Código de simulación en fortran con base en EGS4, para fotones y electrones de alta energía

Fortran simulation code with EGS4 base, for high energy photons and electrons

Jorge Luis Godier Amburgo[1]

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo principal construir y aplicar un código de simulación en fortran con base en el programa EGS4 (Electrón Gamma ShowerV4.0), para fotones y electrones de alta energía que se puede utilizar de forma eficiente y con bajo costo como herramienta dentro de un sistema confiable y actualizado de planificación para transporte, registro de flujo y estimación de dosis. Se elaboraron subrutinas de optimización para cálculo dosimétrico y de flujo compatibles con EGS4, determinando el error porcentual respecto a fórmulas empíricas y parcialmente empíricas, encontrándose valores de dosis en profundidad con un error de 0.86% para 10 ciclos iterativos. Como consecuencia de insertar subrutinas nuevas, fue necesario establecer distintos parámetros de operación del código construido, simplificando su operación a través de subprogramas en Fortran. Complementariamente, se añadió a una interfaz gráfica para construcción de geometrías y presentación de datos de simulación. El código se aplicó para calcular la dosis total absorbida por bloque cilíndrico de tejido muscular, óseo y epitelial sometido a una fuente puntual de fotones de Cobalto-60, obteniéndose que la dosis en hueso fue de $2.40x10^{-5}$ $3.29x10^{-8}$ Gray (Gy). La dosis depositada en músculo fue de $2.70X10^{-5}$ $1.80x10^{-8}$ Gy y la dosis máxima depositada en piel fue de $1.96x10^{-5}$ $2.73x10^{-8}$ Gy.

Palabras clave: código, simulación, Fortran, dosis, Cobalto-60, gamma.

ABSTRACT

This research has as main objective build and test a simulation code in Fortran based on the EGS4 (Electron Gamma Shower V4.0) program, for photons and high-energy electrons that can be used efficiently and inexpensively as a tool in a reliable and updated planning for transportation, registration flow and dose estimation system. subroutines dosimetric calculation and optimization of flow compatible with EGS4 were developed, determining the percentage error regarding empirical and partly empirical formulas, finding depthdose values with an error of 0.86% in 10 iterative cycles. As a result of subroutines insert new, it was necessary to set different operating parameters built code, simplifying operation through subprograms in Fortran. In addition, he added a graphical interface forbuilding geometries, simulation data presentation. The code used to calculate the total dose absorbed by cylindrical block of muscle, bone and epithelial tissue subjected to a point source of photons Cobalt-60, obtaining the dose in bone was $2.40x10^{-5}$ $3.29x10^{-8}$ Gy; the deposited dose in muscle was $2.70x10^{-5}$ $1.80x10^{-8}$ Gray Gy and maximum skin dose was deposited in $1.96x10^{-5}$ $2.73x10^{-8}$ Gy.

Key Words: code, simulation, Fortran, dose, Cobalt-60 gamma

[1]Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional del Callao. Av. Juan Pablo II 306-308, Callao, Perú.

INTRODUCCIÓN

El uso de aceleradores lineales clínicos (ALCE) y máquinas isotópicas (MI), ha sido ampliamente difundido para el tratamiento oncológico a nivel mundial constituyéndose en el recurso principal al momento de combatir neoplasias; dado que la interacción de la radiación con la materia orgánica es capaz de destruir el ADN de las células que componen el tejido problema evitando su proliferación e incapacitándolas para reproducirse; no obstante, debido a que se producen efectos similares en células sanas es importante que la radiación suministrada afecte la menor cantidad de tejido circundante.

La elaboración de un código de simulación de bajo costo y capaz de funcionar en el común de procesadores del medio permitiría establecer con rapidez y mucha anterioridad cual será el punto de máxima tasa de dosis en profundidad, la distancia fuente-paciente así como el tiempo de tratamiento según la neoplasia y gravedad del caso.

El código desarrollado en esta investigación, ha sido diseñado para optimizar el manejo y funcionamiento del grupo de subrutinas EGS4, complementándolo con la adición de aplicaciones para cálculo, análisis y visualización, así como herramientas de verificación y ayuda. Se corrigen los defectos depurando previamente el formato de los resultados presentados por archivo, incluyendo como complemento un programa de gráfica automática, para datos de dosis, kerma y flujo en profundidad, el sistema detecta automáticamente la existencia del archivo preparando la presentación en pantalla y simplificando la obtención de resultados.

Las modificaciones al código EGS4 se realizaron sobre las subrutinas de pre-procesamiento de información para archivos de materiales y geometrías; los archivos con parámetros de ingreso para simulación no podían generarse automáticamente en el código original, esta deficiencia se supera en el código modificado DOSRZ, el cual tiene una interface para ingreso de datos de transporte y de material por parte del usuario, simplificando el proceso de simulación.

El código DOSRZ, también genera los archivos de resultados WRI y TXT en un formato simplificado y depurado para facilitar el análisis de los registros de dosis, kerma y flujo de electrones o fotones dentro del material simulado.

En el ámbito internacional se aplican diversos protocolos como por ejemplo el AAPM TG-21 y el AAPM TG-25 (los cuales se basan en la teoría de la cavidad de Spencer Attix para maniquíes y de agua y plástico pero son de practica limitada) con la finalidad de determinar la tasa de dosis absorbida y localización del punto crítico, cuando se emplean campos de radiación irregulares sobre un fantoma o blanco idealizado; tanto en el área experimental, como de simulación computacional. Bajo esta consideración se seleccionó como referencia para la realización de esta investigación el "Cálculo de distribuciones de dosis absorbidas" (Bethesda, 1991) quien realiza un tratamiento extenso acerca de las magnitudes y unidades utilizadas para la medición de la energía transferida por la acción de radiaciones directa ó indirectamente ionizantes.

Buti (1990) muestra el formalismo matemático de la concepción teórica para los fenómenos de transporte de radiación; en los volúmenes I y II de sus fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica. En este trabajo, encontramos además las especificaciones y características validadas a nivel mundial respecto a fuentes y receptores de radiación; lo que nos proporcionó el soporte técnico y los procedimientos experimentales para medición de dosis, además del marco referencial sobre consideraciones de protección radiológica, de gran interés en procedimientos experimentales, esto basándose en protocolos de práctica internacional.

Elford, Cunningham y Springfield (1983); explican varios de los conceptos utilizados en la descripción de fenómenos de transporte, tales como la producción de dispersiones coherentes e incoherentes, efecto fotoeléctrico, producción de pares, aniquilación positrónica y emisión Bremsstrahlung; también describen procedimientos experimentales y cantidades relacionadas, tales como equilibrio electrónico, medición de dosis con cámaras de ionización y calibración de equipos.

Godier (2004) realizó un estudio de simulación con Montecarlo para evaluar la dosificación de electrones en campos irregulares.

MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación es de tipo aplicada.

Código EGS4

La investigación se centro en el código de simulación de libre acceso EGS4, cuyo nombre corresponde al acrónimo de: "Electrón Gamma Shower versión 4.0", ha sido elaborado conjuntamente por: Walter R. Nelson del grupo de Física de las Radiaciones del SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) USA., Hideo Hirayama del laboratorio de física de altas energías (KEK) JAPÓN, y David W. Ó. Rogers en la división de física del Consejo de investigación de Canadá, con el fin de resolver por simulación con Montecarlo cualquier situación concebible respecto al transporte de electrones, fotones y positrones, considerando además todo evento ocurrido en la interacción con medios materiales.

El lenguaje de codificación usado originalmente fue FORTRAN 77, la cuarta versión de EGS es producto de revisiones y correcciones que concluyeron en 1994, convirtiéndolo en una poderosa herramienta para la solución de problemas de cálculo dosimétrico.

Dependencia de la distancia de paso del electrón

Debido a que EGS4 está basado en técnicas Montecarlo, mostraba fuerte dependencia de la distancia de paso del electrón en la región energética arriba de los 10 ó 20 MeV, se realizaron diversas simulaciones cuyos resultados indicaron que si se reduce este intervalo de paso, los datos convergen a valores correctos y concordantes con información experimental, sin embargo esto causa incremento en el tiempo de cálculo y uso del microprocesador.

Modificación de algoritmo

Se decidió modificar el algoritmo PRESTA del EGS4, que determina la longitud de paso y disminuye el tiempo de cómputo por historia, la designación PRESTA, obedece al acrónimo de "Parameter reduced electrón step transport algorithm". El algoritmo está constituido por tres componentes interrelacionados, el PLC (Path – length correction) que corrige la diferencia entre la trayectoria real de una partícula y la trayectoria idealizada considerada por el código, el LCA (Lateral correlation algorithm) que realiza una traslación perpendicular en la dirección de movimiento durante el transporte de partículas, es decir que contrariamente al algoritmo PLC, asume que una trayectoria curvada es recta siempre y cuando el ángulo de deflexión acumulado sea pequeño y el BCA (Boundary crossing algorithm) que se ocupa de redefinir aquellas longitudes de camino que ocurren entre dos materiales diferentes; la corrección se realiza subdividiendo la longitud de paso en fragmentos de tamaño suficiente para que en la interfase ocurra una interacción ó evento de dispersión. (Rogers y Bielajew, 1986).

En base a lo anterior, la modificación logró mejorar los resultados realizando una simplificación de la trayectoria, luego de una colisión ó interacción. Esta debió tomar en cuenta el tipo de interacción ocurrida en la j-ésima ocurrencia, tomando para ello la función de densidad de probabilidad (FDP) que proviene de la sección eficaz diferencial.

Básicamente es posible seguir las trayectorias, estableciendo cuales son los puntos de interés y calculando los cosenos directores para cada punto, definiendo luego la trayectoria entre puntos como una línea recta, siendo este el caso de una simulación detallada que usualmente funciona para simulación de fotones. Para el caso de simulación de electrones, se implementó una simulación que se denomina condensada, la que considera una trayectoria recta en el sentido de establecer una aproximación conveniente.

Procedimiento

Inicialmente se determinaron en base a los números arrojados por un generador de números aleatorios, los posibles valores que arrojan las FDP, esto es posible usando la técnica de inversión. En el caso del cálculo de la longitud de camino libre (LCL), para fotones se uso:

$$P(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} \qquad (1)$$

$$\xi = \int_0^s \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} dx \quad (2)$$

Luego usando la técnica de inversión, puede determinarse la relación siguiente:

$$\xi = 1 - e^{-\frac{s}{\lambda}} \Rightarrow s = -\lambda \ln(1-\xi) \qquad (3)$$

Considerando además que $\lambda = 1/\mu$, podemos finalmente obtener una función para el camino libre medio, para el caso de fotones vírgenes.

$$S = -\frac{1}{\mu} \ln(1-\xi) \qquad (4)$$

Dónde:

S, es la longitud promedio que recorre un fotón entre colisiones, determinada para cierto tipo de material.
μ, es el coeficiente de atenuación lineal cm^{-1}.
ξ, es un número entre 0 y 1, el cual es proporcionado por el generador de números aleatorios.

Seguidamente se implementó una modificación en la determinación de cantidades y evaluación de historias. Según lo indicado por Andreo (1991), para la determinación de cantidades, tales como dosis, kerma, fluencia, exposición, etc., el programa de simulación debe realizar una operación de conteo de lo siguiente: número de eventos ó interacciones ocurridas dentro del material, determinación del tipo de partícula involucrada y evento ocurrido. Usando aproximaciones numéricas se realizó el cálculo de la cantidad relevante por evento ocurrido en el punto de interés, luego se almacenó en memoria y finalmente se realizó la sumatoria de las cantidades guardadas para establecer el total por sectores.(Sanchez y Hernández, 2001).

Con respecto a la evaluación del término de historias, la modificación propuesta se complementa con la llamada "técnica de rechazo" incluida en EGS4 estándar; consistente en evaluar constantemente el peso probabilístico (W) de la historia, según el algoritmo siguiente:

Si: $W_i < W < W_s$ => la historia prosigue sin cambio.
Si: $W \leq W_i$ entonces Si: $r \leq 1 - W / W_i$ (termina la historia)
Si: $r \geq 1 - W / W_i$ (historia continua con $W = W_i$)
Si: $W \geq W_s$
a) Se generan n historias con pesos $W = W_i$
b) Si $r \leq (W - nW_i)/W_i$, se crea una historia mas con $W = W_i$

Donde: W, es el peso probabilístico actual de la partícula ó fotón.
W_i, es el límite inferior para el peso
W_s, es el límite superior para el peso
r, es el valor arrojado por un generador de números aleatorios.

Código DOSRZ e INP01

El código propuesto en esta investigación permite inicializar de modo óptimo el código EGS4; se indica el número de planos de separación y los radios o anillos, que definen las zonas geométricas en el blanco, la composición de cada una de estas zonas geométricas puede ser definida a voluntad usando archivos de materiales ya creados. El registro de dosis se realiza para cada zona geométrica, de acuerdo a lo establecido en las opciones de salida de datos. Al código presentado se le ha puesto el nombre de DOSRZ (dosis radial en eje Z).

Para definir los datos geométricos, energéticos y de simulación empleados con el código DOSRZ, se debe crear previamente un archivo de entrada (INP); esto se realizó con el sub-programa de optimización externo elaborado también en este trabajo y denominado INP01.EXE; en este se indicaron todos los parámetros pertinentes para desarrollar el proceso de simulación.

- Controles para simulación MC
- Ingreso de datos para geometría
- Ingreso de datos para material
- Ingreso de datos para fuente
- Ingreso de datos para transporte y simulación
- Ingreso de opciones para salida de datos (externa)

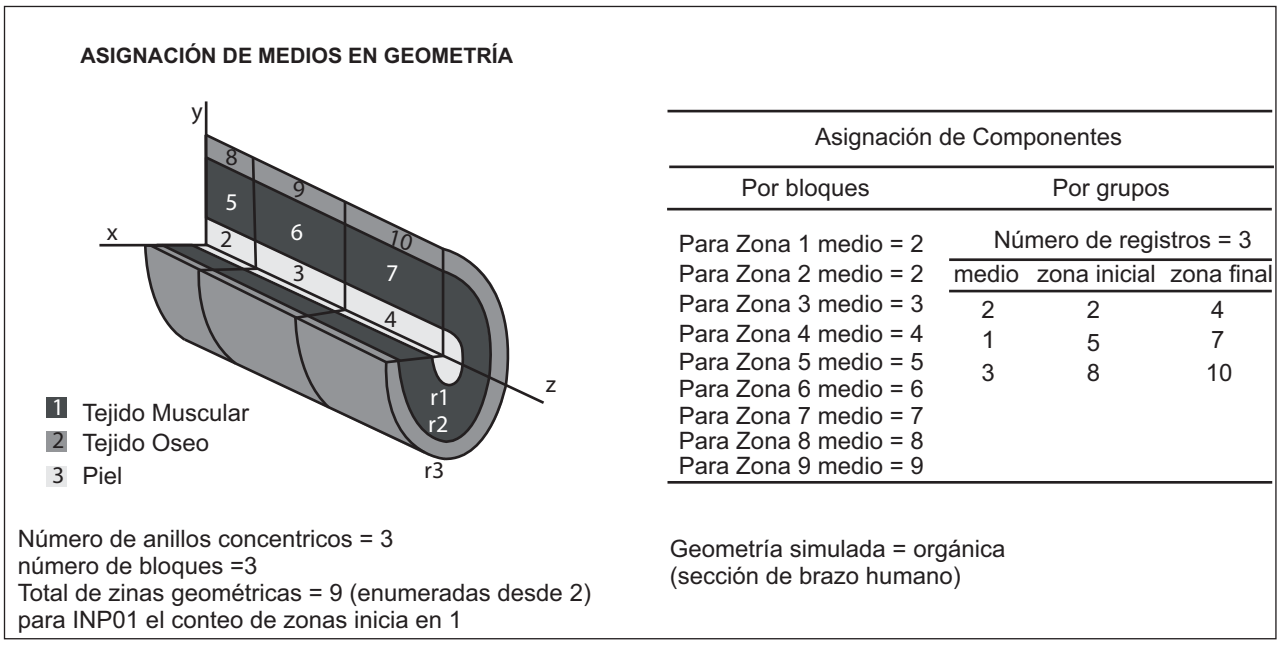


Figura 1. Asignación de medios en geometría, caso a evaluar, con el código DOSRZ.

Caso para simulación con DOSRZ

Para el calculo de la dosis total absorbida por bloque cilíndrico de tejido muscular, óseo y epitelial sometido a una fuente puntual de fotones de Cobalto-60, se cambio la configuración y orientación de la fuente, la información ingresada en INP01.EXE para construir el archivo de configuración.

RESULTADOS

Los resultados generados sobre el caso para simulación con DOSRZ arrojados por el programa son los siguientes:

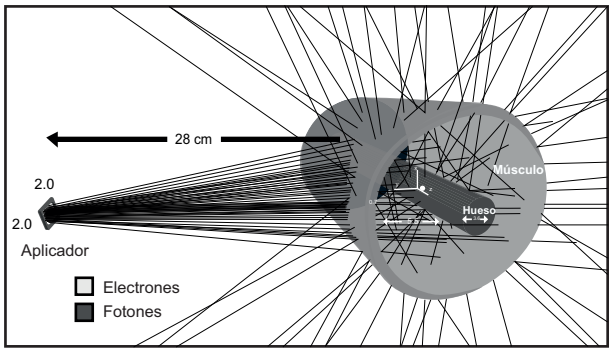
Total pasos de partículas cargadas: 217506576 +/- .021%
Total de veces de apagado MSCAT:1213367+/- .077%

Relación = .006 +/- .084%

Pasos de partículas cargadas en relación de dosis: 217506576 +/- .021%
Tiempos MSCAT apagado en registro de dosis: 0 +/-99.900%

Relación: 0.000 +/-99.900%

Realizando las modificaciones correspondientes en la primera y segunda líneas del archivo CO60.INP, se ejecuto una simulación preliminar con 150 historias, con la que fue posible generar el archivo CO60.GPH y traducirlo al lenguaje VRML (usando GPHTOVRML_V2.EXE) para generar el archivo CO60.WRL.



Simulación con DOSRZ (CO60)

Figura 2. Trayectorias de fotones

La dosis total absorbida por el hueso (espesor 3.6 cm), fue calculada tomando la información correspondiente al material requerido y conociendo las zonas que ocupa el medio en cuestión. Siendo la dosis total absorbida por los sectores geométricos del 2 al 37 (hueso):

Dosis total hueso=(0.539 $\pm$ 2.75x10^{-3}) mGy.

La dosis total absorbida por el músculo (espesor 5.5 cm) que ocupa los sectores geométricos del 38 al 70, fue de:

Dosis total músculo=(0.507 $\pm$ 6.3x10^{-4}) mGy

La dosis total absorbida por la piel (espesor 0.7 cm), considerando la información previa para el material estudiado (piel) ocupado los sectores geométricos que van desde el número 71 al 91, fue de:

Dosis total piel=(0.209 $\pm$3.9x10^{-3}) mGy

Para determinar la profundidad donde se localiza la zona geométrica se analizó la segunda cuadricula para registro de dosis y kerma. Previamente fue necesario realizar un análisis adicional más detallado, a fin de calcular la dosis máxima y total absorbida por cada uno de los componentes orgánicos del fantoma (piel, músculo, hueso).

El análisis sobre la información registrada en los archivos de salida permitió determinar la dosis total absorbida por el fantoma (blanco + capa de aire), a partir de conocer los segmentos de archivo que presentan interés. Para obtener el valor de la dosis total por zona se multiplico el resultado por el flujo o fluencia, obteniendo la respuesta estará en unidades Gy.

Fluencia en simulación CO_{60}=6.25x10^{6} fotones /cm^{2}

Para calcular la dosis absorbida por todo el material, se suman las dosis absorbidas por las regiones geométricas individuales. Habiéndose determinado:

Dosis total fantoma = (1.270 $\pm$ 3.9x10^{-3}) mGy

En este caso la dosis más alta se registra en el anillo 21, para el sector definido por el bloque número 2, correspondiente al medio numero 3 (músculo).

Dosis máxima registrada=(0.027 $\pm$ 1.8x10^{-5}) mGy.

La relación entre la dosis de fotones absorbida con respecto a la profundidad, obtenidas para el caso en estudio arrojaron la siguiente gráfica que se construyo sobre la base de resultados obtenidos por Godier (2004) utilizando la simulación en Montecarlo:

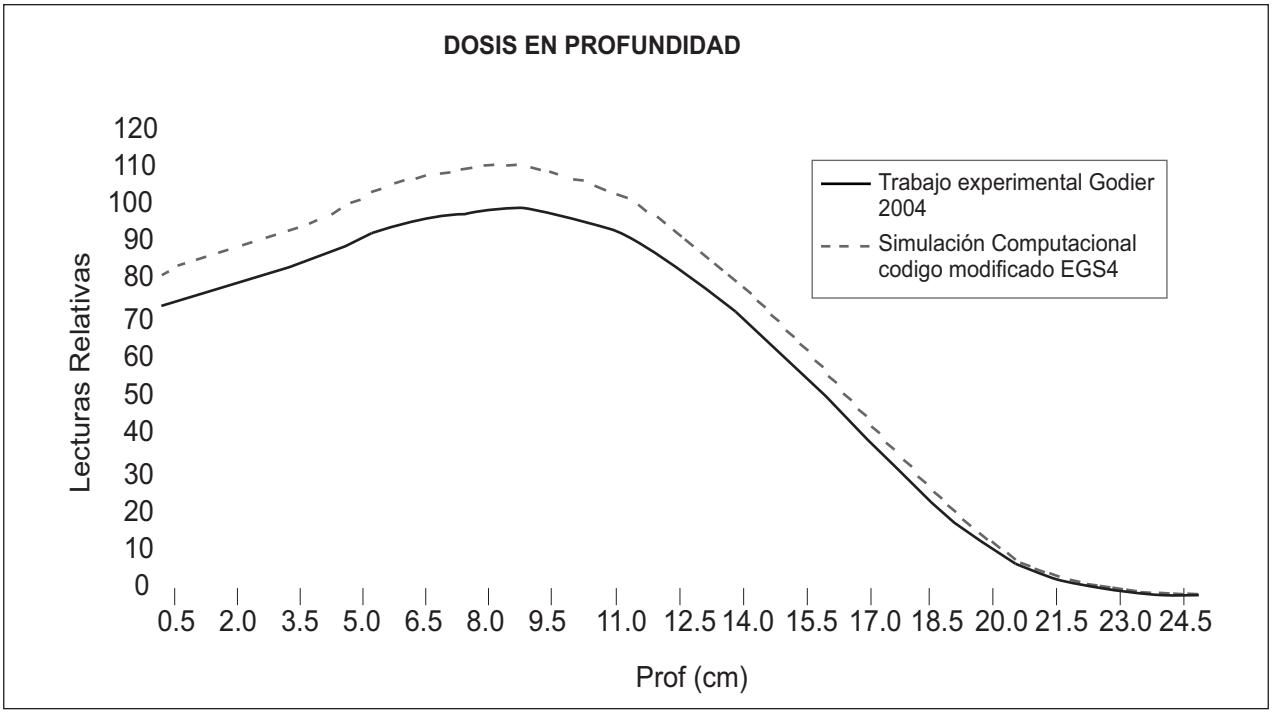


Figura 3. Comparativa de dosis en profundidad; simulación realizada con código modificado y trabajo experimental mostrado en (Godier, 2004).

DISCUSIÓN

La precisión lograda luego de un número considerable de historias (en este caso $2.5x10^7$), según el archivo CO60.TXT es alta. Las subrutinas para calculo dosimétrico y de flujo, elaboradas usando el lenguaje de programación Fortran con base en EGS4 proporcionaron un error porcentual de 0.86% luego de solo 10 iteraciones, menor al 1% sobre fórmulas empíricas y semi-empiricas de uso general.

El análisis por inspección visual de los datos en el archivo VGR obtenido, demuestran efectividad para cálculos rápidos de máxima dosis en profundidad, tanto radial como longitudinal; sin embargo, existe una limitación en cuanto al tipo de geometría empleada, en este caso el código DOSRZ solo admite cilindros con simetría azimutal.

El código de simulación elaborado en esta investigación con base en el programa Electrón Gamma Shower V 4.0, para fotones y electrones de alta energía, puede ser usado como herramienta dentro de un sistema económico, confiable y actualizado de planificación para transporte, registro de flujo y estimación de dosis.

Los resultados obtenidos en esta investigación para dosis en profundidad obtenida en los bloques 1, 2 y 3 se compararon con los resultados obtenidos por Godier (2004), observando proximidad entre ambas gráficas cuando se extrapola la energía correspondiente al caso analizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAPM, American Association of physicists in medicine, Task Group no. 21, Radiation Therapy Committee. (1983). A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams, *Medical Physics. 10*. 741-771.

AAPM, American Association of physicists in medicine, Task Group no. 25, Radiation Therapy Committee. (1991). Clinical electron beam dosimetry. Report of AAPM Radiation Therapy Comittee Taaask Group no. 25. US. *Medical Physics. 18.* 73-109.

Andreo, P. (1991). Monte Carlo techniques in Medicos Radiation Physics. *Physics Medicine and Biology. 36*. 861-920.

Attix, E y Roesch, W. (1986). *Radiation dosimetry.* New York. 2da. Edición: Academic Press.

Bielajew, A.(1998). *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*. New York. 1ra. Edición: Plenum Press.

Buti, P. (1990). *Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica*. Barcelona. 2da. Edición: Universidad Politécnica de Cataluña.

Cullen D. y Perkins S.(1989). report. UCRL 50400. NCRP Report No. 107, 6; 135-157.

Elford, J. y Cunningham, J. (1983). *The* pfiysics *of radiology,* Springfield. 4ta. Edición: Jhon Wiley & Sons.

Godier Amburgo, J. (2004). *Dosimetría de electrones para campos irregulares usando Montecarlo*. Tesis presentada para obtener el título de Licenciado en Física. Universidad Nacional del Callao. Callao.

Johna, H. (1964). *The physics of radiology.* Springfield. 1ra. Edición: Charles C. Thomas.

Kaplan, I. (1962). *Nuclear physics.* New York. lra. Edición: Addison-Wesley Pub. Co.

Rogers D. Y Bielajew A. (1986). Differences In Electrón Depth-Dose Curues Colcufoted With EGS An ETRAN And Improved Energy-Range Relationships, Medical Physics. *13*, 687-690.

Sanchez, R. Y Hernández, V. (2001). Simulación mediante el método *de* Monte Carlo de campos conformados de un acelerador lineal de terapia. *Revista de Física medica*, *2*, 29-34.

correo electrónico: jlgodiera@unac.edu.pe

ANEXO

Configuración de Material, Geometría y Transporte

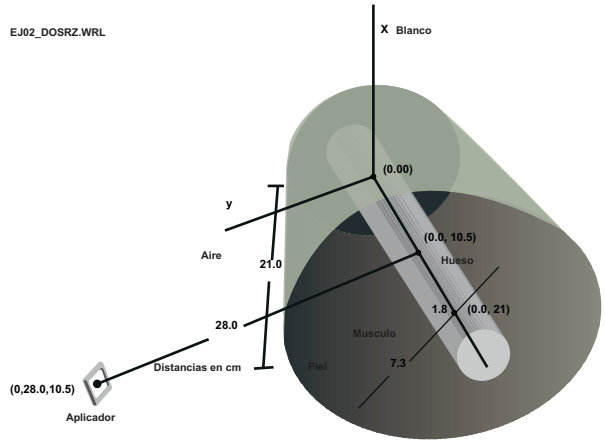
Material (Segmento de muslo humano de diámetro 16cm, longitud 21.0 cm)
Numero de medios en simulación : 4
Composición de medio Nro. 1 : Aire, densidad 0.001205 g/cm^3
Composición de medio Nro. 2 : Tejido epitelial, densidad 1.0 g/cm^3
Composición de medio Nro. 3 : Tejido Muscular, densidad 1.04 g/cm^3
Composición de medio Nro. 4 : Tejido Óseo, densidad 1.65 g/cm^3
Numero de historias para evaluación = 25 000 000
Tipo de radiación simulada = Fotón (0) Precisión estadística solicitada = 0.01% Tiempo máximo de simulación = 50 Horas Parámetros energéticos
Energía del haz incidente = Según archivo de espectro CO60.SPC
Energía de Corte inf. Fotón y electrón = 0.01 MeV y 0.6 MeV
Datos de configuración para fuente
Tipo de configuración (11) [Campo Rectangular 2x2]
Distancia del centro cilíndrico hasta arista en eje X = 1.0 cm
Distancia del centro cilíndrico hasta arista en eje Z = 1.0 cm
Distancia de fuente a punto central del cilindro = 5 cm
Área de exposició = 2cm x 2cm = 4.0 cm^2
Calculo para fluencia = Nro. Historias / Área exp. = 6.25x106 Fot. / cm^2

Geometría

Numero de Grupos = 3
Numero de bloques por grupo = 1 (Total de bloques = 3)
Espesor de bloque grupo Nro. 1,2 y 3 = 7.0 cm.
Total alto del cilindro = (3 x 7.0) = 21 cm.
Numero de anillos concéntricos = 35

Radios= 12x(0.15cm),11x(0.5cm),7x(0.1cm), 5x(4cm)[0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9, 1.05, 1.2, 1.35, 1.5, 1.65, 1.8]; [2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3, 4.8, 5.3, 5.8, 6.3, 6.8, 7.3]; [7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 8.0]; [12, 16, 20, 24, 28].
Total radio del cilindro = 28.0 cm
Total volumen cilindro = (28.0)2 x 21 = 51723.180 cm^3
Numero de regiones Geométricas = 105 = (3x35)
Composición (asignación por grupos) Numero de registros para asignación = 4
Registro Nro. 1 = 4 2 37 (36 bloques para hueso)
Registro Nro. 2 = 3 38 70 (33 bloques para músculo)
Registro Nro. 3 = 2 71 91 (21 bloques para piel)
Registro Nro. 4 = 1 92 106 (15 bloques para capa de aire)
Parámetros de transporte
Configuración para presentación de resultados
- Se selecciono la opción 4 en la tarjeta de entrada IO2
(Creación de archivo DOSRZ.GPH), con cambio de historias de 2.5x107 a 150.

- Activada la opción para incluir datos de Kerma y datos de espectro.
- Cálculos de dispersión coherente inhabilitados.
- No se solicito realizar evaluación para creación de fotones de fluorescencia.
- Se verifico iniciar el copiado de datos en archivos externos (VGR, PLT, DAT)
- Registro de dosis y Kerma en todos los radios para los tres bloques
(Planos del 1 al 4 y anillos de 0 al 35).



Ejecución de archivo CO60.INP

Se registraron tres grupos para la asignación de bloques, sin embargo esto se puede lograr con solo un grupo con tres bloques, dado que el espesor de todos los bloques es similar. El registro de longitudes radiales no admite agrupaciones para longitudes similares. Para ejecución con DOSRZ, se utilizo el archivo de datos para secciones eficaces PHANT_D.DAT, el cual se genero con anterioridad usando para ello la utilidad para compilación de archivos DAT, es decir este archivo es la suma de los archivos AIRE.DAT, PIEL.DAT, MÚSCULO.DAT y HUESO.DAT, previamente creados con el pre-procesador PEGS4.EXE.

Los resultados generados sobre el Caso para simulación con DOSRZ arrojados por el programa son los siguientes:

MONTE CARLO, TRANSPORT, AND SCATTER CONTROLS
MAX # OF HISTORIES TO RUN25000000MAX # OF HISTORIES TO ANALYZE25000000INCIDENT CHARGE
SPECTRUM
FILE:0C:¥STEFPE¥EGS4¥SPC¥CO60.SPC
SPECTRUM
TITLE: 60-Co spectrum source FRACTIONAL ELECTRON ENERGY/STEP 1.000
MAXIMUM GLOBAL ELECTRON STEP SIZE 1.000E+10 (cm) GLOBAL ELECTRON TRANSPORT CUT-OFF .600 (MeV) GLOBAL PHOTON TRANSPORT CUT-OFF .010 (MeV) MIN/MAX PHOTON STEP FORCED 1/ 1
RANGE REJECTION SWITCH OFF REDUCE CALLS TO HOWFAR USING DNEARMAXIMUM CPUTIME ALLOWED50.0000 (HRS)STATS IN PEAK REGION OBJECTIVE.0100 %1ST INITIAL RANDOM NUMBER SEED972ND INITIAL RANDOM NUMBER SEED33# ZONES ELEC ENERGY LOSS/STEP ALTERED NONE # ZONES MAX ELEC STEP SIZE ALTERED NONE
NORMAL ELECTRON TRANSPORT WITH DISCRETE INTERACTIONS FLUORESCENT X-RAYS ARE DISCARDED

EXECUTION INFORMATION AND WARNING MESSAGES

******DESIRED STATISTICAL ACCURACY OF .010% NOT REACHED********* STATS IN DOSE REGION= .086 % AFTER 10 BATCHES

******** FINAL RANDOM NUMBER SEED Conceptual Basis for Calculations of Absorbed-Dose DistributionsS: 83 19 ********
FINISHED SIMULATIONS:TIME ELSAPSED,CPUTIME,RATIO= 0.2 0.2(= .00HR) .95 CPUTIME PER HISTORY = .00000 SEC. NUMBER OF HISTORIES PER HOUR =5x1012
SUMMARY OF DOSE REGION RESULTS

TOTAL # CHARGED PARTICLE STEPS 217506576 +/- .0219 TOTAL # OF TIMES MSCAT SWITCHED OFF 1213367 +/- .0779 RATIO .006 +/— .0849
CHARGED PARTICLE STEPS IN DOSE REG. 217506576 +/- .0219 # TIMES MSCAT SWITCHED OFF IN DOSE REG. 0 +/-99.9009 RATIO .000 +/—99.9009