

Construcción de un prototipo de mezcla bifásica radioactiva para evaluación de mapas de corrección intrínsecos en cámaras gamma Spect

Building of a radioactive two-phase mixing prototype for the evaluation of extrinsic correction maps in spect gamma cameras

María Velásquez¹, Irla Mantilla², Josep Martí³ Alex Pachas⁴

¹ Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas, Av. Angamos Este 2520, Surquillo y Av. Túpac Amaru 210 Lima- Perú.

² Laboratorio de Simulación e Investigación Numérica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210 Lima- Perú.

³ Universidad de Navarra – Pamplona; España.

⁴ Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica.

RESUMEN

El buen funcionamiento del Hardware y Software de una Cámara Gamma SPECT, depende de la correcta configuración y del control de calidad. Estas acciones son esenciales para la obtención de imágenes clínicamente válidas. Los fabricantes, recomiendan estas acciones, sin embargo, no existen técnicas descritas en los manuales correspondientes a estos equipos. Los objetivos del presente trabajo consisten en proponer una técnica exclusiva para el control de calidad extrínseca de una Cámara Gamma SPECT de fabricación variable que estén reconocidas en NEMA, IEC. Para ello se construye un módulo mezclador automático para preparar fantasmas de campo uniforme, mediante el cual nos permitirá realizar los controles de calidad de los equipos SPECT. El módulo está constituido por un equipo mezclador automático y de un maniquí (denominado fantoma). Mediante la homogeneidad de mezclas bifásicas, obtenemos mapas de corrección extrínsecos, las mismas que nos sirven para evaluar la calidad del equipo. Se puede observar que depende de la homogeneidad de la mezcla y su distribución óptima de la mezcla miscible en el fantoma y en cantidades de volúmenes precisos, tales como: Cloruro de sodio 0.9% (3.5 litros) y Pertecnetato de sodio Tc 99m (?20mCi) de 0.1 a 0.4 ml. Considerando además la exposición a la radiación al preparar la mezcla fluida al tratar de conseguir que una pequeña cantidad de Tc-99m, se concentre adecuadamente por el volumen de agua destilada en el maniquí, en el menor tiempo posible. El rendimiento del módulo mezclador analizado ha sido un trabajo de investigación muy importante, éste depende del diseño apropiado del sistema mezclador (impulsor), conformado por la geometría, el modelo matemático de la mezcla, análisis de la concentración, pruebas (geometría recipiente, volumen, diámetros), velocidad (potencia del motor), forma de las paletas mezcladoras (ángulo y número) componentes muy importantes en los objetivos trazados. La eficacia de la mezcla bifásica se muestra con la adquisición óptima de las imágenes de calidad de la Cámara Gamma SPECT, que actualmente se usan en los centros de Medicina Nuclear, INEN.

Palabras Claves: equipos SPECT, líquidos miscibles, mezcla newtoniana, uniformidad extrínseca, uniformidad tomo gráfica, evaluación de operación total.

ABSTRACT

Proper operation of the hardware and software of a SPECT Gamma Camera depends on its correct configuration and quality control. These are essential to obtain clinically valid images. In spite of the fact that these are recommended by the equipment manufacturer, these operations are not described in the manuals. The objective of the present work is to propose a unique method for the extrinsic quality control of any SPECT Gamma Camera manufactured to NEMA – IEC specifications. For this purpose, an automatic mixing module has been built to prepare uniform field phantoms, so as to carry out the quality control of the SPECT equipment. The module consists of an automatic mixer and a dummy (phantom). Thanks to the homogeneity of two-phase mixtures, we can obtain extrinsic correction maps which will serve to evaluate the quality of the equipment. This operation depends upon the homogeneity of the mixture and its optimal distribution in the phantom and in precise quantities, such as: sodium chloride 0.9% (3.5 liters) and sodium pertechnetate Tc 99m (?20mCi) from 0.1 to 0.4 ml. Radiation exposure must also be considered while preparing the mixture and trying to obtain an adequate dilution of a small amount of Tc-99m in the volume of distilled water contained in the dummy in the shortest possible time. Analysis of the performance of the mixing module has been a very important research work. This depends upon an appropriate design of the mixing system: geometry of

* Correspondencia:
E-mail: mvelasquez@inen.sld.pe

the impeller, mathematical modelling of the mixture, measurement of concentrations, various tests (geometry of the container, volume, diameter), speed and power of the motor, shape of the mixing blades (angle and number), all being important components to reach our objectives. The efficiency of the two-phase mixture has been demonstrated when the SPECT Gamma Camera currently used by the INEN Nuclear Medicine Center obtained images of optimal quality.

Keywords: Equipment SPECT, size of pixel, center of rotation, tomographic uniformity, total evaluation of system.

1. INTRODUCCIÓN

El control de calidad en una Cámara Gama SPECT, puede sustentarse según las mediciones que se realizan, tales como las medidas intrínsecas que se realizan sin el colimador y las medidas extrínsecas que se realizan con el colimador como se puede ver en [4, 5, 6].

En consecuencia, las medidas intrínsecas evalúan el funcionamiento interno de la Cámara, mientras que las medidas extrínsecas reflejan el funcionamiento de todo el sistema de la cámara. En los estudios clínicos ambas medidas son importantes y deberían ser llevadas a cabo según las referencias [12, 13].

Las medidas intrínsecas pueden realizarse, generalmente, con una fuente puntual a una distancia que lo determine el fabricante.

Las medidas extrínsecas requieren de una fuente recargable, y estas son más difíciles de realizar con exactitud ya que la fuente debe quedar bien uniforme. Existe otra opción la cual consiste en utilizar una fuente sellada de Co-57 y descartable de alto costo.

En el presente trabajo de investigación se realizan las mediciones o calibraciones extrínsecas de los equipos, considerando una técnica exclusiva para el control de calidad extrínseca de una Cámara Gamma SPECT de fabricación variable que estén reconocidas en NEMA, IEC, siguiendo la referencia [3].

En el Perú, se cuenta actualmente con 42 Servicios de Medicina Nuclear, es por ello el motivo de ésta investigación. La mayoría de estos servicios no cuenta con una fuente del tipo Co-57 (Fig.5), por el alto costo y vida media relativamente corta. El trabajo desarrollado, consiste en la elaboración de un recipiente (reactor de mezcla bifásica) para un procedimiento óptimo de modo automatizado de la mezcla y del llenado preciso en el fantoma (maniquí) (Fig.2) y (Fig. 6) con la finalidad de una distribución de la mezcla y de concentración homogénea. Este procedimiento se debe realizar con el máximo cuidado y con la debida protección radiológica por parte, del operador, aunque existe poca información sobre evidencias detectadas y los daños producidos a futuro en relación a las dosis absorbidas por el operador, lo cual genera un margen de incertidumbre, según las referencias [9, 10, 11].

Los resultados obtenidos se requieren para evaluar el equipo y de este modo se brinda la confianza y seguridad al experto en realizar los procedimientos de Control de Calidad Extrínseco.

1.1 Uniformidad del sistema Cámara Gamma

Esta propiedad del equipo está dada por un indicador de rendimiento de la cámara gamma, éste es el más importante del proceso porque es el que evalúa la diferencia de la respuesta de éste en diferentes puntos del campo visual.

Según [6, 13], se considera dos formas de estimar la Uniformidad del campo, denominada Uniformidad Integral (UI), es la que considera a todos los píxeles del campo visual, y la segunda Uniformidad diferencial (UD) que calcula el promedio de las variaciones sobre 5 píxeles.

Estos indicadores según [1, 2], determinan si el equipo está en condiciones de efectuar estudios con imágenes clínicamente válidas. Para lograr una buena uniformidad [13], es necesario que el equipo cuente con un mapa de corrección de la energía y linealidad, además de tener la ventana de energía bien centrada sobre el fotópico del espectro de radiación del radionúclido.

Dado que es importante evitar la contribución de la radiación dispersa, a veces se eligen ventanas de medición asimétricas hacia las altas energías. Este procedimiento degrada la uniformidad [4, 6] y por lo tanto se recomienda volver a evaluar la UI para verificar que el valor siga siendo aceptable. De acuerdo a las especificaciones de los fabricantes, debe cumplirse que $UI \leq 5\%$, $UD \leq 5\%$, intrínseca y $UI \leq 10\%$, $UD \leq 10\%$, extrínseca.

1.2 Preparación de la fuente de uniformidad

En América Latina, suele utilizarse el maniquí o fantoma de llenado y el método de uso es el siguiente: llenar el fantoma hasta la mitad con agua, luego se añade el material radioactivo agitando manualmente la mezcla por unos 10 minutos en el aire, después se rellena con agua la otra mitad, dejando una burbuja grande de aire, nuevamente se agita la nueva mezcla sosteniéndolo en el aire por otros 10 minutos, procurando que la mezcla se produzca en todo el campo; el peso aproximado es de 7 kilos (acrílico más agua y 99mTc). Otra recomendación de otros países latinos, según [5] es, llenar como se mencionó en dos partes, luego se realiza la agitación por medio de una hamaca (sábana) sosteniendo entre dos personas, se mueve el fantoma y finalmente se rellena con agua dejando una burbuja, se continúa el movimiento como en el caso anterior. En estos dos métodos la cercanía a

la fuente es muy próxima a las manos, casi en contacto, a cuerpo entero entre 20 a 30 cms, y por la hamaca a 50 cms, el tiempo de agitación está en un promedio de 20 minutos.

En estos dos métodos se obtuvo como resultado valores extrínsecos altos y próximos al 10% en UI y UD.

Un método antiguo y necesario que habíamos adaptado en el centro de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas de Lima, para la preparación de mezcla y traslado al fantoma (Maniquí) de modo externo y manual, en un recipiente de plástico apoyados con una paleta, girando y a una distancia entre las manos y el recipiente de 25 cms, y a cuerpo entero con una distancia de 40 cms, el promedio de tiempo en la agitación de la mezcla era de 20 minutos. Luego se rellenaba el maniquí con cuidado (en 12 minutos), para finalmente trasladar el maniquí conteniendo la mezcla hacia la sala de adquisición de imágenes, permitiendo el alto riesgo de irradiación.



Figura 1. Cubeta (anterior) de plástico, con mezcla fluida radioactiva y Ducto de transporte de la mezcla hacia el fantoma (maniquí).



Figura 2. Ubicación de TLDs-100 encima de la cara superior del fantoma

Se evaluó la mezcla ubicando TLDs-100 en cinco sectores del fantoma (maniquí), como se puede observar en la figura 2, se utiliza mayor tiempo de mezcla (20 minutos) y exposición radioactiva en la preparación de mapas de corrección y adquisición de imágenes clínicas válidas.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dada la importancia de realizar las calibraciones intrínsecas y extrínsecas de los equipos SPECT con colimador, o juego de colimadores, y así conseguir: imágenes médicas de calidad, es decir libre de errores, protección del especialista en los controles de calidad radiológica, protección del medio ambiente y en cuanto al costo de manera accesible. Considerando que actualmente tenemos 42 Servicios de Medicina Nuclear en el Perú, y no se cuenta con fantasmas de Co - 57, se tendría que importar de otros países, la gestión de adquisición de estas fuentes es compleja por los permisos restringidos y sumado al alto costo. En ese sentido es importante crear e implementar un sistema de procedimiento automatizado, que cumpla la normativa vigente [9, 10], con bajo costo y respetando las consideraciones expuestas anteriormente.

Una contribución fundamental que se desea alcanzar en esta investigación, es la construcción de un prototipo de mezcla bifásica de sustancias líquidas apropiadas para evaluación de mapas de corrección Extrínsecos en cámaras gamma SPECT, con una técnica automatizada de mezclado y llenado del fantoma (Maniquí) libre de riesgo y con la calidad requerida según la normatividad expuestas en las referencias [13].

2.1 Métodos y Materiales de la construcción de un prototipo de preparación mezcla y llenado del fantoma de modo automatizado para la obtención de mapas de Corrección Extrínsecos

Se ha diseñado primero en la plataforma de Ansys, la geometría de la cubeta (fig. 3) con el fin de aprovechar toda la mezcla, sin dejar residuo radioactivo.

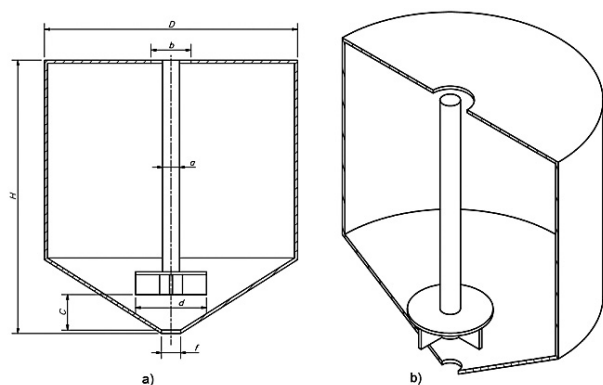


Figura 3. a) Vista de Corte radial del tanque agitador
b) Vista Isométrica del tanque

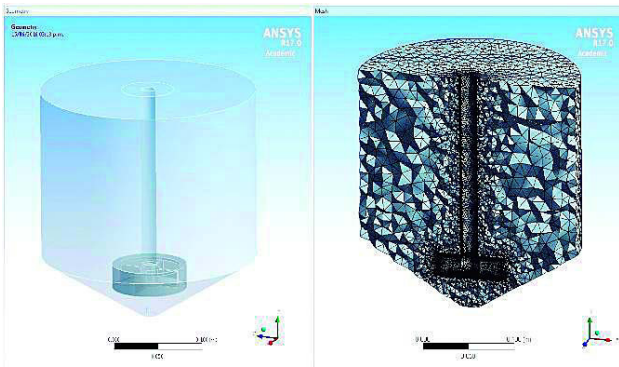


Figura 4. Paleta y tanque agitador mallado con el Método de Elementos Finitos 3D de la aplicación de diseño en la plataforma de ANSYS.

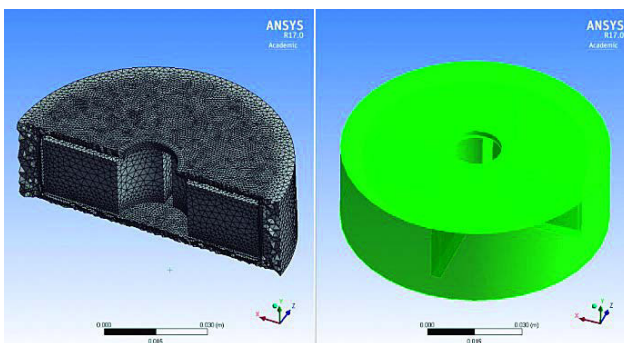


Figura 5. Diseño del impulsor mallado con MEF y con refinamiento de malla cerca de la superficie de las paletas

El mezclado y/o agitación de líquidos miscibles se efectúa con el objeto de lograr una distribución uniforme del componente radioactivo en el volumen total del agua por medio de una fuerza motora.

Se considera que para acelerar la difusión molecular dentro de los líquidos que intervienen en la mezcla, se puede utilizar energía mecánica proveniente de un agitador rotacional como se puede observar [8, 14, 15], y de este modo es posible obtener buenos resultados.

2.2 Construcción del prototipo

En la implementación del prototipo utilizamos un motor de fase partida de 1800 rpm, al cual acoplamos un eje de acero inoxidable, cuya longitud es de con un diámetro de 17 mm, en él se ha soldado cuatro alabes rectangulares (paletas) en forma de cruz cuya dimensión de área es de 20 x 24 (mm)², la cubeta tiene las dimensiones de: diámetro 25.3 cms, altura del cilindro 17 cms, altura del cono 10 cms como se muestra en la figura 6.

Equipo para la adquisición de imágenes en esta investigación es de tipo SPECT, marca SIEMENS, modelo ECAM de 1 y 2 detectores.

El tiempo de mezclado y la homogeneidad de la mezcla son variables muy importantes y la

homogeneidad no aumenta indefinidamente con el tiempo, sino que existe un tiempo de mezclado óptimo en un cierto intervalo finito [5].

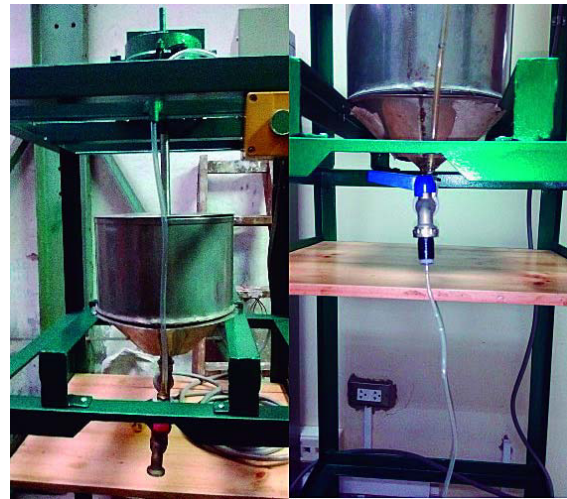


Figura 6. Prototipo de tanque (nueva cubeta) construido para la simulación experimental y computacional del sistema automatizado de mezcla y llenado del fantoma.



Figura 7. Contador de pozo con Display, modelo VPA - Veenstra



Figura 8. ⁵⁷Co fuente de 10-15 mCi cuando es nueva, 122 keV γ m Vida media 270 días.



Figura 9. Maniquí recargable con ^{99m}Tc y agua con 10-20 mCi, Vida media 6 horas.

Proceso de Evaluación experimental del sistema creado para preparación de la mezcla bifásica y llenado automatizado del fantoma



Figura 10. Mezclador diseñado y el motor de conexión externa

Se ha utilizado un contador de pozo modelo VPA - Veenstra, para contar microgotas radiactivas (cps) de diferentes sectores del recipiente, se ha extraído las gotas con una Micropipeta Oxford de 40 microlitros, además se ha medido las gotas con un Curímetro PTW FREIBURG, se ha utilizado aproximadamente 740 MBq (20 mCi) de ^{99m}Tc para la mezcla, por cada experimento se han extraído más de 20 muestras con sus respectivos Tips (punta o succionador) del material radiactivo.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Se llena el reactor (cubeta) con 3,5 litros de agua destilada. Hasta una marca que tiene el ducto externo (que señala el nivel de agua).
- Se conecta el ducto del caño (llave cerrada) al maniquí.
- Se mide el material radiactivo que se va a echar al reactor
- Se enciende el reactor por 5 segundos, hasta que el impulso de arranque cese y se estabilice el movimiento.
- Se agrega el material radiactivo ^{99m}Tc , se espera que el movimiento continúe entre 30 a 60 segundos.
- Se apaga el motor para que cese el movimiento.
- Se abre la llave del reactor cuyo terminal está conectado al maniquí, se registra el tiempo de ingreso de material, se espera que se llene el maniquí en 12 minutos, luego se cierra el maniquí con cuidado de derrame que provoque contaminación.
- En el visualizador externo se debe prever que no haya material radiactivo en el interior del reactor.

Se puede Observar que la mezcla resultante es homogénea y se obtiene a partir de los 25 a 30 segundos. También se puede verificar la homogeneidad de la mezcla extrayendo muestras de 40 microlitros con la micropipeta y relacionando la ubicación de cada tip con el contenido radiactivo en un tubo de ensayo.

Se ha recolectado muestras de la mezcla en los tiempos de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 segundos. Ver tablas 1, 2, 3, 4 y 5.

En cada muestreo se ha cuantificado por dos indicadores. Cuentas (cps) y uCi de cada tip extraído.

Después de 30 segundos de mezclado automatizado se considera que es el tiempo mínimo para lograr que se mezclen los dos líquidos, luego se ha procedido a llenar el maniquí, posteriormente se ha adquirido los mapas de corrección extrínseco. Cualitativamente es homogéneo y Cuantitativamente se obtuvo resultados menores de 10% en la UI y UD en el CFOV y UFOV.



Figura 11. Gradilla de tubos de ensayo (Sobre una mesa) conteniendo los tips cargados de ^{99m}Tc .



Figura 12. Rotulación de tubos para la toma de muestras de la mezcla

Modelo de Simulación numérica de la Concentración volumétrica, velocidad y cálculo del tiempo de mezcla

Una de las variables importantes que se determinan en el modelo de mezcla bifásica homogénea, es el tiempo de mezcla, y la concentración volumétrica asumiendo una velocidad de mezcla constante, para esto se utiliza las ecuaciones de continuidad y movimiento de la Dinámica de fluidos bifásicos [5, 7]. Entre los Parámetros importantes considerados que caracterizan la Hidrodinámica del tanque de Agitación son:

3.1 Número de Reynolds

Según las leyes de conservación de la Dinámica de fluidos, Si un fluido es laminar o turbulento esto se debe al número adimensional de Reynolds.

En particular, el número de Reynolds para el sistema con impulsores rotatorios, lo obtenemos del análisis experimental y se evalúa a través de la siguiente ecuación expresada por:

$$Re = \frac{ND^2}{\nu}$$

Donde D es el diámetro del tanque, N es la velocidad rotacional del impulsor y la viscosidad cinemática del fluido de la mezcla. El flujo en un tanque se considera turbulento, si el número de Reynolds, $Re > 10,000$, según la referencia [14].

Para el análisis experimental y computacional se realiza el procedimiento que a continuación se detalla:

- i. Se toman muestras de la mezcla en diferentes intervalos de tiempo durante la operación de mezclado
- ii. Las muestras se analizan para determinar la concentración volumétrica del material radiactivo en el agua destilada.
- iii. La desviación Estándar σ , es variable y depende de la concentración volumétrica que se obtiene del conteo promedio de cada grupo de muestras con referencia a la muestra que tiene más cuentas (cps), realizadas en el correspondiente tiempo de mezcla (t_m). Ésta se obtiene de cada lote de muestras tomadas para cada t_i .
- iv. Se obtiene las gráfica de índices de mezclado vs tiempo, la cual indican el funcionamiento de la mezcladora y la eficiencia del mezclado
- v. Se calcula el tiempo óptimo de mezclado asignado como t_m .

El objetivo del presente trabajo es conseguir una mezcla homogénea en el menor tiempo posible, sin exponerse al riesgo de preparación de la mezcla, en particular el número de Reynolds calculado a continuación es:

$$Re = 30 * (25,3)^2 / 0,8 * 10^{-6} = 2400337,5 > 10,000$$

Por lo tanto se trata de un modelo de mezcla turbulento.

Cuando se mezclan fluidos de baja viscosidad se obtienen mezclas de elevada homogeneidad [5], por lo que pueden utilizarse pocas muestras en el análisis de mezclado, en particular consideramos la mezcla de los líquidos agua y Pertecnetato de sodio - 99mTc.

En el caso de los líquidos usados, se puede utilizar la velocidad Nominal (VN) y el tiempo de mezclado (t_m) para definir un parámetro (K), el cual depende del tipo de recipiente mezclador y naturaleza de los líquidos componentes a mezclar. En particular, definiremos a éste por:

$$K = \alpha (D^3 VN) / (D^2 t Z),$$

$$t_m = \alpha \ln[\sigma/K], \quad \alpha \in (0,1]$$

Donde:

- Z : altura del líquido (m)
- D : Diámetro del agitador (m)
- VN : Velocidad Nominal de agitación (rps)
- Dt : Diámetro del recipiente (m)
- α : Constante de proporcionalidad
- σ : Desviación estándar

Luego de realizar el procedimiento (i) - (v), hemos observado heurísticamente, que con $\alpha = 1$, se alcanza la homogeneidad de la mezcla, tanto experimentalmente como en simulación numérica, que a partir de un intervalo de tiempo $5 \leq t_i \leq 45$, en segundos, se obtienen los resultados que se muestran en las tablas $\{1, \dots, 10\}$ y los gráficos respectivamente que se muestran a continuación:

Hemos considerado heurísticamente, que con $\alpha \geq 5$, tanto experimentalmente como en la simulación numérica, a partir de t_i en segundos, $25 \leq t_i \leq 45$, se alcanza la homogeneidad de la mezcla, para el mezclador en particular:

$$K = 5 \times (1.11831461) = 5.59157306$$

Y el tiempo de mezcla es

$$t_m = \alpha \ln[\alpha/K] = 5 \times 5.28117151$$

$$t_m = 26.4058575 \text{ segundos}$$

Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 1: Tiempo de mezcla $t_m = 5$ segundos
Y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.**

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:01	4.20	63
2	09/07/2016 14:02	4.33	65
3	09/07/2016 14:03	4.07	61
4	09/07/2016 14:05	3.87	58
	promedio	4.12	
	desvest	0.19619293	
	cv	0.04764856	

Tabla 2: Tiempo de mezcla $t_m = 10$ segundos y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:06	258.93	3884
2	09/07/2016 14:07	262.87	3943
3	09/07/2016 14:09	265.73	3986
4	09/07/2016 14:10	248.53	3728
	promedio	259.02	
	desvest	7.5253947	
	cv	0.0290539	

Tabla 3: Tiempo de mezcla $t_m = 15$ segundos y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:14	903.27	13549
2	09/07/2016 14:16	930.27	13954
3	09/07/2016 14:18	944.73	14171
4	09/07/2016 14:19	975.27	14629
	promedio	938.39	
	desvest	29.9982149	
	cv	0.03196792	

Tabla 4 : Tiempo de mezcla $t_m = 20$ segundos y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:26	1777.13	26657
2	09/07/2016 14:29	1846.53	27698
3	09/07/2016 14:30	1717.00	25755
4	09/07/2016 14:31	1707.13	25607
	promedio	1761.95	
	desvest	64.3167777	
	cv	0.03650323	

Tabla 5: Tiempo de mezcla $t_m = 25$ segundos y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:34	2376.07	35641
2	09/07/2016 14:36	1984.00	29760
3	09/07/2016 14:38	2119.47	31792
4	09/07/2016 14:39	2095.47	31432
	promedio	2143.75	
	desvest	165.743901	
	cv	0.07731485	

Tabla 6: Tiempo de mezcla $t_m = 30$ segundos y contaje radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:42	2358.00	35370
2	09/07/2016 14:45	2507.87	37618
3	09/07/2016 14:46	2555.13	38327
4	09/07/2016 14:48	2185.67	32785
	promedio	2401.67	
	desvest	166.724804	
	cv	0.06942044	

Tabla 7: Tiempo de mezcla $t_m = 35$ segundos y contejo radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 14:51	2749.07	41236
2	09/07/2016 14:54	2700.00	40500
3	09/07/2016 14:56	2740.93	41114
4	09/07/2016 14:58	2777.20	41658
	promedio	2741.80	
	desvest	31.9061635	
	cv	0.01163694	

Tabla 8: Tiempo de mezcla $t_m = 40$ segundos y contejo radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 15:01	2830.00	42450
2	09/07/2016 15:03	2830.93	42464
3	09/07/2016 15:04	2854.93	42824
4	09/07/2016 15:05	2790.87	41863
	promedio	2826.68	
	desvest	26.5173118	
	cv	0.00938107	

Tabla 9: Tiempo de mezcla $t_m = 45$ segundos y contejo radiactivo (cps) en 15 segundos.

# muestra	Fecha y Hora	cps	Contaje total
1	09/07/2016 15:10	2782.93	41744
2	09/07/2016 15:12	2749.20	41238
3	09/07/2016 15:15	2734.40	41016
4	09/07/2016 15:17	2765.20	41478
	promedio	2757.93	
	desvest	20.8784313	
	cv	0.00757032	

Tabla 10: Porcentaje de concentración de T_c 99m en la mezcla (homogeneidad): cuentas versus tiempo

t_m	Fecha/hora	Cal. Dec. mCi	uCi	cps c/tip	cps valor exper.	cps/uCi	% Concentración
5	09/07/2016 14:01	0.00012 8914	0.12891 4286	4769.82 8571	4.1175	31.9398 2713	0.14566 5458
10	09/07/2016 14:06	0.00012 7679	0.12767 9177	4724.12 9547	259.015	2028.63 933	9.163215 182
15	09/07/2016 14:14	0.00012 5728	0.125727 569	4651.92 006	938.385	7463.63 7499	33.1973 9659
20	09/07/2016 14:26	0.00012 2856	0.12285 5948	4545.67 0059	1761.9475	14341.57 267	62.3326 992
25	09/07/2016 14:31	0.00012 1679	0.121678 883	4502.118 664	2143.7525	17618.11 458	75.8398 759
30	09/07/2016 14:42	0.00011 9129	0.119128 865	4407.76 8017	2401.6675	20160.2 4826	84.9641 762

t_m	Fecha/hora	Cal. Dec. mCi	uCi	cps c/tip	cps valor exper.	cps/uCi	% Concentración
35	09/07/2016 14:51	0.00011 7082	0.117082 34	4332.04 6591	2741.8	23417.7 0752	96.9970 9819
40	09/07/2016 15:01	0.00011 485	0.11484 9627	4249.43 6205	2826.6825	24612.0 3027	100
45	09/07/2016 15:10	0.00011 2877	0.112876 561	4176.43 2765	2757.9325	24433.1 7258	97.5678 2023

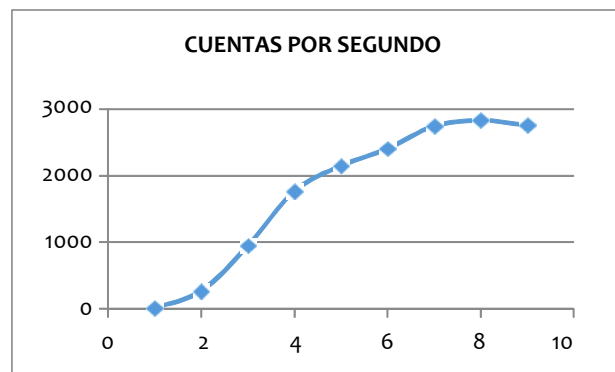


Figura 13. Conteo de las muestras con respecto a 10 segundos de mezcla

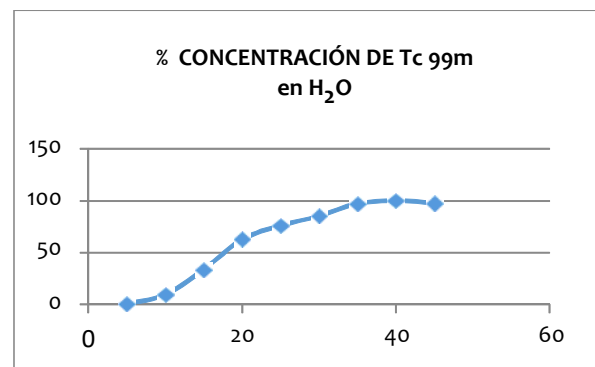


Figura 14. Concentración volumétrica de T_c 99m en las muestras en [5, 45] segundos de mezclado

Tabla 11 Desviación Estándar respecto al tiempo y a la concentración volumétrica

t_m	% Concentración	Des. Estándar
5	0.145665458	0.7061
10	9.163215182	0.6423
15	33.19739659	0.4724
20	62.3326992	0.2663
25	75.8398759	0.1708
30	84.9641762	0.1063
35	96.99709819	0.0212
40	100	0.0000
45	97.56782023	0.0172

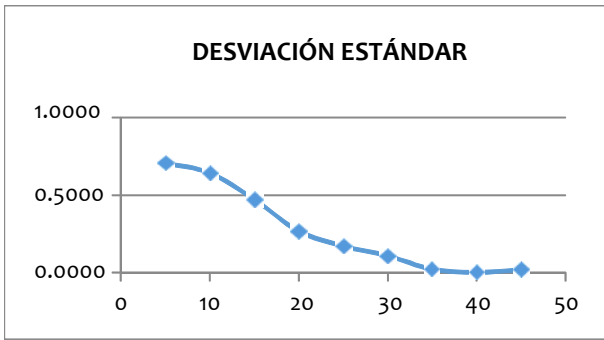


Figura 15. Desviación Estándar respecto a la concentración volumétrica en el intervalo de tiempo [5, 45] segundos de mezclado

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para la simulación numérica de la Concentración volumétrica del flujo de mezcla se considera, el tanque e impulsor que se puede observar en el prototipo diseñado y construido ver las figuras 3, 4, 6 y 10, y un modelo de tipo Turbulento resuelto numéricamente en base al Método de Elementos Finitos [5, 17] para el modelo de mezcla, en este caso líquido - líquido, considerando la respectiva densidad y viscosidad cinemática de los líquidos que intervienen.

En la simulación numérica se considera como dato la concentración volumétrica inicial (el promedio de los valores del análisis experimental), la geometría del recipiente del prototipo construido (cubeta cilindro con base cónica y orificio de salida de 3cm y paleta de mezcla con dos alabes y sus respectivas dimensiones), tiempo de descargue al fantoma, depende del área de la sección transversal, altura y ángulo de sección cónica del tanque, el óptimo, es aprox. 12 minutos. Los resultados se han hecho utilizando las librerías disponibles en la Plataforma de ANSYS, como se pueden observar en los resultados que a continuación se muestran.

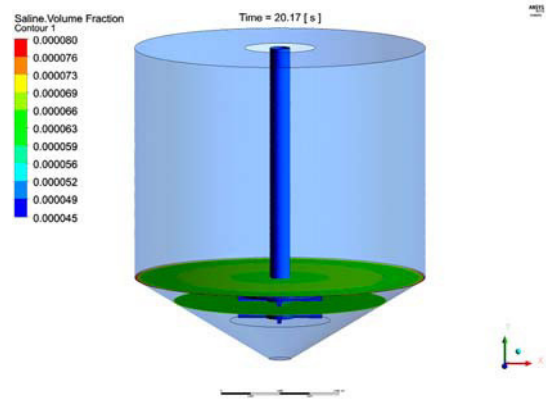


Figura 13. Concentración volumétrica en el tanque agitador, tiempo de mezcla 20 segundos.

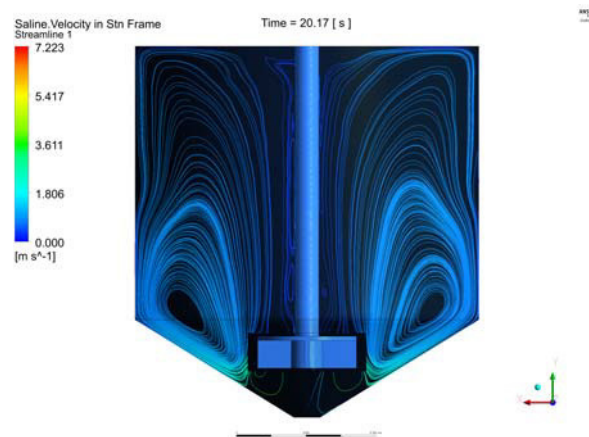


Figura 14. Distribución del flujo de la mezcla homogénea, en una sección transversal del tanque, y a 0.05 m y 0.07 m de altura respecto a la base del tanque, se observa la velocidad y captura de las líneas de corriente.

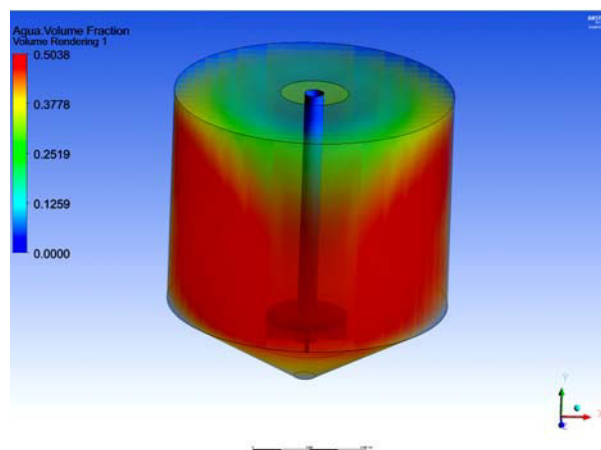


Figura 15. Desarrollo de la concentración volumétrica de la mezcla homogénea y velocidad del flujo de mezcla en el tanque, vista 3D.

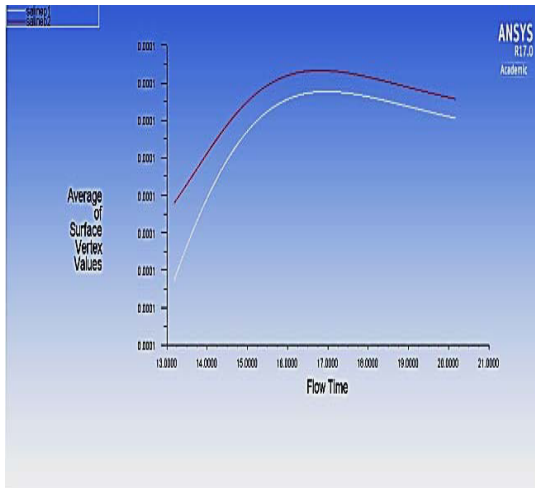


Figura 16. Comportamiento de la concentración volumétrica del flujo de mezcla salino ($Tc-99m$) en el tanque de agitación, respecto al tiempo de mezcla y según los puntos de monitoreo de alturas, Punto 1 (blanco) 0.05 m y Punto 2 (rojo) 0.12 m respectivamente.

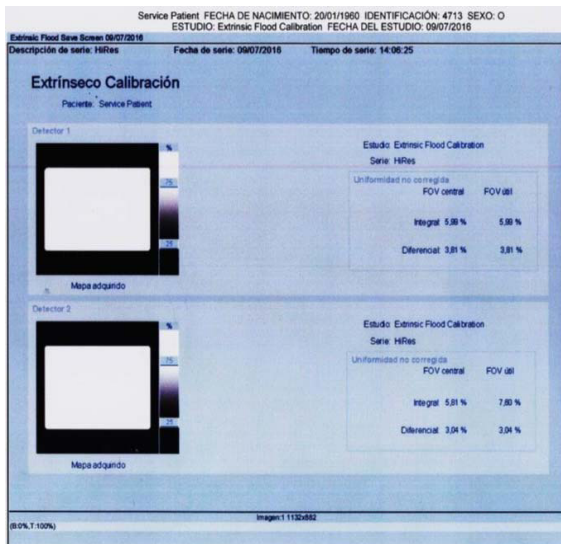


Figura 17. Mapa de corrección extrínseca obtenido después de utilizar el prototipo diseñado con sistema automatizado, tiempo de mezcla 45 segundos.



Figura 18. Aquí se observan los efectos de los mapas de corrección extrínsecos en las imágenes obtenidas en un Equipo SPECT antes y después de la corrección.

5. CONCLUSIONES

1. Los resultados fundamentales de esta investigación sirven para evaluar la eficiencia del prototipo de mezcla con el nuevo método de la mezcla automatizada, como se observa en las tablas y gráficos de los resultados. Las experiencias con el método antiguo, fueron casi similares en calidad de la imagen, y menores al 10% en la UI. Pero el riesgo radiológico era alto en la preparación de la mezcla.
2. El nuevo método es mejor también por la disminución del tiempo de mezcla y menor exposición del operador en la preparación de la mezcla.
3. En cuanto a la protección del medio ambiente, es menor la posibilidad de contaminación en su eliminación de la mezcla, puesto que el decaimiento del material radiactivo es de menor tiempo, vida media de 6 horas, el maniquí, es recargable, como se puede observar en la Fig. 9, en comparación con el maniquí descartable y cuyo decaimiento del material radiactivo es de 270 días ver figura 8, y además del alto costo.
4. En la construcción del nuevo módulo de mezcla funciona con un motor de 1800 rpm, y se ha diseñado una cubeta especial de geometría cónica, y los álabes del sistema automatizado de mezcla y llenado del fantoma, y de modo digital tiene un encendido, facilitando, la mezcla en el menor tiempo, con una calidad de mezcla homogénea se transporta la mezcla hacia el fantoma sin exposición del operador, puesto que todo el material radiactivo está totalmente aislado, alcanzando obtenerse un mapa de corrección extrínseco de calidad óptima en 45 segundos de mezcla y 12 minutos de descargue al fantoma, se puede observar en las figuras 16, 17 y 18.
5. En la simulación numérica se observa las líneas de corriente de velocidad del flujo de la mezcla homogénea en 20 segundos y se contrasta con los resultados experimentales de las tablas y gráficos y se puede ver que su distribución es uniforme en la mayor parte del volumen del tanque a velocidades entre 2 a 6 m/s., muy semejantes a la evaluación experimental.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, al Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas, Universidad de Navarra y a la Pontificia Universidad Católica del Perú, por el apoyo brindado para realizar ésta investigación.

REFERENCIAS

- [1] BOE, REAL DECRETO 1841/05/12/1997, Criterios de calidad en medicina nuclear, Publicado 19/12/ (1997).
- [2] EANM Physics Committee. Routine Quality Control Recommendations for Nuclear Medicine Instrumentation, Eur Journal Nucl Med Mol Imaging 37: pp. 662-671 (2010).
- [3] IAEA. Quality Assurance for SPECT Systems, Human Health Edit. Series, Viena (2009).
- [4] Strand S-E, Larsson I: Image artifacts at high photon fluence rates in single-crystal NaI (Tl) scintillation cameras. J Nucl Med 19: 407-413, (1978).
- [5] Mantilla Núñez, Irla, S. De Vicente C. "SD Numerical Simulation Technique for Hydrodynamic Flow Gas Solids Mixing" pp:1-6, ISBN : 181015- Proceedings - Conference COMSOL, Boston - USA (2013).
- [6] National Electrical Manufacturers Association- NEMA and International Electrotechnical. Commission- IEC. Performance Measurements of Scintillation Cameras, and ISO rules Standards. Publication N°1 USA (2010).
- [7] Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics, Springer, ISBN 978-1-4020-8670-0.(2010).
- [8] Holland, F.A. and Chapman, F.S. Liquid Mixing and Processing in stirred tanks. Reinhold Publishing Corporation, First edition, (1966).
- [9] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Publicación N° 103. Madrid (2007).
- [10] Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN), Norma Técnica IR.002, Requisitos de Protección Radiológica y Seguridad en Medicina Nuclear (2012).
- [11] Cherry S., Sorenson J., Phelps M. Physics in Nuclear Medicine. Saunders Elsevier. Four edition (2012).
- [12] International Atomic Energy Agency (2009).Quality Assurance for SPECT Systems. IAEA Human Health Series 6: 1-112. Organismo Internacional de Energía Atómica (1991).
- [13] International Agency Energy Atomic - IAEA-TECDOC-602/S: 30. Control de Calidad de los Instrumentos de Medicina Nuclear. (1997).
- [14] Perry, R.H., Green, D.W., Manual del Ingeniero Químico, Mexico, Editorial McGraw-Hill, 6ta. edition, pp. 19-6 a 19-10. (1992).
- [15] Brucato, S., Ciofalo, M., Grisafi, F. and Micale, G., Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches. Chemical Engineering Science, Volume 53, Issue 21, pp. 3653-3684 November (1998).
- [16] Hernández, Pablo Martín. Predicción de datos de diseño en reactores provistos de turbina de flujo axial mediante CFD. Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya. 2007.
- [17] Manual de Ansys Fluid - S. Sarkar and L. Balakrishnan. "Application of a Reynolds - Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer". ICASE Report 90-18 NASA CR 182002. (1990).