

MODELO MATEMÁTICO DEL COSTO DE LA INSTALACIÓN PARA UN PET

Villagrana-Velázquez J.G.¹, Vélez-Donis V.H.² y Martínez-Hernández G.³

^{1 y 3} Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco, UAM-A, México D.F.,
²Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas, INER, México D.F.

RESUMEN

En cumplimiento del Programa Sectorial de Salud 2013-2018 el INER, apegado a su misión institucional de mejorar la salud respiratoria de los individuos y las comunidades desarrolló el proyecto de instalación de un equipo PET, donde la Oficina de Seguridad Radiológica, el Servicio de Medicina Nuclear y la UAM-A, trabajaron en el desarrollo del modelo Matemático que describiera el costo de dicha instalación y Optimizara la Seguridad Radiológica. Se identificó las variables involucradas en la planeación de la instalación: Distribución, Operatividad, Acabados, Blindaje, Seguridad y Funcionalidad; se desarrolló el árbol de fallas considerando la interrelación entre dichas variables y con base en éste, se desarrolló el modelo Matemático para el costo de la instalación, este modelo permitió describir y minimizar el costo de la instalación para un equipo PET optimizando la Seguridad Radiológica, ya que al considerar en el análisis las variables Blindaje, Acabados, Distribución y Operatividad se cumple lo estipulado en la Normativa Nacional y se atiende las recomendaciones Internacionales en materia de Protección y Seguridad Radiológica.

1. INTRODUCCIÓN

Considerando los datos más actuales (2012) publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para México y los publicados por la Organización Mundial de la Salud, en donde se muestra que las principales causas de muerte son las enfermedades que implican un desorden metabólico celular como enfermedades del corazón y tumores malignos (Cáncer). Resulta entonces prioritario, ser capaces de detectar estos padecimientos de manera temprana para poder programar tratamientos que permitan erradicar dicha enfermedad del paciente o en su defecto, poder ofrecer un tratamiento paliativo al padecimiento que permita al que lo recibe, alargar y/o mejorar su calidad de vida.

Una manera efectiva de detección de enfermedades que implican un desorden metabólico celular es mediante el empleo de la Medicina Nuclear ya que nos permite obtener imágenes diagnósticas funcionales, es decir, imágenes que nos muestran el funcionamiento (desordenado o no) del órgano o tejido de interés, lo anterior es posible mediante un estudio PET (Tomografía por Emisión de Positrones, por sus siglas en inglés) inyectando al paciente un radiofármaco, fluorodeoxiglucosa (¹⁸F), por ejemplo, que se acumulará en el tejido donde la demanda de glucosa sea mayor, generalmente células enfermas, para posteriormente obtener la imagen de dicha acumulación colocando al paciente en el equipo PET, determinando de esta manera, un posible padecimiento.

Considerando el potencial diagnóstico y el creciente uso, aceptación y confianza en la Medicina Nuclear por parte de los profesionales de la salud y la población, se hace notoria la necesidad de proyectar y planificar la construcción de instalaciones que garanticen el

¹ E-mail del Autor. jovive@prodigy.net.mx

cumplimiento de los estándares de calidad, seguridad radiológica y confort para el paciente, sus acompañantes y el personal de salud, cumpliendo de manera estricta con la Normativa Nacional y observando las recomendaciones Internacionales aplicables.

Evaluando los estadísticos mencionados y en cumplimiento del Programa Sectorial de Salud 2013-2018 el INER, apegado a su misión Institucional de “mejorar la salud respiratoria de los individuos y las comunidades” identificó la necesidad de contar con un equipo capaz de detectar éstos desordenes metabólicos y que estuviese a la vanguardia tecnológica, por lo que desarrollo el proyecto de instalación de un equipo PET bajo la coordinación del Servicio de Medicina Nuclear y el apoyo de la Oficina de Seguridad Radiológica y la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, buscando la optimización de los recursos económicos, los tiempos, la seguridad y sobre todo, la funcionalidad de la Instalación.

En el presente trabajo se muestra la metodología empleada y los resultados obtenidos en el desarrollo de un modelo matemático, que además de describir los costos involucrados en una instalación para un Equipo PET, considere las variables involucradas en la planeación de la misma y permita cumplir los requerimientos de Seguridad y Protección Radiológica.

2. OBJETIVO

Desarrollar el modelo Matemático que describa el costo de la instalación para un equipo PET en el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas optimizando la Seguridad Radiológica.

3. METODOLOGÍA

Consistió en identificar las necesidades de una instalación para el Servicio de Medicina Nuclear basados en los requerimientos establecidos por la normativa Nacional aplicable; Reglamento General de Seguridad Radiológica y Norma Oficial Mexicana NOM-027-NUCL-1996, además de recomendaciones Internacionales en el mismo sentido; Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), con el objetivo de considerar todos los elementos que certifiquen la Seguridad y la Protección Radiológica, por ejemplo delimitar las zonas de acceso al personal y al público, el correcto blindaje que las salas que lo ameriten y que las salas de estudios se encuentren lo más cerca posible entre sí para mitigar la exposición de radiación al personal, así como minimizar el traslado de material radiactivo y de pacientes a los cuales se les ha administrado material radiactivo.

Posteriormente, se identificó todas las variables involucradas en la construcción de una instalación de este tipo; Planeación, Distribución, Operatividad, Acabados, Blindaje, Seguridad y Funcionalidad, con la finalidad de realizar un diagrama de árbol de fallas y poder identificar de manera clara las etapas delicadas del proyecto. Lo anterior se apoyó en buena medida de experiencias conocidas, buenas y malas, de instalaciones para un Servicio de Medicina Nuclear, con la intención de revisar los éxitos y fracasos existentes y aprender de ambas situaciones.

Finalmente, nos dimos a la tarea de desarrollar el modelo matemático de los costos asociados a la construcción de la instalación de un equipo PET, considerando la obra civil, el blindaje,

los acabados, el equipamiento necesario, la operación del servicio, la corrección de errores constructivos y el mantenimiento de instalaciones, equipo y accesorios.

4. RESULTADOS

4.1. Revisión de las necesidades del Servicio de Medicina Nuclear

La planificación de una instalación para Medicina Nuclear debe basarse en la funcionalidad del área y una manera de cumplirla es considerar las necesidades, deben ser estas necesidades el eje rector de la planificación, estas son: Operativas, Instalaciones y Seguridad.

4.1.1. Operativas

Cuando hablamos de Operatividad nos referimos a la capacidad que se tendrá de funcionar con respecto a los estándares de calidad deseados, esto significa que todos los elementos necesarios para que esto se dé deben funcionar de manera armónica y no interferirse unos a otros.

Los elementos necesarios para una correcta operatividad en un Servicio de Medicina Nuclear son:

- **Distribución y Espacios.** Una correcta distribución de los espacios impactará directamente en la operatividad, debe considerarse la cantidad de personas que estará presente en cada una de las habitaciones para evitar la saturación de las mismas. No olvidar considerar los espacios para vestidores y lugares adecuados de almacenamiento de ropería, suministros médicos, equipos de soporte, equipamiento auxiliar, almacenamiento de material radiactivo y desechos, que permitan una movilidad adecuada. Por otro lado, debe hacerse una revisión del diseño de la Instalación para cuidar las adyacencias entre las habitaciones ya que si las distancias de traslado no son óptimas se comprometerá la Operatividad y en gran medida la Seguridad y el confort del paciente. De igual forma, una adecuada operatividad implica la ubicación de los servicios en lugares estratégicos de atención que permitan reducir riesgos y distancias en el traslado, así como la adyacencia con los servicios de emergencia.
- **Estudios a Realizar.** Se debe tener claro el tipo y cantidad de estudios que se pretenden realizar, lo que implica una comunicación constante y estrecha con la jefatura del servicio, el considerar los procedimientos y tiempos de cada estudio ayudará a considerar los requerimientos de espacios en las salas de espera general, así como las habitaciones de administración y/o tratamiento, cuidando la asignación de los mismos para no comprometer la Operatividad.
- **Condiciones del Paciente.** Considerar las condiciones de acceso de los Pacientes es muy importante, se debe contemplar que el paciente puede llegar en silla de ruedas, camilla o por su propio pie ya que cada condición implicará necesidades distintas de espacios y accesibilidad, no debe olvidarse colocar lo relacionado con posibles urgencias médicas.

4.1.2. Instalaciones

Una correcta Instalación ayudará al eficiente desempeño de las actividades establecidas y permitirá cumplir con las medidas de Seguridad. Existe una interrelación notable entre la

Instalación, la distribución de espacios y la Seguridad por lo que debe ponerse especial atención al planificar este factor, cubriendo los requerimientos mínimos que permitan un adecuado desempeño del equipo y del personal, además de hacer lo más cómoda posible la estancia de las personas involucradas.

Los elementos a atender de la Instalación son:

- Estructura constructiva. Debe ser tal que se minimice el riesgo de inundación o derrumbe y que sea resistente al fuego. Para el buen desempeño del equipo es necesario tomar en consideración el peso del mismo y del blindaje, la resistencia de la losa, muros y pisos para la colocación de las diferentes redes de operación (climatización de las áreas debidas al aire acondicionado; la alimentación eléctrica. Asimismo, debe considerarse las rutas para el acceso y retiro del equipo cuando concluya su vida útil, además del equipo necesario para dichas actividades (grúas, poleas y demás equipos de dimensiones considerables. Las dimensiones de las habitaciones deben de ser las adecuadas con base en lo que establece el fabricante, considerar la altura del cuarto de imagen.
- Sistema de drenaje. El drenaje debe contar con una trampa de fácil acceso para tomar muestras, además evitar la acumulación de sedimentos y debe contar con un sistema de retención temporal a fin de comprobar si es posible liberar los residuos o se deben retener para su decaimiento y posterior liberación.
- Iluminación. Considerar las restricciones de luz para aquellas zonas donde sea necesario una intensidad menor, como el caso del área de interpretación, el cuarto de inyección y sala de estudio. Además, no perder de vista las necesidades de iluminación del resto de las áreas que conforman el Servicio, debe haber un sistema de iluminación de emergencia en caso de interrupciones del suministro eléctrico.
- Temperatura, humedad y presión. Se debe considerar estos tres factores de acuerdo al área de operación, al equipamiento y al personal que se encontrará presente, de tal forma que cada una de las actividades a desarrollar se lleven a cabo de forma segura y confortable; que a su vez permita lograr el objetivo del servicio dada la captación adecuada de radiofármaco. Considerar la correcta ubicación de los ductos de Ventilación y filtrado sin que se recircule, cuidar que las presiones sean adecuadas en las distintas salas, que los sistemas estén conectados al sistema eléctrico de emergencia y puedan desconectarse en caso de accidente. Debido a su importancia, se programará revisión y mantenimiento 24 horas al día y los siete días de la semana.
- Instalación para fluidos. Como las redes hidráulicas, sanitarias, aire y oxígeno. Debe considerarse su correcta ubicación en las áreas donde se requieran, deben encontrarse ocultas para cumplir los lineamientos normativos. Se deben colocar las tarjas, lavabos y regaderas en los lugares en donde se necesiten (Cuarto caliente, sanitarios, cuartos de inyección, entre otros), ser de materiales lisos, lavables y resistentes a los agentes químicos; los grifos deben estar provistos de medios para evitar su contaminación.
- Energía eléctrica. Las demandas de energía por parte de este tipo de equipos son muy específicas y las variaciones generan afectaciones serias que pueden repercutir en fallas que generen la suspensión del servicio. Es por esto que una correcta instalación del sistema de alimentación de electricidad y los aditamentos que impidan las variaciones de voltaje y/o corriente resultan prioritarios, por otro lado, las tomas de corriente deben estar en lugares fácilmente identificables.
- Acabados. Deben ser superficies impermeables, no porosas y de fácil descontaminación; evitando las esquinas y redondear las uniones del piso con las paredes; las superficies de trabajo y el piso deben ser lisas y de materiales no porosos, en caso de haber uniones deben sellarse, además deben ser adecuados para garantizar

la comodidad del Paciente y el Personal, ya que de esa manera además de tener una Instalación confortable, se estará garantizado la Seguridad.

- Planificación de rutas de evacuación y salidas de emergencia. Deben planearse en el diseño ya que su falta de planificación puede comprometer de manera seria la Seguridad en caso de algún evento de emergencia como incendio, sismo u otro.

4.1.3. Seguridad

Es quizá uno de los aspectos en que suele centrarse la atención en una construcción y/o remodelación dejando de lado los demás aspectos, que como veremos, son igualmente importantes. La seguridad debe comprender elementos físicos (blindajes, seguridad de fuentes, entre otros), además de elementos de Protección Radiológica (delimitación de áreas, control de accesos, entre otros).

Los elementos que comprenden la Seguridad son:

- Blindajes. Representa uno de los elementos de Seguridad Radiológica más relevantes, debe calcularse de manera adecuada y verificar que se instale lo calculado ya que un error en alguno de ellos puede llevar a la suspensión del servicio por no cumplir con la Normativa.
- Delimitación de áreas. Es un factor importante de la Seguridad ya que de su correcta realización dependerá hasta donde es posible que permanezca cada persona involucrada en un Servicio de Medicina Nuclear (Pacientes, Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE), personal administrativo), para de esa manera coadyuvar a preservar la Seguridad.
- Control de accesos. Debe llevarse a cabo un estricto control de accesos que debe ir de la mano con el punto anterior, si es posible que los accesos sean por medios electrónicos para de esa manera garantizar que sólo ingresa a las áreas quien debe hacerlo.
- Sistemas fijos de monitoreo Ambiental. Es indispensable contar con equipos de monitoreo del ambiente en las áreas donde se manipule material radiactivo con la finalidad de llevar estricto control de las concentraciones.
- Kit para descontaminación. Contar con equipo para descontaminación para atender adecuadamente una situación de contaminación y evitar que por la falta de este, se comprometa la seguridad.
- Equipos de extinción de incendio. Debe proveerse de extintores y de un sistema de detección y extinción de incendios.
- Sistema de Circuito Cerrado de Televisión. Su objetivo es el tener en constante observación al paciente sin la necesidad de que el personal se exponga de manera innecesaria a la radiación emitida por este.
- Señales luminosas. Deben instalarse luces que indiquen que el equipo está en operación para que no se ingrese a las áreas de estudio bajo estas circunstancias, además de evitar el acceso de personal no autorizado.

4.2. Árbol de Fallas

Mediante este método y considerando los aciertos y errores de instalaciones ya existentes, se desarrolló el diagrama que permite traducir en un modelo las condiciones reales del sistema (planificación), que pueden resultar en un evento indeseado a fin de determinar las posibles causas de una falla (ver figura 1).

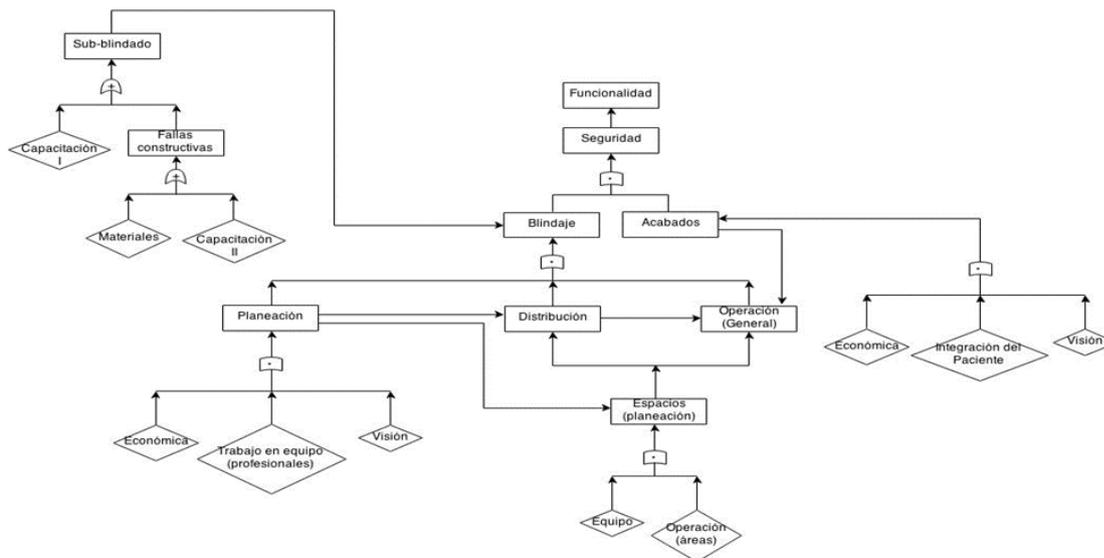


Figura 1. Árbol de Fallas en la planeación de la instalación para un PET

A continuación se describe cada elemento que conforma el árbol:

Planeación

Es la parte más importante y de la que depende en gran medida su éxito o fracaso, debe estar a cargo de un equipo multidisciplinario de profesionales y estar enfocada en analizar todas las posibles soluciones al reto de construir una instalación PET. Los aspectos más relevantes a considerar durante la Planeación son los siguientes:

- **Visión.** Debe ser muy amplia por parte de los integrantes del equipo de trabajo y que se proyecte a futuro, ya que si no se planea con una visión a largo plazo es posible que se esté limitando a las necesidades momentáneas, lo que generaría sobrecostos si las condiciones de trabajo se ven alteradas.
- **Economía.** Debe de considerarse como un factor preponderante en la planeación, con la idea de que el proyecto se ajuste al presupuesto disponible es sumamente importante la interacción de los profesionistas involucrados para una óptima asignación de recursos.
- **Trabajo en equipo.** Debe ser conformado por profesionales capacitados en las distintas áreas del conocimiento involucradas en el proyecto (Ingenieros Civiles, Biomédicos, Físicos, Médicos, Administradores, entre otros).

Distribución

Depende directamente de la etapa de planeación, ya que es en esa etapa en donde debe hacerse una correcta planificación de las áreas y las distancias que deben recorrerse entre ellas, es importante mencionar que una incorrecta distribución generará sobrecostos importantes en el rubro del blindaje, ya que si las áreas se encuentran demasiado dispersas (cuando pudieron planearse contiguas) se tendrá un cálculo en el blindaje basado no en el límite legal para POE (personal ocupacionalmente expuesto), sino que probablemente deberá considerarse el límite legal para el público, Un factor del proceso del proyecto que incide de manera directa en la distribución se describe a continuación:

Espacios (planeación)

Depende directamente de la etapa de planeación general, ya que es allí en donde se deben definir los espacios adecuados para cada una de las áreas a considerar y a su vez, impacta directamente en la distribución de la instalación. Los aspectos que influyen directamente en los espacios son:

- Equipo. El equipo seleccionado influirá directamente en la planificación de los espacios, debe considerarse el espacio disponible para la instalación del mismo y de los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento.
- Operación de las áreas. Debe considerarse de manera especial la cantidad de personal que puede permanecer en las áreas, debe analizarse las posibles necesidades que pueden tenerse para cada paciente y estudio.

Operación general

La operación general es un factor que depende directamente de la distribución y por consiguiente de la planeación, además de depender de los espacios (planeación) y por supuesto de los factores que afectan a los espacios (equipo y operación de las áreas), que fueron mencionados con anterioridad.

Blindaje

Es uno de los factores más importantes en materia de seguridad radiológica, resulta evidente que es un factor dependiente de manera directa de la planeación, la distribución y la operación y de todos los factores, que a su vez afectan a estos, ya que su cálculo está en función de la cantidad de pacientes a diagnosticar y la cantidad de estos que permanezcan en el área en un momento determinado, las distancias entre las áreas, el radiofármaco a utilizar en los estudios y el material con el que se haya proyectado blindar. Las situaciones que pueden presentarse en cuanto al blindaje son las siguientes:

- Subblindado. Afectaría directamente a la seguridad de la instalación, significaría que el blindaje no es suficiente para contener el nivel de radiación presente en el área e implicaría que tanto al exterior como al interior del área se estaría rebasando el límite legal de dosis. Los factores que influyen directamente en el sub-blindaje son:
 - Capacitación I. Los profesionales del equipo de trabajo que deben estar correctamente capacitados en este rubro son el Médico y el Físico, ya que una incorrecta visión del servicio por parte del Médico arrojará datos incorrectos para el cálculo. En lo que al Físico respecta, debe estar capacitado para realizar los cálculos del blindaje. Es importante que se considere el factor económico. Debe hacerse un análisis de las ventajas y desventajas de cada material.
 - Fallas constructivas. Pueden representar un serio problema y se debe prestar especial atención a este rubro, ya que estropearía una buena capacitación del Médico y el físico en cuanto a su proyección. Los factores que inciden en las fallas constructivas son:
 - Materiales. Debe tenerse especial cuidado en que los materiales tengan la calidad y propiedades requeridas.
 - Capacitación II. Los profesionales que deben intervenir en este rubro son el Ingeniero Civil, el proyectista y el Físico. Los primeros dos

actúan directamente en el proceso de construcción, es importante que ambos conozcan las necesidades de una construcción de este tipo; y el tercer profesional actuará supervisando que lo construido cumpla con los requerimientos que la instalación demanda, sin dejar de lado la cuestión normativa que rija en este caso.

- Sobreblindado. Es un factor que no impactará en materia de seguridad, al menos en materia negativa, por lo que no se muestra en el Árbol de Fallas, podemos decir que se tendrá seguridad extra aunque va a costar. Lo ideal es que el blindaje sea el necesario y que si bien no le falte, tampoco sobre en una cantidad considerable, ya que el factor económico se vería afectado y es posible que de manera importante. Los factores que impactarán este rubro son:
 - Capacitación I. Es idéntica a la descrita para el caso del subblindaje.
 - Distribución y planeación. Como ya se mencionó, si la planeación no es la adecuada, impactará la distribución de las habitaciones, lo que se verá reflejado en un sobreblindaje.

Acabados

Un aspecto que suele ser menospreciado pero que resulta altamente relevante son los acabados, ya que impactarán directamente en la operación general de la instalación y sobretodo en la seguridad, detalles como la ubicación de los tomacorrientes, la iluminación, los sitios de ventilación, las bisagras adecuadas para las puertas, entre otros impactarán directamente en la operación, mientras que cuestiones como pintura, sellado de uniones, esquinas redondeadas, existencia de una regadera, entre otros, pueden comprometer la seguridad en caso de no considerarse. Los rubros a tomar en cuenta en este aspecto son:

- Visión. Cobra gran importancia al igual que en la planeación, es importante que el equipo de trabajo tenga una visión apropiada y no menosprecie los acabados.
- Económico. Debe considerarse de manera especial ya que al ser la parte final del proyecto, suele asignársele recursos menores. Debe ir de la mano de la planeación inicial.
- Integración del paciente. Es de suma importancia para asegurar el confort de la instalación, factores tan triviales como los colores de decoración, hasta los no tan triviales como rampas de acceso para sillas de ruedas, sillas cómodas en el área de espera y el cuarto de control, camillas adecuadas, entre otros.

4.3. Modelo Matemático del costo de la Instalación

considerando los elementos analizados con anterioridad, se desarrollo el modelo matemático que describe los costos de los factores involucrados en la construcción y el funcionamiento de la instalación, dicho modelo se desarrollo por partes u objetivos, es decir, una ecuación para el costo de construcción de la obra civil (ver ecuación 1), una ecuación para el costo del blindaje (ver ecuación 2), una ecuación para el costo de acabados (ver ecuación 3), una ecuación para el costo de equipamiento (ver ecuación 4), una ecuación para el costo de operación (ver ecuación 5) y una ecuación para el costo de mantenimiento y calibración (ver ecuación 6).

$$\begin{aligned} \text{Costo}_{\text{construcción}} = & C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 + C_5 X_5 + C_6 X_6 + C_7 X_7 + \\ & + C_8 X_8 + C_9 X_9 + C_{10} X_{10} + C_{11} X_{11} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

C_1 : Costo de los muros (\$/m ²)	C_7 : Costo de HVAC (\$/equipo)
X_1 : Superficie de muros (m ²)	X_7 : Cantidad de HVAC (equipo)
C_2 : Costo de la losa (\$/m ²)	C_8 : Costo del control de acceso (\$/unidad)
X_2 : Superficie de losa (m ²)	X_8 : Cantidad de accesos controlados (unidad)
C_3 : Costo de Cimentación (\$/m ²)	C_9 : Costo de inst. voz y datos (\$/terminal)
X_3 : Superficie de cimentación (m ²)	X_9 : Cantidad de terminales voz y datos (terminal)
C_4 : Costo de instalación hidráulica (\$/terminal)	C_{10} : Costo de instalación vs/incendio (\$/aspersor)
X_4 : Cantidad de terminales (terminal)	X_{10} : Cantidad de aspersores (aspersor)
C_5 : Costo de la instalación eléctrica (\$/salida)	C_{11} : Costo por errores constructivos (\$/error)
X_5 : Cantidad de conexiones (salida)	X_{11} : Cantidad de errores constructivos (error)
C_6 : Costo de instalación sanitaria (\$/desague)	
X_6 : Cantidad de vertientes (desague)	

$$Costo_{Blindaje} = C_{12}X_{12} + C_{13}X_{13} + C_{14}X_{14} \quad (2)$$

Donde:

C_{12} : Costo de blindar con plomo (\$/m ²)
X_{12} : Superficie del blindaje con plomo (m ²)
C_{13} : Costo de blindar con concreto alta densidad (\$/m ²)
X_{13} : Superficie del blindaje con concreto alta densidad (m ²)
C_{14} : Costo de blindar con acero (\$/m ²)
X_{14} : Superficie del blindaje con acero (m ²)

$$Costo_{Acabados} = C_{15}X_{15} + C_{16}X_{16} + C_{17}X_{17} + C_{18}X_{18} + C_{19}X_{19} \quad (3)$$

Donde:

C_{15} : Costo de pintura (\$/m ²)	C_{18} : Costo de puertas y marcos plomados (\$/pieza)
X_{15} : Superficie a pintar (m ²)	X_{18} : Cantidad de puertas (pieza)
C_{16} : Costo de piso (\$/m ²)	C_{19} : Costo de vidrios plomados (\$/m ²)
X_{16} : Superficie a cubrir con piso (m ²)	X_{19} : Superficie necesaria de vidrio plomado (m ²)
C_{17} : Costo de curva sanitaria (\$/m)	
X_{17} : longitud a cubrir con curva sanitaria (m)	

$$Costo_{Equipamiento} = C_{20}X_{20} + C_{21}X_{21} + C_{22}X_{22} + C_{23}X_{23} + C_{24}X_{24} + C_{25}X_{25} + C_{26}X_{26} \quad (4)$$

Donde:

C_{20} : Costo por monitor de área (\$/pieza)	C_{24} : Costo por maniquí (\$/pieza)
X_{20} : Cantidad de monitores de área (pieza)	X_{24} : Cantidad de maniqués (pieza)
C_{21} : Costo por activímetro (\$/pieza)	C_{25} : Costo elementos de protección radiológica (\$/kit)
X_{21} : Cantidad de activímetros (pieza)	X_{25} : Cantidad de elementos de protección radiológica (kit)
C_{22} : Costo por detector de radiación (\$/pieza)	C_{17} : Costo por gabinete plomado (\$/pieza)
X_{22} : cantidad de detectores de radiación (pieza)	X_{17} : cantidad de gabinetes plomados (pieza)
C_{23} : Costo por kit de descontaminación (\$/pieza)	
X_{23} : cantidad de kits de descontaminación (pieza)	

$$Costo_{Operación} = C_{27}X_{27} + C_{28}X_{28} + C_{29}X_{29} + C_{30}X_{30} + C_{31}X_{31} + C_{32}X_{32} + C_{33}X_{33} + C_{34}X_{34} \quad (5)$$

Donde:

C_{27} : Costo por estudio con ¹¹ C (\$/estudio)	C_{31} : Costo por estudio con ⁶⁴ Cu (\$/estudio)
X_{27} : Cantidad de estudios con ¹¹ C (estudio)	X_{31} : Cantidad de estudios con ⁶⁴ Cu (estudio)
C_{28} : Costo por estudio con ¹³ N (\$/estudio)	C_{32} : Costo por estudio con ⁶⁸ Ga (\$/estudio)
X_{28} : Cantidad de estudios con ¹³ N (estudio)	X_{32} : Cantidad de estudio con ⁶⁸ Ga (estudio)
C_{29} : Costo por estudio con ¹⁵ O (\$/estudio)	C_{33} : Costo por estudio con ⁸² Rb (\$/estudio)
X_{29} : cantidad de estudios con ¹⁵ O (estudio)	X_{33} : cantidad de estudios con ⁸² Rb (estudio)
C_{30} : Costo por estudio con ¹⁸ F (\$/estudio)	C_{34} : Costo por estudio con ¹²⁴ I (\$/estudio)
X_{30} : cantidad estudio con ¹⁸ F (estudio)	X_{34} : cantidad de estudios con ¹²⁴ I (estudio)

$$Costo_{Mantenimiento/calibración} = C_{35}X_{35} + C_{36}X_{36} + C_{37}X_{37} + C_{38}X_{38} \quad (6)$$

Donde:

C_{35} : Costo por mantenimiento a infraestructura (\$/evento)	C_{37} : Costo por calibración de equipo (\$/evento)
X_{35} : Cantidad de mantenimientos a infraestructura (evento)	X_{37} : Cantidad de calibraciones de equipo (evento)
C_{36} : Costo por mantenimiento al equipo (\$/evento)	C_{38} : Costo calibración de detectores (\$/evento)
X_{36} : Cantidad de mantenimientos al equipo (eventos)	X_{38} : Cantidad calibraciones a detectores (evento)

5. CONCLUSIONES

Conocer las necesidades de una instalación para el Servicio de Medicina Nuclear nos permitió visualizar los requerimientos que se debían cumplir, situación que fue de gran ayuda en la planeación ya que se conocía de antemano los aspectos mínimos a cubrir, siempre cuidando el confort del paciente y del personal que allí laborará, además de la funcionalidad de la instalación y de manera especial la Seguridad y Protección Radiológica.

Por otro lado, el desarrollo del árbol de fallas nos facilitó la integración del equipo multidisciplinario de trabajo y generó conciencia en cada miembro del equipo, ayudando a un correcto trabajo del equipo, armonioso y eficiente. Si bien es cierto que los conceptos vertidos en el árbol de fallas no son fácilmente cuantificables ya que resultan parámetros subjetivos, si nos permitieron poner atención en las rutas críticas y evitar retrasos y gastos indeseados.

Finalmente, el contar con un modelo matemático para el costo de la instalación de un equipo PET nos permitió hacer un uso eficiente de los recursos asignados y evitar sobre gastos al tener contempladas todas las posibles variables cuantificables en términos monetarios.

6. REFERENCIAS

1. IAEA *Human Health Series No. 11* Planning a Clinical PET Centre. International Atomic Energy Agency 2010.
2. American Association of Physicist in Medicine *AAPM Task Group 108*: PET and PET/CT Shielding Requirements. Madsen et al. 2006
3. Ten leading causes of death http://gamapserver.who.int/gho/interactive_charts/mbd/leading_cod/2012.asp (2012)
4. Normas Oficiales Mexicanas en materia de Seguridad y Protección Radiológica http://www.cnsns.gob.mx/acerca_cnsns/marco_normativo/normas_oficiales_mexicanas.php (2013)
5. Jon A. Anderson and Dana Mathews, *Site Planning and Radiation Safety in the PET Facility.*, Department of Radiology, The University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas, Dallas, TX (2010).

7. AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer un sincero agradecimiento a la Unidad de Costos Institucional y muy en especial al Contador Antonio G. Casas Medina por su invaluable apoyo en la realización del presente, damos las gracias también al Departamento de Mantenimiento, Conservación y Construcción, en especial al Ingeniero Edgar Castro Santiago por el tiempo y la asesoría dedicado, finalmente, agradecer a la Jefatura del Servicio de Medicina Nuclear al Dr. Jorge M. Schalch Ponce de León por permitirnos colaborar en este interesante proyecto.