

# Evaluación Funcional de un Tomógrafo de 64 Cortes con Indicadores de Productividad

L. Guzmán-Canizales<sup>1</sup>, A. Duarte-Peña<sup>2</sup>, F. Piña-Quintero<sup>2</sup>, M. R. Ortiz-Posadas<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería Biomédica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, CDMX, México

<sup>2</sup>Departamento de Conservación y Mantenimiento. Instituto Nacional de Pediatría, CDMX, México

<sup>3</sup>Departamento e Ingeniería Eléctrica. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, CDMX, México.

\*posa@xanum.uam.mx

**Abstract** — The Computed Tomography Area (CTA) of the National Institute of Pediatrics, currently has a 64-slice tomography, which was acquired in 2010. The equipment will be soon obsolete since the commercial company will no longer provide technical support. Therefore, the objective of this work was to evaluate the functionality of said tomography during the 2018-2020 period, considering three aspects: the productivity of the CTA; and the technical and economic performance of the tomography. Eight indicators were developed and applied to address these aspects, which showed that the 64-slice tomography should be replaced in the short term, that is, in the course of the next three years.

**Palabras clave**—Evaluación técnica de un tomógrafo, evaluación económica de un tomógrafo, indicadores de productividad.

## I. INTRODUCCIÓN

El Área de Tomografía Computarizada (ATC) del Instituto Nacional de Pediatría, actualmente cuenta con un tomógrafo de 64 cortes que fue adquirido en 2010. El equipo aún permite realizar los estudios y los procedimientos tomográficos solicitados por los médicos; sin embargo, tiene características técnicas que impactan negativamente en la calidad de la imagen, tales como el número de cortes, el tiempo de adquisición y la dosis de radiación. El equipo pronto será obsoleto, debido a que la casa comercial proporcionará servicio de mantenimiento preventivo y correctivo hasta el año 2022, y no estará en condiciones de proveer los insumos para la operación y en su caso, la reparación del equipo. Por lo anterior, el Instituto tiene gran interés en conocer el desempeño de este tomógrafo, obtener evidencia sistematizada y generar criterios auxiliares para la sustitución, y eventual adquisición de un tomógrafo nuevo. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la funcionalidad del tomógrafo de 64 cortes instalado en el Instituto Nacional de Pediatría considerando la productividad del ATC y los aspectos de desempeño técnico y económico del equipo, aplicando un conjunto de indicadores para tal efecto, utilizando los datos del periodo 2018-2020.

## II. METODOLOGÍA

### A. Productividad del Área de Tomografía Computarizada

**Análisis epidemiológico.** Se analizó la información clínica del Área de Tomografía Computarizada (ATC) contenida en el Sistema de Informaciones en Radiología y Sistema de Comunicación y Archivo de Imágenes (RIS-PACS por sus siglas en inglés) y la bitácora donde se registran los pacientes atendidos. Se identificó el tipo de estudios que se realizan y el tiempo invertido, así como la condición del paciente (si requiere anestesia o no). Asimismo, se definió un conjunto de indicadores que se describen a continuación:

**Tiempo Invertido en el Estudio (TIE).** El tiempo del estudio depende de la región anatómica que se analiza, si es simple o contrastado y/o si el paciente requiere anestesia. El TIE se estimó mediante la ecuación (1).

$$TIE = \sum_{i,j=1}^n (n_{i,j})(t_{i,j})/60 \text{ minutos} \quad (1)$$

Donde:  $n_{i,j}$  es el número de estudios de acuerdo a su tipo (i) y a los requerimientos del paciente (j); y  $t_{i,j}$  es el tiempo necesario para realizar los estudios.

**Tiempo invertido en pacientes de Urgencias (TU).** Tiempo que se suspende el servicio (diez minutos), antes de que el paciente de urgencias ingrese a la sala. Se calcula con la ecuación (2).

$$TU = (\text{No. Pacientes})(10 \text{ minutos})/60 \text{ minutos} \quad (2)$$

**Atención al paciente (AP).** Tiempo total invertido en la atención al paciente y se calcula con la ecuación (3).

$$AP = TIE + TU \quad (3)$$

**Tiempo invertido en pacientes Covid-19 (TC).** Considerado únicamente para el año 2020, el protocolo de seguridad indica desalojar el ATC antes de ingresar al paciente y al terminar el estudio, debe desinfectarse. Esto implica que el servicio se suspende durante 80 minutos y este tiempo se calculó mediante la ecuación (4).

$$TC = (\text{Pacientes Covid})(80 \text{ minutos})/60 \text{ minutos} \quad (4)$$

**Tiempo de Operación (TO):** Constante que resultó de considerar el horario de servicio del ATC de los turnos matutino y vespertino y 51 semanas al año (restando días feriados oficiales). Se calcula con la ecuación (5).

$$TO=(\text{horas de turno})(5 \text{ días})(51 \text{ semanas}) \quad (5)$$

*Tiempo Fuera de Servicio* (TFS). Existen factores como fallas en el equipo y/o interrupciones en el suministro eléctrico, que dejan al tomógrafo fuera de funcionamiento. Con base en las órdenes de servicio y los reportes por interrupción en el suministro eléctrico, se calculó este tiempo con la ecuación (6).

$$TFS = \sum_{i=1}^n (FS_i) \quad (6)$$

Dónde n es el número de reportes y FS<sub>i</sub> son las horas fuera de servicio por la falla en el año i.

*Tiempo Real* (TR). Se refiere al tiempo real que el ATC propociona atención a los paciente y se calcula como la diferencia entre la constante tiempo de operación (TO) y el tiempo fuera de servicio del equipo (TFS) mediante (7).

$$TR = TO - TFS \quad (7)$$

Finalmente, se calculó *la productividad del área* (P) utilizando el tiempo de operación. Se utilizó la relación entre el tiempo real (TR) y el tiempo de atención al paciente (AP) como se muestra en la ecuación (8).

$$P = AP / TR \quad (8)$$

### B. Evaluación Técnica

La evaluación técnica del tomógrafo se hizo mediante un indicador técnico (I<sub>T</sub>), definido por ocho variables (x<sub>i</sub>) ponderadas (ρ<sub>i</sub>) (Tabla I) mediante la ecuación (9) [1].

$$I_T = \sum_{i=1}^n \rho_i x_i / 4.4 \quad (9)$$

Donde:

x<sub>i</sub>= variable, i= {1, ..., 8}

ρ<sub>i</sub>= ponderación de cada variable, i= {1, ..., 8}

N= 4.4 es el factor de normalización que resulta de considerar los valores máximos que pueden tomar la variables del indicador I<sub>T</sub> en el intervalo [0, 1].

TABLA I  
VARIABLES Y PONDERACIONES DEFINIDAS PARA LA APLICACIÓN DEL INDICADOR TÉCNICO

x <sub>i</sub>	Nombre de la variable	ρ <sub>i</sub>
x <sub>1</sub>	Refacciones disponibles en 5 años	0.9
x <sub>2</sub>	Años del equipo en operación	0.8
x <sub>3</sub>	Días Fuera de servicio	0.7
x <sub>4</sub>	Función del equipo	0.6
x <sub>5</sub>	Frecuencia de fallas	0.5
x <sub>6</sub>	Riesgo físico	0.4
x <sub>7</sub>	Consumibles disponibles en 5 años	0.3
x <sub>8</sub>	Requisitos de mantenimiento	0.2

Para interpretar el resultado numérico de I<sub>T</sub>, se definió una escala cualitativa dividida en cuatro intervalos a los que les corresponde un plazo para la sustitución del equipo: [0,0.25]=largo plazo (10 años); [0.25, 0.5]=mediano plazo (6 años); [0.5,0.75]=corto plazo (3 años) y [0.75,1]=inmediato (menor a 3 años).

### C. Evaluación Económica

Para la evaluación económica, se definieron tres variables: costo de adquisición (x<sub>0</sub>), costo de mantenimiento (x<sub>10</sub>), años de vida útil (x<sub>11</sub>). También se utilizó la variable x<sub>3</sub>, años del equipo en operación, definida en el I<sub>T</sub>. Con estas variables se definieron tres indicadores parciales ponderados (Y<sub>i</sub>), que se describen a continuación.

*Costo de adquisición a valor presente* (I<sub>p1</sub>). Se utilizó el valor de la inflación del año 2020: i<sub>r</sub>=3.15 (2), una ponderación de Y<sub>1</sub>=0.4, y quedó definido por (10).

$$I_1 = (x_0(1+x_3i_r))/3.15 \quad (10)$$

*Costo de mantenimiento* (I<sub>p2</sub>). Es equivalente a la variable x<sub>10</sub> y se ponderó con Y<sub>2</sub>=0.9, debido a la importancia del gasto en el mantenimiento del equipo. Quedó definido por la ecuación (11).

$$I_2 = x_{10} \quad (11)$$

*Porcentaje de depreciación* (I<sub>p3</sub>). Es la proporción entre la antigüedad y la vida útil del equipo con una ponderación Y<sub>3</sub>=0.8., calculado con la ecuación (12)

$$I_3 = x_3 / x_{14} \quad (12)$$

*Indicador económico* (I<sub>E</sub>). Se integraron todos los indicadores (I<sub>j</sub>) y sus ponderaciones (Y<sub>j</sub>), y quedó definido mediante la ecuación (13).

$$I_E = \sum_{j=1}^4 (Y_j)(I_j) / 1.38 \quad (13)$$

Donde:

I<sub>j</sub> es el indicador j, j = {1,...,3}

Y<sub>j</sub> es la ponderación de cada indicador j, j = {1,...,3}

N<sub>E</sub> = 1.38, es el factor de normalización.

Igual que para I<sub>T</sub> se definió una escala cualitativa con tres intervalos para la interpretación del resultado numérico de I<sub>E</sub>, según el impacto económico: [0, 0.45]= bajo impacto [0-\$100,000 MN); [0.45, 0.6]= mediano impacto [\$100,000 a \$500,000 MN]; [0.6, 1.0]=alto impacto [>\$500,000 MN].

### D. Evaluación Funcional

Para la evaluación funcional del tomógrafo se generó una función matemática (14), que integró los dos indicadores descritos: técnico (I<sub>T</sub>) y económico (I<sub>E</sub>), y sus ponderaciones (ω<sub>T</sub>=0.90 y ω<sub>E</sub>=0.30), y se le denominó Indicador de Sustitución de Equipo Médico (ISEM), para el cual. También se definió una escala cualitativa con tres intervalos, para su interpretación (Tabla II).

$$ISEM = \sum_{n=1}^3 (\omega_n)(I_n) / 1.2 = (\omega_T)(I_T) + (\omega_E)(I_E) / 1.2 \quad (14)$$

Donde:

I<sub>n</sub> = Indicador parcial (técnico y económico), n = {1, 2}

ω<sub>n</sub> = Ponderación de los indicadores técnico y económico

K = 1.2 Factor de normalización para el ISEM

ESCALA CUALITATIVA PARA LA INTERPRETACIÓN DEL ISEM.

Intervalo	Rango de Sustitución
[0, 0.25)	Largo plazo (10 años)
[0.25, 0.55)	Mediano plazo (6 años)
[0.55, 1.0]	Corto plazo (3 años)

### III. RESULTADOS

#### A. Productividad del Área de Tomografía Computarizada

Se identificaron 21 tipos de estudios tomográficos por región anatómica y tres procedimientos intervencionistas [3]. El tiempo por estudio, no solo depende de la región anatómica que se analiza, sino también de que el paciente requiera anestesia; y si es simple o contrastado.

*Tiempo Invertido en el Estudio (TIE)*, Dado que son seis tipos de estudios: corto, largo, angiotomografía, punción, esterotaxia y cancelados). Utilizando (1) se calculó cada TIE parcial y posteriormente se hizo la sumatoria para obtener el TIE anual.

$$\begin{aligned}
 TIE_{2018-corto} &= 1,136 \text{ horas} \\
 TIE_{2018-largo} &= 830.3 \text{ horas} \\
 TIE_{2018-angio} &= 301 \text{ horas} \\
 TIE_{2018-punciones} &= 38 \text{ horas} \\
 TIE_{2018-esterotaxia} &= 9 \text{ horas} \\
 TIE_{2018-cancelados} &= 10 \text{ horas} \\
 TIE_{2018} &= (1136+830+301+38+9+10)=2324 \text{ horas}
 \end{aligned}$$

*Tiempo invertido en pacientes de Urgencias (TU)*. Durante el año 2018 se atendieron 1018 pacientes de urgencias; en 2019 fueron 1050; y en 2020, 1000. Para ilustrar el uso de la ecuación (2) se sustituyeron los datos de 2018.

$$TU_{2018} = (1018)(10 \text{ minutos})/60 \text{ minutos} = 170 \text{ horas}$$

*Atención al Paciente (AP)*. Las horas de atención al paciente se obtienen aplicando la ecuación (3). Para el año 2018 se obtuvo lo siguiente:

$$AP_{2018} = TIE + TU = 2324 + 170 = 2,494$$

*Tiempo Invertido en Pacientes Covid-19 (TC)*. En 2020 se atendieron 76 pacientes Covid-19, y mediante la ecuación (4):

$$TC = \frac{(\text{Pacientes Covid})(80 \text{ minutos})}{60 \text{ minutos}} = \frac{76(80)}{60} = 101 \text{ horas}$$

Entonces, el AP para el 2020, se calculó sustituyendo los tiempos de TIE y TU en la ecuación 3 y se sumó TC.

$$AP_{2020} = TIE + TU + TC = 1802 + 167 + 101$$

$$AP_{2020} = 2,070 \text{ horas}$$

*Tiempo de Operación (TO)*. Sustituyendo los valores de los parámetros en la ecuación (5) se obtiene que la constante es constante:

$$TO = (51 \text{ semanas})(5 \text{ días})(16 \text{ horas}) = 4080 \text{ horas}$$

*Tiempo Fuera de Servicio (TFS)*. Se ilustra calculando el tiempo para el año 2018, que el equipo presentó tres fallas con el siguiente número de horas fuera de servicio: gantry (168 hrs), UPS (88 horas), suministro eléctrico (72). Sustituyendo estos valores en (6), el total de horas fuera de servicio del tomógrafo en 2018 resultó:

$$TFS_{2018} = \sum_{i=1}^3 (FS_i) = (168) + (88) + (72) = 328 \text{ horas}$$

*Tiempo Real (TR)*. Calculando TR para el año 2018, se sustituyen los valores en la ecuación (6):

$$TR_{2018} = TO - TFS = 4080 - 328 = 3,752 \text{ horas}$$

*Productividad del área*. Sustituyendo los datos del tiempo real (TR) y del tiempo de atención del paciente (AP) para el año 2018:

$$P_{2018} = AP/TR = 2494/3752 = 0.66 = 66\%$$

En los dos años siguientes 2019 y 2020, la productividad fue de 62% y 58%, respectivamente. En 2019 hubo una disminución de 4% y en 2020 disminuyó otro 4%. Esto último como se mencionó, de debió a que el Área no atendió pacientes de consulta externa durante tres meses y además, de que se redujo el tiempo de servicio.

#### B. Evaluación Técnica

La evaluación técnica del tomógrafo se hizo con los datos de los últimos tres años (2018-2020). Los valores de las variables y su ponderación se muestran en la Tabla III. La función del equipo es Diagnóstica (D), por ende, el riesgo físico sería un Mal Diagnóstico (MD). Al ser un equipo de alta complejidad tecnológica, sus requisitos de mantenimiento son Importantes (I). Observe que la frecuencia de fallas ( $x_5$ ), se duplicó cada año, lo cual es evidencia del deterioro del equipo. Note también que las variables están expresadas en valores cualitativos y cuantitativos ( $M_i$ ), que son los mismos para el bienio 2018-2019 y cambia para 2020.

VALORES CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS DEL INDICADOR TÉCNICO PARA EL TOMÓGRAFO DE 64 CORTES

Variable	2018	2019	Mi	2020	Mi
$x_1$ . Refacciones para 5 años	No	No	1	No	1
$x_2$ . Años del equipo en operación	8	9	0.4	10	0.4
$x_3$ . Días fuera de servicio	14	11s	1	21	1
$x_4$ . Función del equipo	D	D	0.6	D	0.6
$x_5$ . Frecuencia de fallas	2	4	0.4	8	0.8
$x_6$ . Riesgo físico	MD	MD	0.6	MD	0.6
$x_7$ . Consumibles para 5 años	No	No	1	No	1
$x_8$ . Requisitos de mantenimiento	I	I	1	I	1

Para ilustrar la aplicación del  $I_T$ , se sustituyeron los valores del año 2018 (Tabla III) en la ecuación (9).

$$\begin{aligned}
 I_{T2018} &= \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{4.4} = \frac{(0.9)(1) + (0.8)(0.4) + (0.7)(1) + (0.6)(0.6) + (0.5)(0.4) + (0.4)(0.6) + (0.3)(1) + (0.2)(1)}{4.4} = 0.73
 \end{aligned}$$

Según la escala cualitativa, este resultado indica que el tomógrafo debe ser reemplazado a corto plazo, es decir, en tres años.

$I_T$  se aplicó para los tres años y arrojó que en 2018 y 2019 ( $I_{T2018,2019}=0.73$ ), el equipo debía ser reemplazado a corto plazo (tres años), es decir, para el año 2021. Por su parte  $I_{T2020}=0.77$ , debido al número de fallas que presentó, el resultado indica su reemplazo de manera inmediata, en un plazo menor a 3 años.

### C. Evaluación Económica

La evaluación económica del tomógrafo, igual que en el caso técnico, se hizo con los datos del periodo 2018-2020 (Tabla V). Observe que durante los tres años, solo cambian dos variables:  $x_3$ = años del equipo en operación, y  $x_{10}$ =costo de mantenimiento (expresados en miles de pesos y en moneda nacional).

TABLA IV

VALOR DE LA VARIABLES DEL INDICADOR ECONÓMICO

Nombre	2018	2019	2020	$M_i$
Años del equipo en operación	8	9	10	0.4
Costo de adquisición	\$12,932	\$12,932	\$12,932	1
Costo de mantenimiento	\$1,590	\$1,590	\$1,665	1
Años de vida útil	10	10	10	-

Para ilustrar la aplicación del  $I_E$ , se utilizaron los valores del año 2018 (Tabla III) en los indicadores parciales y en el  $I_E$ , como se muestra a continuación:

*Costo de adquisición a valor presente* ( $I_{P1}$ ). Se sustituyeron los valores en la ecuación (10).

$$I_{P1} = \frac{x_9(1+x_3(i_j))}{4.15} = \frac{1(1+(0.4)(3.15))}{4.15} = \frac{2.26}{4.15} = 0.54$$

*Costo de mantenimiento* ( $I_{P2}$ ). Se sustituyó el valor de la variable  $x_{13}$  en la ecuación (11):  $I_{P2} = 1$

*Porcentaje de depreciación* ( $I_{P3}$ ). Los valores se sustituyeron en la ecuación (12):

$$I_3 = x_3/x_{14} = 0.4/10 = 0.04$$

*Indicador económico* ( $I_E$ ): Sustituyendo en (13) el resultado obtenido en los indicadores parciales, se obtuvo el siguiente resultado:

$$I_E = \frac{\sum_{j=1}^3 (Y_j)(I_j)}{1.38} = \frac{(0.54)(0.4) + (1)(0.9) + (0.04)(0.8)}{1.38} = 0.83$$

Utilizando la escala cualitativa del indicador económico, este resultado indica que es un equipo de muy alto costo, mayor a 500 mil pesos MN; es decir, una tecnología de alto impacto con altos costos de inversión y mantenimiento. Este resultado es muy importante para un futuro proyecto de inversión para la adquisición de un tomógrafo nuevo para el Instituto.

### D. Evaluación Funcional

La evaluación funcional, igual que en los casos técnico y económico, se hizo mediante la ecuación (13) utilizando

datos del periodo 2018-2020. Para ilustrar la aplicación del indicador ISEM, se utilizaron los datos del 2018 y la ponderación  $\omega_i$  para cada indicador parcial.

$$ISEM_{\text{Tomógrafo-2018}} = \frac{\sum_{n=1}^3 (\omega_n)(I_n)}{1.2} = \frac{(\omega_T)(I_T) + (\omega_E)(I_E)}{1.2}$$

$$ISEM_{\text{Tomógrafo-2018}} = \frac{(0.90)(0.73) + (0.30)(0.54)}{1.2} = \frac{0.819}{1.2}$$

$$ISEM_{\text{Tomógrafo-2018}} = 0.68$$

El ISEM se aplicó para los tres años analizados y los resultados fueron los siguientes:  $ISEM_{2018-2019}=0.68$ ;  $ISEM_{2020} = 0.71$ . El incremento en el valor del ISEM refleja el aumento en la frecuencia de fallas y el deterioro del equipo, así como el aumento de los costos de mantenimiento y la demanda de refacciones. De acuerdo con la escala cualitativa (Tabla II), estos valores indican que desde el 2018 el tomógrafo debía sustituirse. Después de tres años transcurridos, la sustitución se vuelve inmediata.

## V. CONCLUSIONES

La evaluación funcional del tomógrafo de 64 cortes del Instituto Nacional de Pediatría, se realizó con un Indicador de Sustitución de Equipo Médico (ISEM) que arrojó que debe ser sustituido en el corto plazo (en menos de tres años). La actualización del tomógrafo aumentará la productividad del Área de Tomografía Computarizada, disminuyendo el tiempo de realización de los estudios sin comprometer la calidad de la imagen, que le permitan al médico hacer diagnósticos oportunos y veraces, o el seguimiento del tratamiento de los pacientes, tanto del Instituto como de aquellos referidos de otros hospitales. Adicionalmente, debido a la mejora tecnológica del equipo, se podrán realizar estudios más especializados, con perfil intervencionista, como las angiogramas cardíacas y renales; lo cual aumentará la oferta de estudios tomográficos del Instituto.

## RECONOCIMIENTO

Las autoras de este trabajo queremos agradecer todo el apoyo brindado por el personal médico y técnico del Área de Tomografía Computarizada del Instituto Nacional de Pediatría, ya que sin su colaboración, el desarrollo de esta investigación no hubiera sido posible.

## REFERENCIAS

- [1] T. Mora-García, F. M., Piña-Quintero y M.R. Ortiz-Posadas, "Pattern Recognition for Supporting the Replacement of Medical Equipment at Mexican Institute of Pediatrics," in Pattern Recognition Techniques Applied to Biomedical Problems, Switzerland: Springer Nature, 2018, ch. 9, pp. 197-215. [Online] [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38021-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38021-2_9)
- [2] Gaceta Económica. "La inflación en 2020" [Online] 7 de Enero de 2021. <https://www.gob.mx/shep%7Cgacetaeconomica/articulos/la-inflacion-en-2020-fue-de-3-15>.
- [3] L. Guzmán-Canizales, "Proyecto de Sustitución del Equipo de Tomografía Computarizada del Instituto Nacional de Pediatría". Tesis de Licenciatura en Ingeniería Biomédica. UAM-Iztapalapa, CDMX, 2021.