf : Rf Tc VII (TcO₄⁻) : 0,9
- o Rf Tc IV (reducido-hidrolizado): 0,1

2.3 Desarrollo de la validación

El control de calidad para la determinación de pureza radioquímica fue validado mediante el método de cromatografía en capa delgada (TLC) con un sistema de Escáner radio-TLC.

2.4 Parámetros considerados

- Selectividad: Se prepararon 2 soluciones muestras, 2 soluciones muestras con impureza radioquímica ^{99m}Tc IV reducido, 2 soluciones muestra de placebo y 1 muestra de diluyente o muestra de fase móvil.
- Linealidad/Función respuesta: Se consideraron 5 niveles de concentración y análisis por triplicado para cada concentración radioactiva de 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 mCi/mL. Se realizó una curva de regresión en mCi/mL de la lectura de las áreas (counts) a diferentes concentraciones radioactivas.

- Precisión: Se preparó 1 solución muestra de pertechnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable. También soluciones a concentraciones de 0,25; 1,0; 3,0 mCi/mL; luego, se hicieron 6 ensayos con diferentes equipos y especialistas de control de calidad.
- Robustez: Se evaluó el factor de variabilidad aportado por el cambio de tipo de soporte: papel cromatográfico y tiras de ITLC-SG.
- Límite de detección y cuantificación: Se realizó análisis, por triplicado, para cada concentración radiactiva entre 0,25 hasta 3,0 mCi/mL.
- Rango: Se evaluó los parámetros de precisión, linealidad, LOD y LOQ.
- Estabilidad de la solución muestra: Se evaluó la estabilidad a las 0 horas hasta las 3 horas de su preparación.

2.5 Soluciones de trabajo

- Solución muestra: Concentración radioactiva aproximada: 1,0 mCi/mL. Se diluye la solución de ^{99m}Tc con solución de cloruro de sodio 0,9 % para obtener una concentración de 1,0 mCi/mL.
- Solución placebo: Se usó placebo entregado por el área de producción.
- Solución blanco: Se usó la fase móvil.

2.6 Procedimiento

Se utiliza guantes de látex o polietileno, pinza metálica, visor plomado, blindaje de plomado e iluminación adecuada.

Se coloca las tiras cromatográficas sobre un papel toalla con la ayuda de una pinza y se activa en una estufa a 110 °C por 30 minutos; una vez activado se retira y utiliza inmediatamente, también puede almacenarse por 24 horas en un desecador sobre silicagel activada.

Luego, se coloca la tira activada sobre una toalla y se pone en la zona de sembrado del laboratorio. Marcar una línea suave a 1,5 cm del inicio, sembrar con una micropipeta 5 μL de la solución muestra de ^{99m}Tc en un extremo de la tira; enseguida, secarla a temperatura ambiente por 1 minuto aproximadamente.

Posteriormente, la tira se coloca en la cuba cromatográfica previamente equilibrada en la fase móvil, teniendo en cuenta que la altura, en la cuba, no debe superar los 0,7 cm aproximadamente y 7 mL de fase móvil. A continuación, se desarrolla el cromatograma

hasta que el frente de fase móvil se sitúe a 0,5 cm del borde superior, luego retirarla y dejar que seque.

Adecuación del sistema: Se inyecta la solución muestra por duplicado. La desviación estándar relativa para ambas corridas de pureza radioquímica PRQ1 y PRQ2 no debe ser mayor a un 2,0 %.

Especificación: Pureza radioquímica: $\geq 95\%$. El valor de Rf correspondiente al producto es 0,9.

3. Resultados y discusión

3.1 Determinación de la selectividad

En el análisis de selectividad se comparó la respuesta de los blancos y/o placebos y las muestras degradadas con respecto a la muestra a temperatura ambiente. El método permite distinguir entre todas las posibles especies químicas que pueden generarse (Figura 3). El método por TLC-scanner los valores de Rf en los cromatogramas para la banda de pertechnetato TcO_4^- es 0,9 y la impureza radioquímica TcO_2 de 0,1 y sin ningún pico cromatográfico del blanco y/o placebo, lo cual nos indica que no producen interferencia y los valores de Rf para la banda de pertechnetato TcO_4^- y la impureza radioquímica son diferentes.

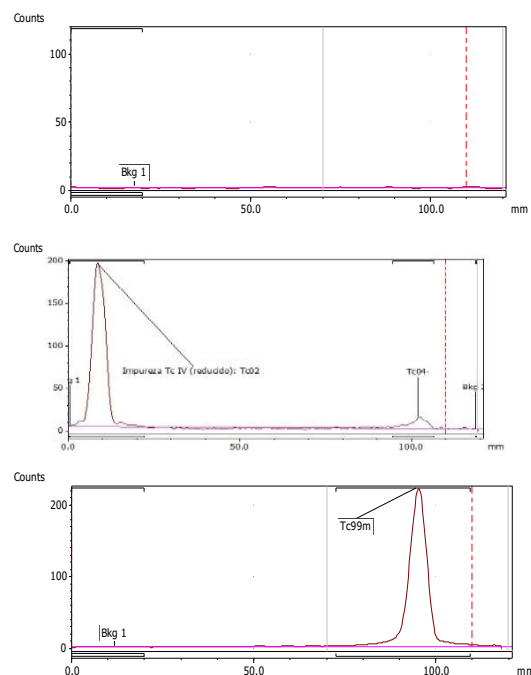


Figura 3. Cromatogramas TLC-scanner: Blanco, impureza radioquímica (reducido): TcO_2 , muestra de ^{99m}Tc .

3.2 Determinación de la linealidad

Los valores obtenidos en la medición para las soluciones de ^{99m}Tc se muestran en la Tabla 1. En ella podemos observar que hay una clara tendencia a la linealidad, debido a que cuando se aumenta la concentración radioactiva del ^{99m}Tc se incrementa en forma proporcional las cuentas. Con estos datos elaboramos la curva de regresión para la concentración de ^{99m}Tc (Figura 4).

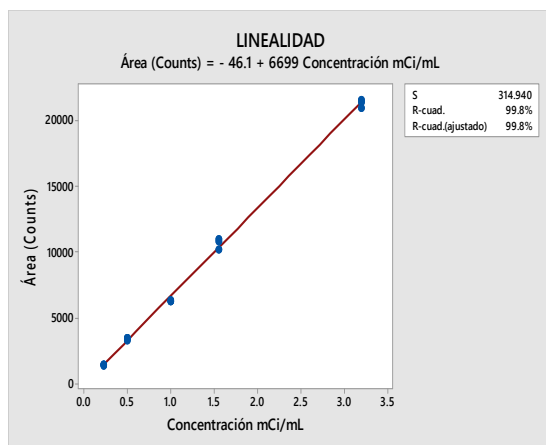


Figura 4. Linealidad del ^{99m}Tc .

Tabla 1. Total áreas (counts) del ^{99m}Tc .

Replicas	Total áreas (Counts)	Retention (RF)
1	6374	0,855
2	6242	0,856
3	6288	0,887
4	5952	0,855
5	6114	0,862
6	6143	0,867
RSD = 2,405 %		

Los resultados fueron analizados estadísticamente evaluándose las concentraciones radioactivas (mCi/mL) versus área (Counts) encontrada. En la Figura 3 se observa la ecuación de la recta, donde se obtiene:

$$y = 6698.744 x \pm 46.108$$

Los valores alcanzados mediante la estadística de regresión fueron un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,999 y un coeficiente de determinación (r^2) de 0,998. El coeficiente de determinación nos indica que existe una buena linealidad y aporta mayor significación estadística.

Mediante la prueba *t-student* y ANOVA se halló el estadístico “t” junto con un test de

varianza. El valor de $t_{\text{regresión}} = 763,13$ demuestra que la correlación es lineal y significativa. El valor $p = 0,000$ nos indica que el análisis de varianza posee una alta correlación por lo que se puede inferir que el método es lineal.

3.3 Determinación de la precisión

En el análisis para el parámetro precisión se evaluó la repetibilidad instrumental, repetibilidad de método y precisión intermedia. Se observa que el RSD de las áreas de la repetibilidad instrumental es de 2,4 % como se muestra en la Tabla 2. El RSD de la repetibilidad de método es 0,859 % con un intervalo de confianza individual de 97,71 % a 101,66 % conforme y un intervalo de confianza promedio de $99,681 \pm 0,658$ % conforme. Para la precisión intermedia se evaluó diferentes equipos y analistas, equipo 1: TLC-scanner marca Scan-Ram modelo SR1A código PM05AC (Figura 1). Equipo 2: Cadena de espectrometría monocanal marca Camberra (Figura 2). Se obtuvieron resultados conformes, el RSD global fue 0,237 % como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Precisión: Repetibilidad del ^{99m}Tc .

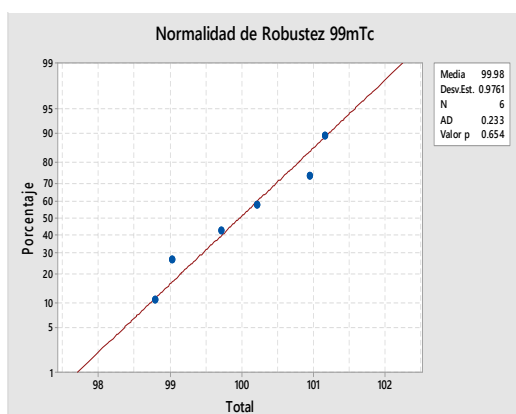
Concentraciones (mCi/mL)	Área (Counts) Promedio
0,22	1413,333 $\pm$ 2,2199
0,50	3412,333 $\pm$ 3,2424
1,00	6301,667 $\pm$ 1,0719
1,55	10652,67 $\pm$ 3,8897
3,20	21330,67 $\pm$ 1,4621

3.4 Determinación de la robustez

En este parámetro se evaluó la condición de variabilidad. Para este caso, Condición 1: Fase estacionaria: soporte de tira ITLC-SG y para la Condición 2: Soporte de papel cromatográfico N° 1. El RSD global con todos los resultados es 0,012%, la normalidad total es 0,654 (Figura 5), la normalidad 1° condición es 0,470, la normalidad 2° condición es 0,494 y la prueba estadística t es 0,986, obteniéndose resultados conformes.

Tabla 3. Precisión Intermedia del ^{99m}Tc .

Analista Equipo	Área (Counts)	PRQ (%)	RSD (%)	RSD (%) Global
Analista 1 Equipo 1	6491	98,948	0,5780	0,237
	6418	99,458		
	7094	97,883		
	6870	98,466		
	6454	99,415		
	6563	98,647		
Analista 2	286413	99,689	0,6008	
Equipo 2	291329	99,634		
	307873	99,727		
	289549	98,478		
	279799	98,541		
	285416	98,843		

Figura 5. Normalidad robustez de ^{99m}Tc .

3.5 Determinación del límite de detección y cuantificación

El límite de detección es la concentración derivada de la respuesta más pequeña que se puede detectar con una certeza razonable para un procedimiento analítico dado [7]. Se determinó mediante el análisis de muestras con concentraciones conocidas. El límite de detección se calculó mediante la fórmula [8]:

$$\text{LOD} = (s \times 3) / \text{Slope}$$

Donde s es la desviación estándar de la respuesta.

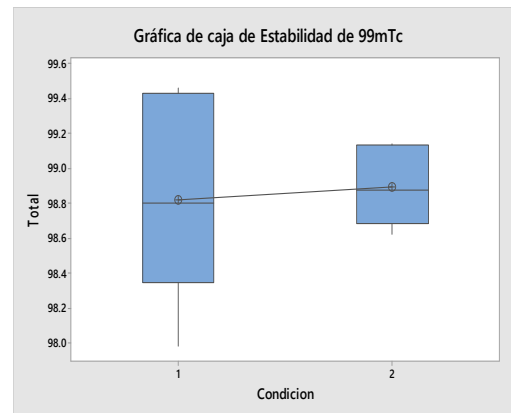
El límite de cuantificación (LOQ) se calculó mediante la fórmula [8]:

$$\text{LOQ} = (s \times 10) / \text{Slope}$$

Mediante la interpolación de la ecuación de regresión se calculó el valor límite de detección donde obtuvo una concentración radioactiva de 0,03 mCi/mL y el valor límite de cuantificación una concentración radioactiva de 0,24 mCi/mL, obteniéndose resultados conformes.

3.6 Determinación del rango

El rango de trabajo para los parámetros de validación quedó establecido desde el 0,25 mCi/mL hasta el 3,0 mCi/mL al demostrarse precisión y linealidad en ese intervalo para el método analítico validado.

Figura 6. Gráfica de cajas estabilidad del ^{99m}Tc .

3.7 Determinación de estabilidad de la solución muestra

Los parámetros de estabilidad para la solución de las muestras fueron evaluadas a los tiempos de 0 horas, 2 horas y 3 horas, obteniéndose resultados conformes, también se evaluó la distribución de los datos. El RSD global con todos los resultados de las muestras a 0, 2 y 3 horas es 0,196 %. La normalidad de las muestras a las 0 horas es 0,725; a las 3 horas es 0,264 y la prueba estadística t es 0,786, obteniéndose resultados conformes y se determina que las muestras preparadas pueden ser procesadas hasta 3 horas después (Figura 6).

4. Conclusiones

Después de la evaluación detallada de la validación del Pertecnetato de sodio ^{99m}Tc solución inyectable se demostró estadísticamente que el método por TLC-scanner es selectivo debido a que permite distinguir especies químicas que se generan sin interferencias tanto para la banda de pertecnetato TcO_4^- con un R_f de 0,9 y para la impureza radioquímica TcO_2 con un R_f de 0,1 con una respuesta lineal en los cinco niveles de concentración desde 0,25 a 3,0 mCi/mL con coeficiente de Correlación de Pearson (r) de 0,999 y un coeficiente de determinación (r^2) de 0,998, demostrando la precisión del método con un RSD global de 0,237%, la robustez de

diferentes fases estacionarias con RSD global 0,012 %, capaz de detectar pequeñas cantidades de concentraciones radioactivas, obteniéndose un límite de detección de 0,03 % mCi/mL, un límite de cuantificación de 0,24 mCi/mL, el rango de los parámetros conforme y una estabilidad para procesar las muestras evaluado en los tiempos 0, 2 y 3 horas con un RSD global de 0,196 %.

Los parámetros de selectividad, linealidad, precisión, robustez, límite de detección, límite de cuantificación, rango y estabilidad de la solución muestra tuvieron un resultado conforme, lo cual nos indica que el método queda validado para las condiciones analíticas establecidas.

En todas las operaciones se verificaron la conformidad de las pruebas a los criterios de aceptación en cada una de las etapas de validación. Se concluye la validez de nuestro método en las condiciones establecidas y es apta para su uso rutinario en control de calidad en el proceso de elaboración del pertecnetato de sodio ^{99m}Tc .

5. Agradecimientos

A la Lic. Flor Martínez por el apoyo brindado en el proceso de validación.

6. Bibliografía

[1]. Chain Y, Illanes L. Radiofármacos en medicina nuclear. Fundamentos y aplicación clínica. 1. Edición. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires. Argentina, 2015.

[2]. Organismo Internacional de Energía Atómica. Manual de protocolos de calidad de radiofármacos. ARCAL XV Producción y control de radiofármacos. Viena, 1999.

[3]. Montero de Espinosa Costa G. Control de calidad de generadores de Molibdeno-99-Tecnecio-99m [Tesis para optar al grado de Doctor]. Universidad Complutense de Madrid Madrid, Facultad de Farmacia; 2002.

[4]. USP 40 NF 35 (2017) – Farmacopea de los Estados Unidos de América. Monografía Oficial del Pertecnetato de Sodio Tc99m, Inyección. pág. 6835-6836.

[5]. USP 40 NF 35 (2017) – Farmacopea de los Estados Unidos de América. Capítulo General Validación de Procedimientos Farmacopéicos <1225>.

[6]. ICH Harmonised Tripartite Guideline (2005). International Conference on Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use. Validation of analytical procedures: Text and methodology Q2 (R1).

[7]. Leonardi N, Casale G, Nicolini J, Zubata P, Salgueiro M, *et al.* Validation of a paper chromatographic methodology as an alternative for determination of the radiochemical purity of Na^{18}F . Journal of Nuclear Medicine Technology. 2012; 40(4): 271-274.

[8]. Mihon M, Tuta CS, Manea C, Ion AC, Lavric V. Validation of the HPLC method for determination of identity and radiochemical purity of $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$. U.P.B. Sci. Bull, Series B. 2016; 78(1):71-78.

Comportamiento de empaques en un módulo de torre de enfriamiento para un sistema de refrigeración

Javier Gago^{1,*}, Jamir Herrera², Raúl Palomino³, Nicolás Boujeat⁴, Yuri Hernandez¹, Renzo Chan¹, Oscar Baltuano^{1,5}

¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Investigación y Desarrollo. Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú.

² Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima 25, Perú.

³ Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Villa El Salvador. Lima 42, Perú

⁴ Université Paris-Sud IUT de Cachan. Paris, Francia.

⁵ Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Av. Venezuela S/N, Lima 1, Perú.

Resumen

En el presente estudio se determinó la tasa de transferencia de calor de un prototipo de torre de enfriamiento utilizando dos configuraciones de empaques diferentes: la primera usando una configuración con placas ordenadas y la segunda con una distribución de placas desordenadas. El análisis de la eficiencia de ambas configuraciones se realizó mediante un estudio teórico experimental. Para ello, se construyó un prototipo de torre de enfriamiento en pequeña escala buscando replicar, hasta donde fue posible, la distribución de los componentes de una de las torres de enfriamiento del reactor RP-10. Mediante el uso de un medidor de caudal, una red de sensores de temperatura distribuidos a lo largo del circuito de agua y una fuente de calor con temperatura controlada para elevar la temperatura del agua se determinó de forma experimental que un empaque ordenado mejora la transferencia de calor del sistema en un 10.62 % con respecto a un empaque desordenado. Los resultados obtenidos, por extensión, demuestran la conveniencia de utilizar empaques en una configuración ordenada en las torres de enfriamiento del reactor RP-10 mejorando la eficiencia de las mismas.

Palabras clave: Torres de refrigeración; Sistemas de refrigeración; Modelos; Transferencia de calor; Temperatura; Sensores

Packaging behavior in a cooling tower module for a cooling system

Abstract

In the present study, the heat transfer rate of a modification tower prototype was determined using two different packaging configurations: the first one using an ordered plate configuration and the second one with a messy plate distribution. The efficiency analysis of both configurations was carried out by means of an experimental theoretical study. For this, a small-scale cooling tower prototype was built seeking to replicate, as far as possible, the distribution of the components of one of the RP-10 reactor's cooling towers. Using a flowmeter, a network of temperature sensors distributed throughout the water circuit, and a temperature controlled heat source to raise the water temperature, an orderly packaging is experimentally determined to improve the transfer of system heat by 10.62 % over a messy package. The results obtained, by extension, show the convenience of using packing in an ordered configuration in the RP-10 reactor friction towers, improving their efficiency.

Keywords: Cooling towers; Cooling systems; Models; Heat transfer; Temperature; Sensors

1. Introducción

Una torre de enfriamiento cumple la función de reducir la temperatura del refrigerante, generalmente agua, en un proceso que genera

calor a gran escala. Cuando este componente tiene un mal funcionamiento o no se encuentra optimizado se produce una baja eficiencia de transferencia de calor y puede conllevar a un mal funcionamiento del proceso o el

* Correspondencia autor: jgago@ipen.gob.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-4236-3216>

incremento de los costos de operación. Con la finalidad de evaluar la eficiencia en el uso de dos configuraciones diferentes de los empaques usados en las torres de enfriamiento del reactor RP-10 se llevó a cabo este estudio en el cual de forma teórica y experimental se analizó la conveniencia de usar una configuración ordenada o desordenada de los empaques.

En un reactor nuclear el sistema de refrigeración permite que el calor generado en el núcleo del mismo, producto de la reacción nuclear, sea transferido al ambiente. En el caso del reactor RP-10 tiene un sistema primario compuesto por tanques de decaimiento, bombas centrífugas, intercambiadores de calor y un sistema secundario compuesto por intercambiadores de calor (entre el sistema primario y secundario), bombas centrífugas y tres torres de enfriamiento [1].

Las torres de enfriamiento del reactor RP-10 son del tipo “tiro mecánico inducido de flujo cruzado” [1,2] y se caracterizan porque el ventilador va situado en la parte superior, para extraer el aire uniformemente a lo largo de las paredes de la torre. En esta sección, el aire frío ascendente se encuentra a contracorriente con el flujo de agua ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$) que cae desde la parte superior a 0.10 m del ventilador e intercambian calor dentro de las cavidades de los empaques. Generalmente, debido a la alta velocidad de descarga, suele presentar pérdidas de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire y que escapan fuera de la estructura de la torre.

2. Experimental

El desarrollo de este trabajo se ha realizado en dos etapas complementarias. En la primera etapa se ha diseñado y construido un prototipo pequeño de una torre de enfriamiento buscando, en lo posible, replicar los componentes de mayor tamaño utilizados en las torres de enfriamiento del reactor RP-10. Cabe resaltar, que debido a la complejidad de replicar en pequeño tamaño cada uno de los componentes, éste no es un modelo a escala sino un prototipo pequeño en el cual se ha realizado el estudio de la influencia del tipo de empaque utilizado en la capacidad de transferencia de calor del sistema de forma experimental. En una segunda etapa se ha realizado un modelamiento y estudio teórico de las variables físicas involucradas y su posterior

correlación con las mediciones obtenidas en el prototipo.

2.1 Prototipo construido

En la Figura 1 se muestra un esquema con las principales partes que conforman el prototipo de torre de enfriamiento que ha sido construido y evaluado. El punto de inicio de diseño del prototipo ha sido el tamaño del empaque que se fijó en 0.027 m^3 . Los demás componentes han sido adecuados al tamaño de este empaque, el cual puede ser retirado y reemplazado fácilmente con la finalidad de cambiar únicamente esta variable física durante el estudio.

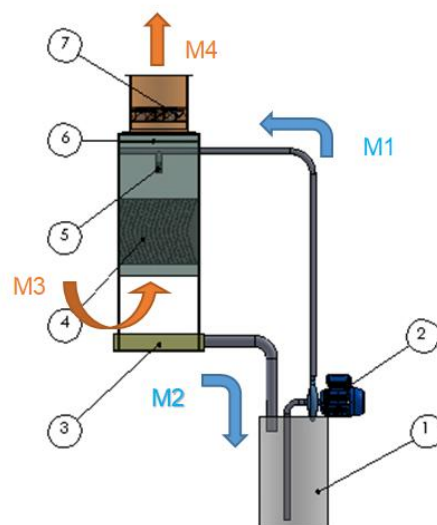


Figura 1. Esquema de la estructura del prototipo construido: (1) tanque de almacenamiento de agua (calentado por una resistencia eléctrica), (2) bomba de circulación, (3) recipiente almacenamiento de descarga de agua, (4) empaque, (5) tobera, (6) atrapa gotas, (7) extractor de aire. M1 representa el ingreso de agua caliente y M2 la salida de agua fría. M3 representa la entrada de aire frío y M4 la dirección de salida del aire caliente.

El circuito de circulación de agua es accionado por una bomba de $\frac{1}{2}$ HP desde el tanque de almacenamiento de agua caliente hasta la tobera de salida en la parte superior de la torre. El resto del circuito se completa a través de la caída de agua por gravedad. La tobera a escala fue diseñada y construida utilizando tecnología de fabricación aditiva (Impresión 3D), esta permite dispersar el agua uniformemente sobre toda la sección del empaque y en gotas pequeñas para una mejor transferencia de calor. El ventilador extractor de aire está ubicado en la parte superior y se encarga de direccionar el flujo de aire a contracorriente

con el sentido de recorrido de agua según el diseño de tiro mecánico inducido de flujo cruzado. El empaque cumple la función de retardar la caída las gotas de agua con la finalidad que permanezcan el mayor tiempo posible en contacto con el aire frío y lograr que se transfiera la mayor cantidad de calor. Para el

estudio de la influencia del empaque en la transferencia de calor, se construyeron dos bloques de empaque. Uno de ellos con una geometría de distribución uniforme y homogénea en sus láminas internas y el segundo en una distribución desordenada (Figura 2).

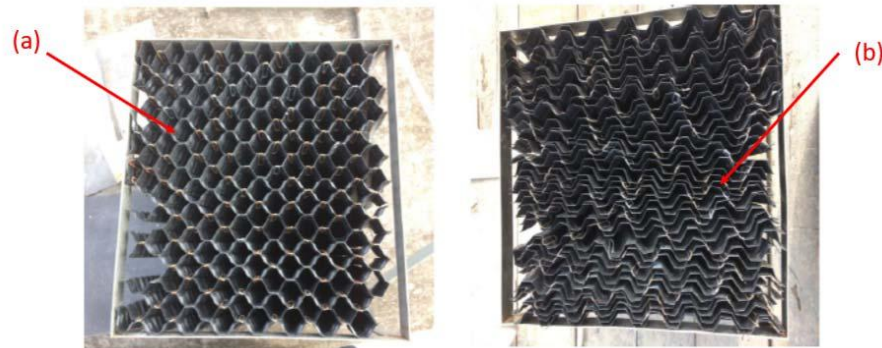


Figura 2. Preparación de los empaques: (a) con láminas ordenadas en una distribución homogénea y (b) con láminas puestas en forma desordenada.

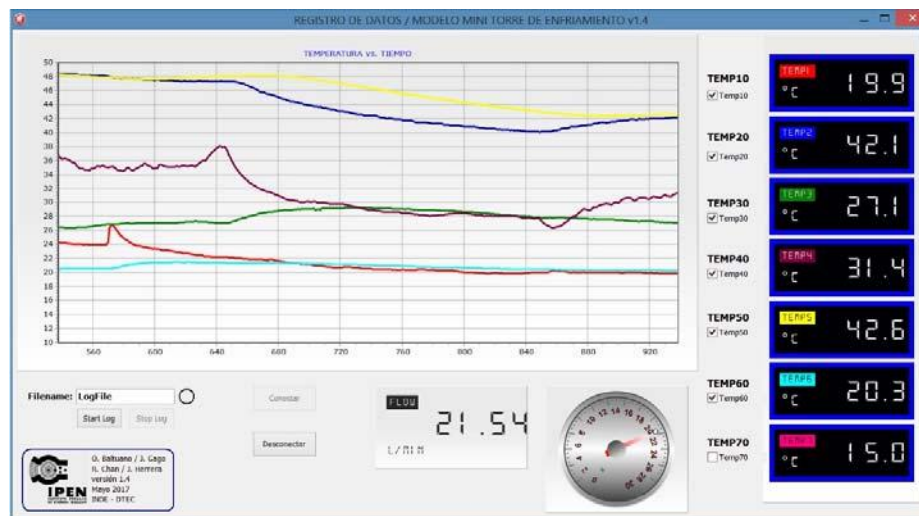


Figura 3. Captura de pantalla del software de adquisición de datos que fue desarrollado para las mediciones experimentales.

Durante la puesta en operación del prototipo se realizaron mediciones de diferentes parámetros del mismo a intervalos de tiempo regulares. Para ello, fue necesario implementar y ensamblar con el prototipo una red de 6 sensores de temperatura digitales DS18B20, un medidor de flujo de agua YF-S201, un calefactor con control de temperatura y un sensor PT100 para ajustar la temperatura del tanque de agua, con el objeto de simular la elevación de temperatura del núcleo del reactor. Todo el proceso de control y adquisición de datos se realizó utilizando una tarjeta Arduino UNO y un software de

adquisición de datos escrito, específicamente para esta aplicación, en Delphi XE7 usando controles gráficos TeeChart (Figura 3).

2.2 Mediciones durante la puesta en operación

Las mediciones realizadas durante la puesta en operación del prototipo permitieron determinar la eficiencia de transferencia de calor para las dos configuraciones de empaque. El agua previamente calentada hasta los 47.5 °C en el tanque de agua mediante el calefactor es hecha circular hacia el empaque, lo que produce la disminución de la temperatura de la misma al

ponerse en contacto con el flujo de aire circulando dentro del empaque a la temperatura ambiente de 20 °C. En la región del empaque se establecen dos mecanismos de transferencia de calor: el primero, la transferencia de calor sensible del agua hacia el aire y la segunda por

la evaporación del agua hacia al flujo de aire [3]. En la Figura 4 puede observarse una imagen de la disposición y ensamblaje de cada una de las etapas del prototipo de la torre de enfriamiento y la posición en la cual fueron instalados algunos de los sensores.

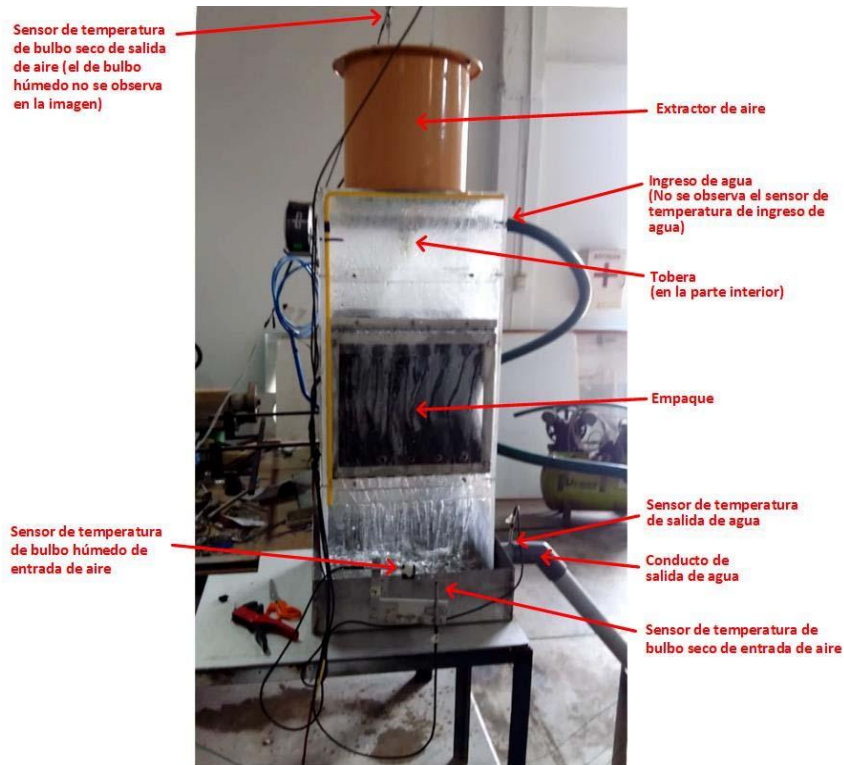


Figura 4. Prototipo de torre de enfriamiento ensamblada.

Tabla 1: Valores obtenidos para cada uno de sensores en diferentes configuraciones de empaques.

Sensor			Empaque ordenado	Empaque desordenado
Temperatura de ingreso de agua	T_{L1}	°C	47.56	47.02
Temperatura de salida del agua	T_{L2}	°C	43.59	43.6
Temperatura bulbo húmedo de ingreso de aire	T_{bh1}	°C	20.47	19.06
Temperatura bulbo seco de entrada de aire	T_{bs1}	°C	21.28	19.85
Temperatura de salida del aire	T_{a2}	°C	34.74	34.2
Caudal de agua	C	m ³ /h	1.2	1.26

En tiempo real se registraron todas las variables listadas en la Tabla 1 durante un período de 10 minutos. Luego, se observó la estabilización de las lecturas y los valores obtenidos en ese instante fueron utilizados como valores de entrada para el cálculo de los

valores teóricos. La Tabla 1 muestra las lecturas obtenidas en cada sensor luego del periodo de estabilización para ambas configuraciones de empaques utilizadas (en el caso de los sensores de temperatura de salida de aire, debido a que éste se encuentra saturado

se consideraron las mismas lecturas para ambos, por lo cual sólo se tomó en cuenta la lectura de uno de ellos).

2.3 Calor transferido por el agua

El calor transferido por la masa del agua que recorre en la torre es absorbido por la masa de aire que circula en sentido contrario, estudio desarrollado [2,3] establece el balance de energía en la siguiente ecuación:

$$L \cdot C_L (T_2 - T_1) = G (H_{G2} - H_{G1}) \dots (1)$$

Donde:

L : Flujo másico de agua (kg/s)

C_L : Calor específico del agua (4.186 kJ/kg °C)

Q : Calor (kJ/s)

G : Flujo másico de aire (kg/s)

H_{G1} : Entalpia de entrada de la mezcla aire – vapor a T_{bh1} , (kJ/kg)

H_{G2} : Entalpia de salida de la mezcla aire – vapor a T_{a2} , (kJ/kg)

Con los registros del caudal y temperatura del agua a su ingreso al prototipo (Tabla 1) se determinó la densidad del agua ($d_{\text{agua}}=988.92 \text{ kg/m}^3$) en el empaque ordenado, también para el empaque desordenado se obtuvo una densidad $d_{\text{agua}}=989.36 \text{ kg/m}^3$. Las densidades del agua varían en función de la temperatura [4]; por lo tanto, el flujo másico de agua (L) es el producto de la densidad del agua (d_{agua}) por el caudal (C), obteniéndose:

$$L_{\text{ordenado}} = 0.33 \text{ kg/s} \dots (2)$$

$$L_{\text{desordenado}} = 0.35 \text{ kg/s} \dots (3)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (1) con los datos de la tabla 1 se obtiene el calor transferido para cada caso:

$$Q_{\text{ordenado}} = 5.48 \text{ kW} \dots (4)$$

$$Q_{\text{desordenado}} = 4.98 \text{ kW} \dots (5)$$

Para aplicación de la ecuación (1) se consideró que el proceso de transferencia de calor en la torre de enfriamiento es adiabático, que no hay pérdidas de calor hacia las paredes del prototipo [5] además las pérdidas de agua por arrastre no se consideran significativas en el cálculo.

2.4 Cálculo de la humedad absoluta del aire que ingresa

En la Tabla 1 se muestra los valores de temperatura de bulbo seco y húmedo correspondiente al ingreso del aire al prototipo para determinar la humedad absoluta “Y”,

mediante la carta psicrométrica, para nuestro caso se usó carta psicrométrica interactiva [6] y se puede comparar con otra referencia impresa [7] que difieren en un orden de 3 a 4 unidades. En los datos obtenidos se considera una presión atmosférica de 1 Bar.

$$Y'_{1\text{ordenado}} = 0.0148 \text{ kg de vapor de agua/kg de aire seco} \dots (6)$$

$$Y'_{1\text{desordenado}} = 0.0135 \text{ kg de vapor de agua/kg de aire seco} \dots (7)$$

2.5 Entalpia de ingreso del aire

La entalpia total del aire húmedo es igual a la suma de la entalpia del aire seco más la entalpia de vapor de agua [3]. La entalpia del aire seco se denomina también “calor sensible” del aire y a la entalpia del vapor de agua contenido en la mezcla es multiplicada por la cantidad de vapor total del vapor de agua o “calor latente”. La entalpia total de ingreso de aire se representa por la siguiente ecuación.

$$H = (1005 + 1884 \cdot Y) \cdot t + 2502300 \cdot Y \dots (8)$$

Donde:

H : Entalpia (J/kg)

t : temperatura (°C)

$$H'_{1\text{ordenado}} = 54.24 \text{ kJ/kg} \dots (9)$$

$$H'_{1\text{desordenado}} = 58.99 \text{ kJ/kg} \dots (10)$$

2.6 Humedad y entalpía de la salida del aire Y'_2

Se considera que la salida de aire del prototipo está totalmente saturada por humedad; por lo tanto, con los valores correspondientes a la temperatura de salida obtenidos en la tabla 1 se procede a determinar la humedad absoluta Y'_2 en la carta psicrométrica [6].

$$Y'_{2\text{ordenado}} = 0.0359 \text{ g humedad/kg aire seco} \dots (11)$$

$$Y'_{2\text{desordenado}} = 0.0349 \text{ g humedad/kg aire seco} \dots (12)$$

Los datos obtenidos en las ecuaciones (12) y (13) de humedad absoluta de la salida del aire se reemplazan en la ecuación (9):

$$H'_{2\text{ordenado}} = 127.33 \text{ kJ/kg} \dots (13)$$

$$H'_{2\text{desordenado}} = 123.88 \text{ kJ/kg} \dots (14)$$

2.7 Determinación de la tasa transferencia de masa

La tasa de transferencia de masa es el indicador de los cambios de estado del agua (de líquido a

gaseoso) [2, 8] que se produce en el empaque del prototipo. Este factor está asociado al proceso de transferencia de calor, estudio desarrollado por Merkel (1925) y se expresa en la siguiente ecuación:

$$K_{ya} = \frac{L}{Z \cdot A} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{C_p \cdot dT_L}{H^* - H'} \dots (15)$$

Donde:

K_{ya} : Tasa de Transferencia de masa (kg/h.m³)

L: Flujo másico de agua (kg/h)

Z: Altura del empaque (m)

A: Área Transversal del empaque (m²)

T_{L1} , T_{L2} : Temperatura de ingreso y salida del agua respectivamente (K)

C_p : Calor específico del agua (KJ/kg.K)

H^* : Entalpia de saturación del aire (KJ/kg)

H' : Entalpia del aire (KJ/kg)

$$K_{ya \text{ ordenado}} = 5557 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} \dots (16)$$

$$K_{ya \text{ desordenado}} = 5051 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} \dots (17)$$

3. Resultados y discusión

Mediante los cálculos teóricos realizados determinamos que la tasa de transferencia de masa del empaque ordenado es mayor al del empaque desordenado en un 10 % considerando todas las variables constantes. A partir de este resultado se hace evidente la influencia que tiene la forma o disposición geométrica de los empaques en el proceso de transferencia de calor (energía) para reducir la temperatura del agua.

Nuestro hallazgo también queda reafirmado con los resultados de mediciones experimentales, como se puede observar en la Figura 5, en donde se muestra la variación en el tiempo del gradiente de temperatura que existe entre la temperatura de entrada y salida del agua en el prototipo de la torre de enfriamiento. En este gráfico se observa desde el inicio un gradiente de temperatura mayor en el empaque ordenado que llega a tener un máximo de más de 4 °C, respecto al empaque desordenado que muestra un máximo de algo más de 3.5 °C después de unos minutos de iniciado la prueba.

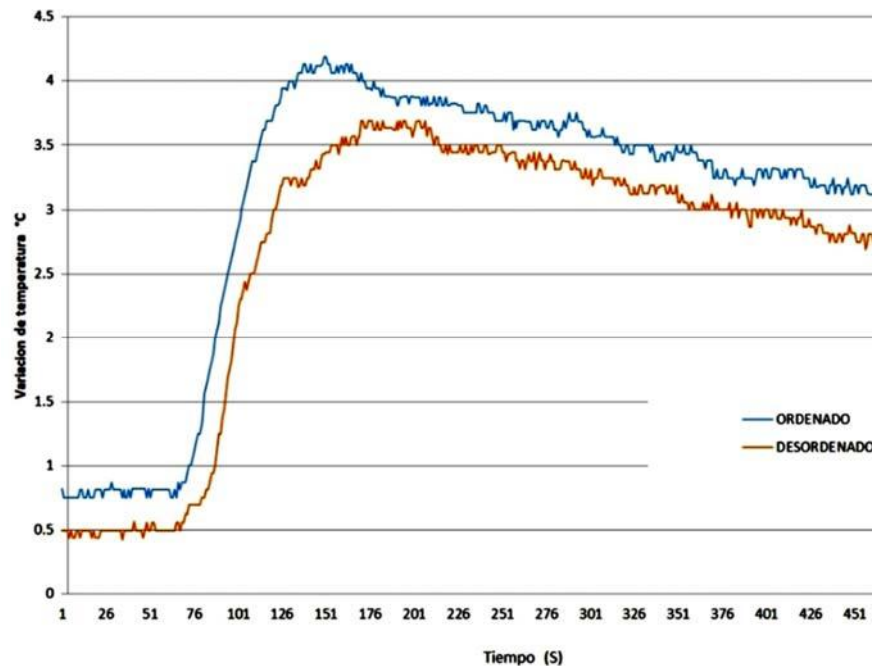


Figura 5. Variación de los gradientes de temperatura durante el experimento, utilizando los dos tipos de empaques estudiados.

Para el proceso de medición, primero se realizó el calentamiento del agua contenida en el tanque utilizando el calefactor controlado hasta alcanzar una temperatura de 47.5 °C aproximadamente. Luego, se puso a funcionar

la bomba de circulación de agua y se inició la medición de todos los sensores, tal como se muestra en la Figura 5. Durante el tiempo de medición el empaque ordenado mantuvo un gradiente de temperatura mayor que el

empaques desordenados. Durante los primeros 70 segundos de medición se mantuvo el extractor de aire apagado, observándose que el empaque ordenado mantuvo un gradiente constante de 0.8 °C, en tanto el empaque desordenado se mantuvo en 0.5 °C. Como era de esperarse al encender el extractor de aire el gradiente de temperatura entre la salida y la entrada aumentó en ambos casos, pero siempre el empaque ordenado tuvo un valor mayor, llegando a un máximo de 4.1 °C para el primero mientras que el máximo gradiente para el empaque desordenado llegó a un máximo de 3.65 °C aproximadamente entre 2.5 y 3 minutos después de iniciada las mediciones. Luego de este máximo el gradiente de temperatura para ambos empaques, así como las temperaturas de entrada y salida empiezan a disminuir e igualarse como consecuencia de la imposibilidad de mantener la temperatura inicial del agua de 47.5 °C a través del calefactor, debido al proceso de extracción de calor de la torre de enfriamiento.

4. Conclusiones

Las mediciones realizadas en el prototipo corroboran una mejor eficiencia de transferencia de calor del empaque ordenado respecto al desordenado. Esta condición podría deberse al flujo inequitativo del aire a través de la geometría desordenada del empaque. Otras investigaciones [9] sobre este tema también señalan la importancia del diseño de la geometría y los materiales para determinar la máxima eficiencia del empaque.

Los cálculos realizados nos permiten concluir que la carga de calor transferida en el empaque ordenado es mayor en un 10.62 % respecto al empaque desordenado en el intervalo de mayor transferencia. Igualmente, la tasa de transferencia de masa en el empaque ordenado tiene un valor mayor en un 10 % aproximadamente respecto al empaque desordenado.

Aunque una diferencia de 10.62 % en la eficiencia de transferencia de calor obtenido en el ensayo con el prototipo pareciera ser pequeña, debe tenerse en cuenta que este valor se vuelve más significativo si el volumen de agua del sistema es mayor, como por ejemplo en un equipo a escala industrial o en un reactor nuclear. Debido a las limitaciones de materiales en este estudio se construyó un prototipo en el que el volumen total de agua fue de solo 30 litros. Aunque no es posible

determinar cuantitativamente cual sería la mejora de la eficiencia en un sistema a mayor escala, si es posible inferir que cualitativamente la mejor eficiencia del empaque ordenado para volúmenes de mayor agua representaría un ahorro significativo de energía y como consecuencia un costo menor de operación en las mismas condiciones.

Este trabajo podría proporcionar la justificación necesaria para realizar estudios a mayor escala en las torres de enfriamiento del reactor RP-10, que actualmente tiene los empaques o rellenos ensamblados en una configuración desordenada y esto podría representar una reducción significativa de la eficiencia de transferencia de calor y por tanto una menor capacidad de enfriamiento del núcleo del reactor en las mismas condiciones.

5. Bibliografía

- [1]. Comisión Nacional de Energía Atómica. Informe especial: Centro Nuclear de Investigaciones del Perú. Revista Argentina Nuclear. 1988; 16: 13-42.
- [2]. Kern DQ. Procesos de transferencia de calor. México: Ed. Continental; 1999.
- [3]. Páucar Cuba KM, Vivas Cuellar MC. Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente [Título Profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil; 1999.
- [4]. Ponce Ochoa E. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada [Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil.]. Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Civil; 2005.
- [5]. Jimeno Tejeda IJ, Olmos Ruíz CA. Estudio y cálculo para la selección de una torre de enfriamiento en la compañía colombiana de Clinker S.A (COLCLINKER) [Tesis Título Ingeniero Mecánico]. Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingeniería Mecánica; 1999.
- [6]. Dto. de Máquinas y Motores Térmico. Cálculos Psicrométricos [Internet]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/CartaPsy.htm>
- [7]. Burghardt MD. Ingeniería termodinámica. 2da. Edición. México: Editorial Harla; 1984.
- [8]. Villa Jadán SF. Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado

relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental [Tesis Título Ingeniero Mecánico]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción; 2008.

[9]. Obregón LG, Pertuz JC, Domínguez RA. Performance analysis of a laboratory scale cooling tower for different packing materials, water inlet temperature and mass flow ratio water-air. *Prospectiva*. 2017; 15(1):42-52.

Proyección de la demanda nacional de energía para el período 2012–2050 usando el modelo MAED: Caso Perú

Juan Ávila¹, Luís Aguirre Pesantes², Edward Rebaza², César Pizarro¹

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

² Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. Calle Bernardo Monteagudo 222, Lima 17, Perú.

Resumen

El estudio de la Demanda Nacional de Energía para el período 2012-2050 fue realizado en el marco del Proyecto OIEA RLA/2/0/15 «Apoyo a la elaboración de planes nacionales de energía con el fin de satisfacer las necesidades energéticas en los países de la región haciendo un uso eficaz de los recursos a mediano y largo plazo», auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). El trabajo fue realizado usando el Modelo para el Análisis de la Demanda de Energía (MAED) e involucra la demanda de energía a nivel nacional, incluyendo los requerimientos de los diferentes sectores económicos, considerando las nuevas tecnologías en los procesos de conversión energética y generación eléctrica, hábitos de consumo, política energética, crecimiento económico y tecnológico del país, los grandes proyectos mineros, industriales, infraestructura, exportaciones, etc., consolidado en el producto bruto interno (PBI) a nivel sectorial y total para el período 2012–2050. En la investigación se consideró el 2012 como año base porque es el período donde el país cuenta con información oficial completa y se plantearon escenarios de crecimiento bajo, medio o tendencial y alto. Los resultados indican que la energía consumida en el año 2012 fue de 21.76 GWh y la proyección de demanda para el año 2050 es de 68.56 GWh para el escenario medio, 88.33 GWh para el escenario alto y 60.25 GWh para el escenario de crecimiento bajo.

Palabras clave: Demanda de energía; Modelo MAED, Energía; Perú

National projection of energy demand for the period 2012-2050 using the “MAED” model: Peru Case

Abstract

The study of the National Energy Demand for the period 2012-2050 was carried out within the framework of the IAEA RLA 2/0/15 Project «Support for the elaboration of National Energy Plans in order to satisfy the energy needs in the countries of the region making effective use of resources in the medium and long term», sponsored by the International Atomic Energy Agency (IAEA). The work was carried out using the Model for the Analysis of Energy Demand (MAED) and involves energy demand at the national level, including the requirements of the different economic sectors, considering new technologies in the processes of energy conversion and electricity generation, consumption habits, energy policy, the economic and technological growth of the country, the large mining, industrial, infrastructure, export projects, etc., consolidated in the gross domestic product (GDP) at the sectoral and total level for the period 2012– 2050. In the investigation, 2012 was considered as the base year because it is the period when the country has complete official information and scenarios of low, medium or trend and high growth. The results indicate that the energy consumed in 2012 was 21.76 GWh and the projection of demand for 2050 is 68.56 GWh for the medium scenario, 88.33 GWh for the high scenario and 60.25 GWh for the low growth scenario.

Keyword: Energy demand; MAED model, Energy; Peru

1. Introducción

El ser humano a lo largo de la historia evolutiva ha realizado actividades que consumen energía, primero lo hizo con base a su propio

esfuerzo físico; luego, apoyado en los animales domésticos como los caballos, vacunos, auquénidos, etc. Después, por necesidad, empezó a utilizar fuentes primarias de energía, siendo la leña la primera y más importante

* Correspondencia autor: javila@ipen.gob.pe

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-1429-9117>

gracias a la abundancia de bosques y el poco esfuerzo para conseguirla.

Con la revolución industrial aparecieron nuevas opciones de energía, como la máquina de vapor (a carbón mineral) y otros inventos que mejoraron los medios de transporte, como la locomotora de George Stephenson (1825), sistema de locomoción que consumía grandes cantidades de carbón para convertir la energía calorífica en mecánica, su rendimiento era inferior a un 1%; por lo tanto, se requería grandes cantidades de carbón, originando una gran demanda de carbón mineral [1].

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial hubo una gran demanda de energía, siendo las empresas de los Estados Unidos las que se expandieron con mayor éxito. Para el año 1955 las dos terceras partes del petróleo del mercado mundial eran suministradas por cinco empresas de Estados Unidos y el Oriente Medio se convirtió en la mayor reserva de crudo del mundo. La Asamblea General de las Naciones Unidas reconociendo la importancia de la energía para el desarrollo proclamó el 2012 como el Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos.

En 1973 la creciente demanda de energía del mundo desarrollado sufrió una crisis aguda con visos de agotamiento de las reservas. Los países árabes productores de petróleo recortaron el suministro de crudo a los Estados Unidos y redujeron su producción, generando alarma entre los productores y consumidores. Una segunda crisis del petróleo se daría nuevamente el año 1978 cuando fue destronado el Sha de Persia, la producción de Irán cayó a niveles mínimos. En 1980 el petróleo crudo se había revalorizado 19 veces en comparación al año 1970. En el año 2012 el consumo de energía fue de 549.4 cuatrillones de BTU (5.7965×10^8 TJ) y en el año 2040 será de 815.0 cuatrillones de BTU (8.5987×10^8 TJ); es decir, la demanda de energía se incrementará en un 54.4 %.

Con relación a la generación mundial de electricidad en el año 2012 fue de 22752 TWh y la contribución de las diferentes fuentes energéticas fueron: un 40.2 % generado por uso de carbón mineral, un 22.4 % por uso de gas natural, un 16.5 % por uso de energía hidráulica, un 10.8 % generada por uso de la energía nuclear, un 2.7 % por uso de la energía solar y un 7.4 % por otros tipos de fuentes

energéticas [2]. De acuerdo con la World Nuclear Association (WNA) [3], el consumo de energía de los líquidos fósiles mantendrán la superioridad en el consumo, aunque la tasa promedio de crecimiento entre el año 2011 y 2050 será solo de un 1.1 %, el gas natural se incrementará de 121.6 cuatrillones de Btu en 2011 a 211.4 cuatrillones de Btu en el año 2040 con una tasa de crecimiento del 1.9 %, el carbón mineral ocupará el segundo lugar en magnitud de consumo de 152 cuatrillones de Btu en el año 2011 a 180.2 cuatrillones de Btu en el año 2040, la energía de origen nuclear se incrementará de 26.2 cuatrillones de Btu en el año 2011 a 46 cuatrillones de Btu en el año 2040 con una tasa de incremento promedio de 2.3 % y los otros tipos de combustibles, fundamentalmente fuentes renovables, se incrementarán de 60.6 cuatrillones de Btu en el año 2011 a 131.4 cuatrillones de Btu para el año 2040, con una tasa promedio de 2.6 %. Se observa que las fuentes renovables y la nuclear incrementarán su uso con mayores porcentajes.

A nivel nacional hay pocos estudios de proyección de demanda energética. Una de ellas realizada por Rojas Lazo O. [4] focalizada al consumo nacional de energía del sector residencial para el período 2005–2030, usando la herramienta MAED-D, muestran que el consumo de energía del sector residencial urbano y rural podría incrementarse hasta 7.845 GWh en el año 2030.

Un estudio de mayor envergadura, a nivel nacional, es el que realizaron Ávila *et al.* con el auspicio del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Proyecto “Fortalecimiento de capacidades para el Desarrollo de Sistemas Energéticos Sostenibles” para el período 2010–2030, considerado tres escenarios bajo, medio y alto. Determinaron que la demanda de energía total, para los 3 escenarios crece desde 15869 GWh en el año 2005 hasta 42665, 47704 y 54926 GWh para el año 2030, resultados que señalan que en el año 2030 se necesitará tres veces más de energía que la consumida en el año 2005 [5].

El objetivo principal del presente estudio fue conocer la demanda de energía de Perú con un horizonte al año 2050, tomando como base los datos oficiales del año 2012, como una herramienta para el desarrollo y propuesta del sector del Ministerio de Energía y Minas (MEM).

Tabla 1. Reservas probadas de energía comercial a diciembre 2012 (TJ) [6].

<i>Fuente</i>	<i>Reservas probadas</i>	<i>Estructura (%)</i>
Gas natural	15054242	50
Hidroenergía	5955666	20
Líquidos de gas natural	4180066	14
Petróleo crudo	3664935	12
Carbón mineral	321743	1
Uranio	744981	3
Total	29931634	100

A nivel nacional las reservas probadas de energía, al 31 diciembre del 2012, fue de 29931634 TJ (Tabla 1). En el año 2012 la producción de energía primaria fue de 1004911 TJ (Tabla 2). Se observa en la estructura de producción de energía primaria que continúa

prevaleciendo los hidrocarburos como la fuente principal. Asimismo, la producción de energía comercial (conformada por todas aquellas fuentes de energía susceptibles a ser fácilmente compradas o vendidas en el mercado) representó el 89 % del total.

Tabla 2. Producción de energía primaria (TJ) [6].

<i>Fuente</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>Variación (%)</i>
Energía comercial			
Gas natural + LGN	634173	649721	2
Petróleo crudo	147006	141266	-4
Hidroenergía	96959	96092	-1
Carbón mineral	4882	6185	27
Subtotal	883020	893264	1
Energía no comercial			
Leña	86091	83431	-3
Bagazo	18437	19430	5
Bosta y yareta	8585	8285	-3
Energía solar	263	501	91
Subtotal	113375	111647	-2
Total	996396	1004911	1

2. Metodología

Para este estudio de planeación energética se utilizó el Modelo para el Análisis de la Demanda de Energía (MAED), modelo facilitado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) que inicialmente adoptó el modelo MEDEE-2 [7] al que se le incorporó modificaciones importantes para hacerlo más apropiado su uso por los países en vías de desarrollo, denominándolo modelo MAED. Este modelo evalúa la demanda futura de energía tomando en cuenta escenarios de desarrollo socio-económico, tecnológico y demográfico a mediano y largo plazo [7] y permite la representación específica del patrón de consumo de energía del país. El usuario puede desagregar el consumo de energía de acuerdo con sus necesidades o la disponibilidad de datos que cuenta un país. Por esa versatilidad el MAED se ha convertido en una poderosa herramienta para modelar con

amplitud diversos patrones de consumo de energía. La ecuación genérica para el cálculo de la demanda de energía proyectada está representada en la siguiente fórmula [8]:

$$DE_t = (DE/PI)_{t_0} \times PI_t \times CE_t$$

Donde:

DE_t : Demanda de energía en el año futuro t.

$(DE/PI)_{t_0}$: Demanda específica de energía por unidad de parámetro impulsor en el año base.

PI_t : Parámetro impulsor en el año futuro t.

CE_t : Coeficiente que refleja la evolución específica de la demanda de energía por unidad de parámetro impulsor en el año futuro t.

El modelo MAED presenta una flexibilidad para desagregar la demanda de energía en seis sectores económicos y el sector residencial se puede desagregar en subsectores rural y urbano y en varias categorías de uso final de energía. Para la demanda total de energía para cada

categoría de uso final se considera cuatro sectores principales: Industria (incluye agricultura, construcción, minería y manufacturero), Transporte, Servicios y Residencial.

2.1. Año base

Para el estudio se consideró al 2012 como año base debido a que ese período fue relativamente estable, con un crecimiento promedio del PBI del 6.5 % y no hubo fenómenos naturales importantes. El horizonte considerado para el período de análisis abarca hasta el año 2050. En esta sección se presentan los datos utilizados en el estudio, así como los datos de consumo de energía por sectores económicos y el sector residencial. Los sectores económicos han sido agrupados como: agricultura, pesca, minería, energía, industria, servicios y transporte, de acuerdo con el requerimiento del modelo de Análisis de Demanda de Energía (MAED).

2.2. Consideraciones de crecimiento económico

Se ha considerado las asunciones de crecimiento proyectado por las instituciones del sector energético y económico, las tasas de crecimiento promedio de los estudios del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el estudio multianual del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) y el estudio del CEPLAN. Se elaboraron tres escenarios de crecimiento, el escenario medio o tendencial con una tasa de crecimiento promedio de 4.0 %, el escenario optimista con una tasa de

crecimiento promedio de 4.71 % y el escenario pesimista con una tasa de crecimiento promedio de 3.26 %.

Las consideraciones para el escenario medio son que el país continúe creciendo de modo moderado en el contexto global con aproximadamente un punto porcentual sobre el promedio mundial. Para el escenario optimista el desarrollo de grandes proyectos en el campo minero, energético e industrial que permitan crecer notoriamente sobre el promedio mundial alrededor de 2 puntos porcentuales. Para el escenario pesimista que el crecimiento sea solo alrededor del promedio mundial y que la recesión económica global afecte a la economía peruana y solo tenga un crecimiento alrededor de un 3 %.

2.3. Consumo de petróleo

Teniendo en cuenta que las reservas de petróleo crudo en el año 2012 fue de 116.2 GWa y el consumo requerido para el período 2012-2050 en el escenario medio es de 229.33 GWa se considera al petróleo como un recurso escaso y no permite satisfacer las necesidades para el período de estudio. En lo referente al gas natural se tiene reservas para el año 2012 de 477.4 GWa, lo que indica que se puede seguir ampliando el uso del gas natural en los diversos sectores económicos y residenciales.

En la Tabla 3 se muestra el consumo final de energía neta para el año 2012 por usos y fuentes para los sectores de consumo de energía. En ella se aprecia que el consumo total para el año 2012 fue de 680283 TJ.

Tabla 3. Consumo de energía neta por usos y por fuentes para el año 2012 (TJ).

Sectores	Carbón mineral	Leña	Bosta	Bagazo	Solar	Coque	Carbón vegetal	GLP	Gashol	Gasolina motor	Turbo	DB5	Petróleo residual	Gas Dis	Energía Elect.	Total
Consumo energético	24022	78827	8258	8713	287	19	1883	64405	51079	9543	30916	197309	15759	59747	129490	680283
Residencial		78671	8285		80		1769	29793						750	31164	150512
Comercial	8	25			202		113	2959	9	2		548	1	3835	24366	32067
Público					2			114	6188	1156	2164	2598	1		1736	13960
Transporte								12513	43520	8131	160632	160632	8653	23377	12	285591
Agropecuaria y Agroind.	73	128		8713	2			30	667	125	937	937	5		2662	13342
Pesquería								63	23	4	3497	3497	2174	216	1054	7031
Minero metalúrgico	2569					19		1633	72	13	14540	14540	91	3780	32209	54927
Industrial	21371	3					1	17301	601	12	14557	14557	4832	27789	36288	122854

Tabla 4. Tasas de crecimiento para el escenario tendencial.

<i>Período</i>	<i>Tasas</i>	<i>Fuente</i>
2012-2015	6.3%, 5.0%, 2.4%, 3.3%	PBI Histórico (Fuente BCRP)
2016-2017	4.0%, 4.5%	Fuente BCRP
2018-2030	4.50%	Fuente MINEM
2031-2040	4.3%, 4.2%, 4.1%, 4.1%, 4.0%, 3.9%, 3.8%, 3.7%, 3.6% y 3.5%	Fuente NUMES
2041-2050	3.50%	Se repite proyección disponible año 2040 (Fuente NUMES)

2.4. Producto Bruto Interno

Para la proyección del PBI se ha considerado las tasas que se muestran en la Tabla 4. Para el período 2012-2015 son las históricas; para el 2016 y 2017 se usaron los datos del Banco Central de Reserva; para el período 2018-2030 los datos del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), para el escenario 2031-2050 los datos de NUMES del MINEM. El Producto Bruto Interno se consideró en dólares constantes de 1994. Para el escenario de crecimiento alto se considera un incremento de 108,630 millones a 623,797 millones de dólares; el escenario medio o tendencial se

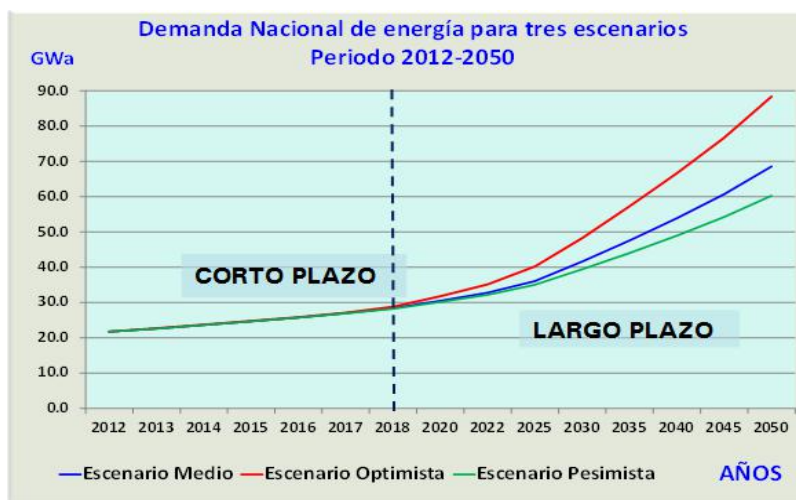
incrementa de 108,630 millones a 482,041 millones de dólares y el escenario de crecimiento bajo de 108,630 millones a 366,916 millones de dólares.

3. Resultados y Discusión

La demanda global nacional de energía para los tres escenarios considerados en este estudio se muestra en la Tabla 5. La demanda de energía hasta el año 2018 es de corto plazo por lo cual se consideró los tres escenarios iguales; sin embargo, para el año 2020 en adelante los escenarios se diferencian claramente.

Tabla 5. Demanda global de la energía por escenarios (GWa).

<i>Año</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2020</i>	<i>2022</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>	<i>2045</i>	<i>2050</i>
Escenario medio	21.76	22.64	23.66	24.68	25.77	27.02	28.41	30.53	32.80	36.11	41.65	47.60	53.94	60.70	68.56
Escenario optimista	21.77	22.73	23.76	24.79	25.88	27.13	28.82	31.82	35.17	40.24	48.30	57.31	66.64	76.70	88.33
Escenario pesimista	21.76	22.64	23.66	24.68	25.77	29.96	28.27	30.17	32.20	35.06	39.48	44.04	49.98	54.25	60.25

**Figura 1.** Demanda de energía para tres escenarios.

En la Figura 1 se presenta las proyecciones de demanda de energía para los tres escenarios, considerando al año 2012 donde la energía consumida fue de 21.76 GWh, la proyección de demanda para el año 2050 alcanza los 68.56 GWh para el escenario medio, 88.33 GWh para el escenario optimista y 60.25 GWh para el escenario pesimista.

4. Conclusiones

Se ha considerado el crecimiento proyectado por las instituciones del sector energético y económico, tomando las tasas de crecimiento promedio para el escenario medio o tendencial con una tasa de 4.0 %, para el escenario de crecimiento alto u optimista con una tasa de crecimiento promedio de 4.71 % y para el escenario de crecimiento bajo o pesimista con una tasa promedio de 3.26 %.

Los resultados de los tres escenarios nos indican que energéticamente el Perú necesita en los próximos 30 años, incrementar su capacidad de suministro de energía en 3.15 veces para el escenario medio, en 4.06 veces para el escenario optimista y en 2.77 veces para el escenario pesimista.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Organismo Internacional de Energía Atómica por su apoyo en la capacitación y suministro de los códigos de cálculo.

A los profesionales del Ministerio de Energía y Minas, del Organismo de Supervisión y fiscalización de la Energía y Minería, del Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico Interconectado por su importante

colaboración como parte del equipo de trabajo en la ejecución del presente estudio.

6. Bibliografía

- [1] George Stephenson. (Página Consultada el 30 de mayo del 2016). Dirección URL: http://en.wikipedia.org/wiki/George_Stephenson#Stephenson_memorabilia
- [2] International Energy Outlook 2016. U.S. Energy Information Administration. Office of integrated and International Energy Analysis. U.S. Department of Energy. Washington DC. 2015. May 2016.
- [3] Nuclear Power in the world Today. World Nuclear Association (Página consultada el 27 de junio 2016) Dirección URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>.
- [4] Rojas Lazo O. Proyección del consumo de energía residencial en el Perú (2005-2030) mediante el software Maed. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial. 2009; 12(2):50-60.
- [5]. Ávila J, Anaya O, Cáceres C, Altamirano V. Demanda nacional de energía: Período 2005-2030. Informe Científico Tecnológico. 2009; 9:131-136.
- [6]. MINEM. Dirección General de Eficiencia Energética (DGEE). Balance Nacional de Energía 2012.
- [7]. Organismo Internacional de Energía Atómica. Modelo para el Análisis de la Demanda de Energía (MAED-2). Manual de Usuario. IAEA/CMS/18/S. Vienna, 2007.
- [8] Ávila J, Anaya O, Cáceres C, Altamirano V. Demanda nacional de energía: Período 2005-2030. Informe Científico Tecnológico. 2009; 9:131-136.

Instrucciones para autores

La revista Informe Científico Tecnológico (*Inf. Cient. Tec.*) publica artículos originales, notas técnicas, estudios de casos y revisiones sobre temas relacionados con la ciencia y tecnología nuclear.

La publicación abarca los siguientes campos temáticos: Ingeniería de operación y mantenimiento nuclear; instrumentación y electrónica nuclear; reactores nucleares; combustibles nucleares; gestión de desechos radiactivos; diseño, desarrollo, innovación y fabricación de prototipos de aplicación nuclear; física nuclear, atómica y molecular; física de las partículas elementales; mecánica clásica y cuántica; radioquímica y química nuclear; producción de radioisótopos, moléculas marcadas y fuentes radiactivas; química de las radiaciones; técnicas analíticas nucleares y convencionales; seguridad nuclear y protección radiológica; accidentes e incidentes nucleares; protección física de los materiales nucleares; efectos biológicos de las radiaciones; dosimetría; metrología de las radiaciones; aplicaciones de los isótopos y fuentes radiactivas en la salud, industria, agricultura, alimentación, biología, medioambiente; difracción de neutrones, neutrografía; arqueometría; ciencia de los materiales; efectos de la radiación sobre los materiales; preparación y manufactura de materiales; propiedades mecánicas, ópticas, magnéticas, eléctricas asociadas; aspectos de gestión regulación y normativa en instalaciones nucleares y radioactivas; gestión del conocimiento y capital humano en la actividad nuclear.

Los manuscritos que se remitan al *Inf. Cient. Tec.* deben adoptar el formato IMRYD (Introducción, Material y Método, Resultados y Discusión) del American National Standard Institute, añadiéndole las siguientes secciones: título y resumen (en español e inglés), nombre del autor(es) con su identificador digital ORCID, filiación institucional, dirección electrónica para correspondencia, conclusiones, agradecimientos y referencias. Asimismo, para los aspectos de la representación de fórmulas, tablas, figuras, etc. los autores deben ceñirse a las pautas recomendadas por la AIP Style Manual (American Institute of Physics, 4th Ed.). Para el tratamiento de los datos numéricos y medidas se exige la adopción del Sistema de Unidades y para el tratamiento de las referencias bibliográficas el Estilo Vancouver.

Proceso de revisión por pares

Los manuscritos enviados al *Inf. Cient. Tec.* son sometidos a una evaluación por los miembros del Comité Editor, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos, alcance temático, correcciones de estilo y redacción. El incumplimiento de las normas de publicación condiciona el rechazo del manuscrito. En la segunda fase, los manuscritos son enviados —sin firma, filiación o signos que puedan identificar la autoría— a dos revisores nacionales o extranjeros especialistas en el área de conocimiento del trabajo, de acuerdo con los criterios señalados por los editores. Los informes y recomendaciones de los revisores deben ser subsanados obligatoriamente por los autores. En casos de discrepancia entre los revisores (un informe favorable y otro desfavorable) se solicitará un tercer parecer.

Financiación

La publicación es patrocinada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). La versión impresa se distribuye, gratuitamente, a las bibliotecas públicas, entidades del Estado, universidades y la comunidad científica nacional. Todas las colaboraciones de los autores tendrán la condición de aportación voluntaria y gratuita.

Periodicidad

Semestral.

Aviso de derechos de autor

El *Inf. Cient. Tec.* es una revista de acceso abierto. Los autores ceden sus derechos para su publicación bajo la Creative-Commons.

Indicaciones generales

- a) La extensión de los artículos no debe sobrepasar las 4000 palabras (equivalente a 8-9 páginas).
- b) Los manuscritos no deben haber sido publicados anteriormente en ningún medio.
- c) Los artículos serán redactados en la fuente "Times New Roman", tamaño 11 puntos, papel tamaño A4 (márgenes izquierdo 3 cm, derecho, superior e inferior 2,5 cm).
- d) La extensión del resumen no debe rebasar las 200 palabras.
- e) El número de citas para la redacción de un artículo deberá tener como mínimo 10 referencias a trabajos publicados en libros, revistas nacionales e internacionales, patentes, tesis, actas de congresos, monografías, etc. Los autores deben restringir al mínimo el empleo de referencias a documentos internos de difícil obtención.
- f) En las autorías de los trabajos se consignará en primer lugar al autor principal, quien deberá colocar su e-mail y ORCID iD para correspondencia; seguidamente, se incluirán a los coautores que hayan realizado contribuciones substanciales al artículo durante la concepción, diseño, análisis y la interpretación de datos. Un coautor, ante la ausencia del autor principal, deberá dar cuenta y estar en condiciones de sustentar el trabajo.
- g) Los autores deben colocar su filiación institucional indicando el nombre, dependencia, dirección, ciudad y país de la institución, universidad u organización a la que están vinculados. En caso de que tuviesen 2 o más filiaciones las colocarán en orden de importancia.
- h) Los autores deben registrarse en la plataforma de la revista y subir sus manuscritos de acuerdo con las pautas indicadas o enviarlos directamente en formato electrónico al e-mail: ceid@ipen.gob.pe

Indizaciones

El *Inf. Cient. Tec.* es referenciada en:

- INIS Database (International Atomic Energy Agency)
- ETDEWEB World Energy Base
- Google Scholar