

acerca de la cinemática inicial de un evento². IKINE especifica el tipo de partículas primarias, el vector PKINE contiene en sus respectivas posiciones:

1. La energía cinética de las partículas primarias.
 2. Ángulo de emisión θ (grados).
 3. Ángulo de emisión φ (grados).
 4. 4) 5) 6) Coordenadas X, Y y Z del vértice primario. Todas las coordenadas corresponden al marco de referencia *MARS*, que es el que pertenece al primer volumen definido y que contiene a los demás.
- `trig 10000`: Empieza 10000 nuevos eventos con los valores de cinemática inicial especificados en `kine`. El comando interactivo completo es `trigger`, sin embargo éstos se reconocen por las cuatro primeras letras.
 - Ciclo DO que permite el procesamiento de diferentes cinemáticas iniciales en una misma ejecución de GEANT, de forma que se puede almacenar los datos en un mismo archivo. De esta forma se procesan tantos eventos como se quieran para cada una de las cinemáticas con energía diferente. El rango de energía elegido fue 15-80 keV con incrementos de 0.5 keV.

B.2 Simulación del montaje angiográfico

B.2.1 Definición de materiales

Para hacer la simulación con el fantoma angiográfico se requirió de la definición de nuevos materiales, cuya composición resulta ser de gran importancia en los resultados. La tabla de materiales, medios de rastreo y volúmenes desplegada al comenzar la simulación del fantoma angiográfico se muestra en la figura B.2, en donde se pueden ver las composiciones de los dos materiales definidos (se han dejado sólo los elementos y compuestos relevantes en la simulación):

1. Plexiglás (PLEXIGLAS): Un polímero que alrededor de 30 keV representa los tejidos blandos de un organismo.
2. La solución de contraste (I-SOL): Una mezcla de agua y yodo.

Para definir un material se requieren varios parámetros que varían dependiendo de si se trata de un elemento o un compuesto o mezcla. Para un elemento estos parámetros se despliegan en pantalla así:

- A: Masa atómica.
- Z: Número atómico.
- Density: Densidad en gramos por centímetro cúbico.
- RADIAT L: Longitud de radiación (*Radiation Length*) en centímetros. Distancia en la cual la energía de un electrón es reducida por un factor 1/e debido a *bremmstrahlung* únicamente.
- ABSORP L: Parámetro que se conserva para compatibilidad con versiones anteriores de GEANT y su valor no es relevante.

² Un evento incluye el procesamiento de una partícula primaria y todas las secundarias que ésta genere a lo largo de su recorrido.

```

0=====
=====
OMATERIAL          A          Z    DENSITY  RADIAT L  ABSORP L NMIXT

      9 ALUMINIUM      26.980    13.000      2.700 0.890E+01 0.372E+02  1
     15 AIR            14.610     7.300      0.001 0.304E+05 0.675E+05  1
     18 SI             28.086    14.000      2.330 0.936E+01 0.100E+01  1
     19 IODINE        126.904    53.000      4.930 0.172E+01 0.100E+01  1

     23 PLEXIGLAS      12.400     6.237      1.180 0.341E+02 0.795E+02  3

  A      Z      W
1.01    1.00    0.081
12.01    6.00    0.600
16.00    8.00    0.320

     24 WATER          14.322     7.217      1.000 0.358E+02 0.950E+02  2

  A      Z      W
1.01    1.00    0.112
16.00    8.00    0.888

     25 I-SOL          49.125    22.285      1.295 0.126E+02 0.966E+02  2

  A      Z      W
126.90  53.00    0.286
18.01   10.00    0.714

0=====
=====
OTMED              MATERIAL  ISVOL IFIELD FIELDM  TMAXFD  STEMAX  DEEMAX  EPSIL  STMIN

  1 DEFAULT MEDIUM AIR      15      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.249  0.000  1.158
  4 PLEXIGLASS              23      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.216  0.000  0.032
  5 WATER                   24      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.217  0.000  0.036
  6 I-SOL                   25      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.194  0.000  0.055
 16 DUMMY-MEDIUM            9      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.183  0.000  0.034
 25 DUMMY-MEDIUM           18      0      0      0.00   10.00  0.100E+11  0.185  0.000  0.037
0=====
=====
OVOLUME NAME  NUMED SHAPE NPAR  PARAMETERS

  1 MAMA      1   BOX    3  0.313E+01 0.250E+01 0.200E+01
  2 DETE     25   BOX    3  0.576E+00 0.200E+01 0.150E-01
  3 PIPE      6  TUBE    3  0.000E+00 0.500E-01 0.200E+01
  4 IJAT      4   BOX    3  0.500E+00 0.250E+01 0.200E+01
  5 HIJA      4   BOX    3  0.500E+00 0.180E+01 0.200E+01
  6 IJAL     16   BOX    3  0.100E+00 0.180E+01 0.200E+01

```

Figura B.2 Tabla de materiales, medios de rastreo y volúmenes definidos en *ugeom.f*, que serán utilizados por GEANT durante la simulación del montaje angiográfico.

Para una mezcla o compuesto:

Se requieren los parámetros anteriores para cada uno de los componentes, excepto la longitud de radiación. Se debe especificar la densidad del compuesto o mezcla. Adicionalmente:

- NMIXT: Número de componentes.
- W: Proporción de pesos (masa hablando estrictamente) o número de átomos de cada componente en la molécula (ver sección CONS en [2]).

B.2.2 Parámetros y control de la simulación

Al igual que en el caso de la eficiencia, se muestra el archivo *.kumac* con el se controló la simulación (figura B.2). Los parámetros físicos permanecen igual, excepto que el valor de *loss* se puso en el valor por defecto que es 2, que permite fluctuaciones en la pérdida de energía, lo que no afecta la simulación. A continuación se explica cuáles son los parámetros ajustados a través del comando interactivo *auto*: Este comando calcula automáticamente los valores de los parámetros de rastreo para cada uno de los medios de rastreo, los cuales se detallan en la figura B.4.

```
auto 1
pair 0
comp 1
phot 1
rayl 1
pfis 0
brem 0
anni 0
munu 0
hadr 0
dcay 0
muls 1
loss 2
dray 0
cuts 0.00001 0.00001
eran 0.00001 0.01 90
physi

NVERTminusone=383
STEP=3.83/[NVERTminusone]
ENERGY=0.0000350
EVENTS=32000

DO I = 1.,1.,1.
DO N = -1.915, 1.915, [STEP]

    YVERT=[N]
    Track

    IF [YVERT] .LE. -0.975 THEN
        kine 1 [ENERGY] 90. 0. -3.1265 [YVERT] 0.
        trig [EVENTS]

    ELSEIF [YVERT] .GE. -0.965 .AND. [YVERT] .LE. 0.075 THEN
        kine 1 [ENERGY] 90. 0. -1.9265 [YVERT] 0.
        trig [EVENTS]

    ELSEIF [YVERT] .GE. 0.085 .AND. [YVERT] .LE. 1.105 THEN
        kine 1 [ENERGY] 90. 0. -0.7265 [YVERT] 0.
        trig [EVENTS]

    ELSEIF [YVERT] .GE. 1.115 .AND. [YVERT] .LE. 1.915 THEN
        kine 1 [ENERGY] 90. 0. 0.4735 [YVERT] 0.
        trig [EVENTS]

    ENDIF

ENDDO
ENDDO
```

Figura B.3 Archivo *.kumac* de control de la simulación de angiografía.

	OTMED	MATERIAL	ISVOL	IFIELD	FIELDM	TMAXFD	STEMAX	DEEMAX	EPSIL	STMIN
1	DEFAULT MEDIUM AIR	15	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.249	0.000	1.158
4	PLEXIGLASS	23	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.216	0.000	0.032
5	WATER	24	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.217	0.000	0.036
6	I-SOL	25	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.194	0.000	0.055
16	DUMMY-MEDIUM	9	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.183	0.000	0.034
25	DUMMY-MEDIUM	18	0	0	0.00	10.00	0.100E+11	0.185	0.000	0.037

Figura B.4 Medios de rastreo definidos en GEANT.

El significado de cada uno de los parámetros de rastreo es:

- ISVOL: Variable que dice si un volumen con un medio de rastreo específico ha sido declarado como sensible o activo. Valores mayores que cero para volúmenes sensibles. Ningún volumen ha sido declarado sensible.
- IFIELD: Indica el tipo de campo magnético. Cero para campo magnético nulo, que es el caso de todos los medios de rastreo definidos.
- FIELDM: Valor máximo del campo magnético.
- TMAXFD: Desviación angular máxima en grados debida al campo magnético permitida en un paso.
- STEMAX: Paso máximo permitido en centímetros.
- DEEMAX: Máximo valor de pérdida fraccional de energía permitido en un paso (mayor que cero y menor o igual a uno).
- EPSIL: Precisión de cruce de límites. Representa la precisión con la que se ejecuta el rastreo de partículas (cm). Aunque aparece como cero en esta tabla, el valor asignado automáticamente es 0.00001 cm, que se obtiene con el comando interactivo `ptmed`. Se ha notado varias veces que el formato de impresión por pantalla de algunas cantidades no es siempre el apropiado.
- STMIN: Valor mínimo del paso máximo impuesto por pérdida de energía, dispersión múltiple y efectos de Cerenkov o campo magnético (cm). Los valores automáticos calculados por GEANT para este parámetro y para DEEMAX dependen directamente del valor de longitud de radiación del material. Para obtener más información sobre el cálculo de estos parámetros se remite al lector al manual de GEANT [2].

Comandos interactivos de control:

Para la simulación con el fantoma ya no se debía cambiar la energía de los fotones primarios sino cambiar la posición de la fuente de forma que se desplace a lo largo del detector para habilitar la obtención de un perfil del fantoma a una energía determinada. De esta forma se hacen corridas independientes de GEANT para cada una de las energías usadas. En este caso la filosofía del ciclo DO es la misma que en el caso de la obtención de la curva de eficiencia, sólo que esta vez se va corriendo la fuente a lo largo del eje Y. Además, para conseguir efectos nulos de la atenuación del aire, se posicionó la fuente sobre cada escalón, de modo que la coordenada X de la fuente cambia 4 veces a lo largo de la obtención de un perfil. Un segundo ciclo DO puede ser habilitado para conseguir que se recorra varias veces el fantoma, teniendo una estadística más alta. Sin embargo se observó que para un único recorrido del fantoma el número máximo de eventos que se procesaban sin obtener errores en el archivo de salida (se obtenía un perfil el cual a partir de cierta posición se iba a cero) era poco mayor que 32000 eventos por vértice, mientras que la estadística máxima llegaba alrededor de 150000 eventos por

vértice repartidos en 5 recorridos, cada uno con 30000 eventos por vértice. Se logró correr hasta 1 millón de eventos por vértice sin que GEANT se detuviera, pero entonces los archivos de salida eran totalmente inservibles. Los perfiles mostrados en este documento se obtuvieron empleando un único recorrido con 32000 fotones por vértice.

- `NVERTminusone=383,STEP=3.83/[NVERTminusone]`: Asegura que el desplazamiento del vértice de la fuente a lo largo del detector se hace por pasos de 0.01 cm, que es la distancia entre los ejes longitudinales de dos microcintas contiguas.
- `ENERGY=0.0000350`: Fija la energía de todos los fotones primarios en este valor.
- `EVENTS=32000`: Ajusta el número de eventos por vértice a este número.
- `DO I = 1.,1.,1.`: Ciclo que puede ser habilitado para aumentar la estadística de la simulación.
- `DO N = -1.915, 1.915, [STEP]`: Ciclo que corre la posición del vértice de la fuente desde $Y=-1.915$ cm hasta $Y=+1.915$ cm, que son las coordenadas de los ejes longitudinales de las microcintas de los extremos.
- `YVERT=[N]`: Variable que va cambiando la coordenada Y del vértice en la ficha KINE de acuerdo con las instrucciones anteriores

Con estas instrucciones se consigue la irradiación del fantoma a lo largo de la recta $Z=0$ desde $Y=-1.915$ cm hasta $Y=+1.915$ cm y con cuatro coordenadas X diferentes dependiendo del escalón irradiado. Los fotones se emiten paralelos al eje X y comienzan a propagarse en el sentido positivo del mismo. Estos valores están dados por las dimensiones y el posicionamiento del detector en el marco de referencia *MARS*.

B.2.3 Asignación de la carga a una microcinta

La carga generada por los fotones dentro del cristal de silicio debe ser asignada espacialmente para simular la función de las microcintas. Como éstas no están definidas en la simulación, la asignación de carga debe realizarse después del rastreo de las partículas haciendo uso del archivo de salida de GEANT, que contiene información sobre la posición en la que hubo interacción por medio de efecto Compton o fotoeléctrico en la región activa del detector y que fue registrada en el archivo. Esto se hizo mediante un programa de FORTRAN77 que emplea una lógica básica para asignar la carga.

Se ha asumido que en los extremos derecho e izquierdo del detector está ubicada una microcinta, de tal forma que a través del detector hay 384 microcintas en total, de 0.008 cm cada una y por lo tanto 383 espaciamentos entre microcintas de 0.002 cm cada uno. Se definió una unidad como una microcinta y el espaciamento a su derecha, de modo que hay 383 unidades completas (numeradas desde 1 hasta 383) más la microcinta del extremo derecho (microcinta 384) en el rango de coordenadas $Y = [-1.919, 1.919]$, que corresponde a las coordenadas Y de la región activa del detector. Con la coordenada Y de cada uno de los puntos registrados en el archivo *.dat* de salida de GEANT, se hace un cálculo aritmético simple que asigna a la interacción dada un número de microcinta.

Por ejemplo, la coordenada Y de una interacción puede estar dentro de una microcinta o en la región entre microcintas. Si se da el primer caso la interacción es asignada a la microcinta correspondiente; se ocurre el segundo caso, existen dos posibilidades, que haya ocurrido en la mitad del espaciamiento más cercana a la microcinta de su unidad o que haya ocurrido en la más lejana. En el primer caso se asigna a la microcinta de la unidad del espaciamiento en cuestión (incluye también el caso de interacción precisamente en la mitad del espaciamiento) y en el segundo a la microcinta que sigue al lado derecho. A continuación de que la interacción ha sido asignada a una microcinta se calcula la coordenada Y de la microcinta. Estas coordenadas están en el rango $Y = [-1.915, 1.915]$, debido a que la coordenada se encuentra justo en la mitad de la microcinta, es decir $0.008 \text{ cm} / 2$ a la derecha de su límite izquierdo. Las coordenadas Y de los vértices son iguales a las de las microcintas, de forma que la fuente se ubica exactamente sobre cada uno de los ejes longitudinales de las 384 microcintas (ver figura 4.6 y tabla 4.4).

B.3 Rutinas de Fortran77

GEANT provee diferentes rutinas de usuario que sirven para acceder parcialmente a las estructuras de datos. A través de modificaciones a estas rutinas se implementaron las simulaciones. Las principales rutinas de Fortran77 son:

1. ugeom.f: Definición del montaje: materiales, medios de rastreo y partículas.
2. gukine.f: Controla la cinemática de las partículas primarias. Es esencial en la reinicialización de variables que sirven como banderas.
3. gustep.f : Invocada al final de cada paso de rastreo de una partícula. Es en esta fase en la que se recoge información acerca de las interacciones Compton y fotoeléctrico.
4. guout.f: Rutina llamada al final de cada evento (una partícula primaria y todos sus descendientes incluyendo cada paso). Permite también recolectar información de interés.
5. ufiles.f: apertura de archivos de usuario. Los archivos son cerrados automáticamente por GEANT, el usuario no tiene que cerrarlos explícitamente.

B.3.1 Rutinas de usuario de GEANT

Debido a la extensión de los archivos .f, se han extractado las partes más significativas de las rutinas de usuario más importantes.

B.3.1.1 ugeom.f

Rutina para la simulación de eficiencia:

```
C DEFINICION DE LOS VOLUMENES
```

```
PAR(1)=3.1265
PAR(2)=2.5
PAR(3)=2.
CALL GSVOLU('MAMA' , 'BOX ' ,1, PAR, 3, IVOL)
```

```

PAR(1)=0.5765
PAR(2)=1.9955
PAR(3)=0.015
CALL GSVOLU('DETE','BOX ',25,PAR,0,IVOL)
CALL GSPOSP('DETE',1,'MAMA',2.55,0.,0.,0,'ONLY',PAR,3)

```

Rutina para la simulación angiográfica:

```

*****
*****

```

```

C PARAMETROS DE LA SOLUCION YODADA
  DATA AS/126.904, 18.015/
  DATA ZS/53., 10./
c Para concentracion de 370mgI/ml solucion: DENSIDAD=1.2949g/cm3. Cambiar valor en
GSMIXT
*   DATA WSL/0.2857, 0.7143/
c Para concentracion de 185mgI/ml solucion: DENSIDAD=1.1475g/cm3 Cambiar valor en GSMIXT
  DATA WSL/0.1612, 0.8388/
c Para concentracion de 92mgI/ml solucion: DENSIDAD=1.0733g/cm3 Cambiar valor en GSMIXT
*   DATA WSL/0.08572, 0.9143/

```

```

*****

```

C Invocación de la tabla de materiales de GEANT

```

CALL GIDROP
CALL GMATE

```

C Define las partículas por defecto

```

CALL GPART
CALL GPIONS

```

C Definición de los materiales de usuario

```

CALL GSMATE(17,'OXYGEN', AOX, ZO, DEOX, RLOX, BCP, 0.,0)
CALL GSMATE(18,'SI',28.0855,14.,2.33,9.36,BCP,0.,0)
CALL GSMATE(19,'IODINE',126.904,53.,4.930,1.72,BCP,0.,0)
CALL GSMATE(20, 'VACUUM2',1.E-16,1.,1.E-16,1.E16,BCP,0.,0 )
CALL GSMIXT(21,'BGO(COMPOUND)$',A,Z,7.1,-3,WMAT)
CALL GSMIXT(22,'LEAD GLASS$',ALG,ZLG,5.2,6,WLG)
CALL GSMIXT(23,'PLEXIGLASS$',APLX,ZPLX,1.18,-3,WPLX)
CALL GSMIXT(24,'WATER', AW, ZW, 1.0, -2, WW)
CALL GSMIXT(25,'I-SOL',AS,ZS,1.1475,2,WSL)
CALL GSMIXT(26, 'CAN',ACAN, ZCAN, 1.370,3,WCAN)

```

C Parámetros de rastreo. Código ignorado. Se toman los valores del .kumac

```

FIELDM = 0.
IFIELD = 0
TMAXFD = 10.
STEMAX = 1000.
DEEMAX = 0.2
EPSIL = 0.0001
STMIN = 0.0001

```

C Definición de los materiales como medios de rastreo

```

CALL GSTMED( 1,'DEFAULT MEDIUM AIR' , 15 , 0 , IFIELD,
+   FIELDM,TMAXFD,STEMAX,DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0 )
CALL GSTMED( 2,'ABSORBER' ,IMAT, 0 , IFIELD,
+   FIELDM,TMAXFD,STEMAX,DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0 )

CALL GSTMED( 4,'PLEXIGLASS', 23 , 0 , IFIELD,
+   FIELDM,TMAXFD,STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0)
CALL GSTMED( 5,'WATER', 24 , 0 , IFIELD,
+   FIELDM,TMAXFD,STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0)
CALL GSTMED( 6,'I-SOL', 25 , 0 , IFIELD,
+   FIELDM,TMAXFD,STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0)

```

```

      CALL GSTMED( 7,'CAN', 26 , 0 , IFIELD,
+               FIELDM,TMAXFD,STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0 )

C
C Los materials de la tabla de GEANT se definen también como medios de rastreo.
C
      DO 100 IMT= 1,19
        CALL GSTMED( IMT+7,'DUMMY-MEDIUM'      , IMT , 0 , IFIELD,
+               FIELDM,TMAXFD,STEMAX,DEEMAX, EPSIL, STMIN, 0 , 0 )
100 CONTINUE

C Inicialización de las tablas de secciones eficaces y de pérdida de energía

      CALL GPHYSI

C DEFINICION Y POSICIONAMIENTO DE LOS VOLUMENES

      PAR(1)=3.1265
      PAR(2)=2.5
      PAR(3)=2.
      CALL GSVOLU('MAMA' , 'BOX ' ,1, PAR, 3, IVOL)

      PAR(1)=0.5765
      PAR(2)=1.9955
      PAR(3)=0.015
      CALL GSVOLU('DETE','BOX ' ,25,PAR,0,IVOL)
      CALL GSPOSP('DETE',1,'MAMA',2.05,0.,0.,0,'ONLY',PAR,3)

      CALL GSVOLU('PIPE','TUBE',6,PAR,0,IVOL)
      CALL GSVOLU('IJAT' , 'BOX ' ,4, PAR, 0, IVOL)

      PAR(1)=0.
      PAR(2)=0.05
      PAR(3)=2.
      CALL GSPOSP('PIPE',1,'IJAT',0.,-1.46,0.,0,'ONLY',PAR,3)
      CALL GSPOSP('PIPE',2,'IJAT',0.,-0.44,0.,0,'ONLY',PAR,3)
      CALL GSPOSP('PIPE',3,'IJAT',0.,0.6,0.,0,'ONLY',PAR,3)
      CALL GSPOSP('PIPE',4,'IJAT',0.,1.62,0.,0,'ONLY',PAR,3)

      PAR(1)=0.5
      PAR(2)=2.5
      PAR(3)=2.
      CALL GSPOSP('IJAT' , 1, 'MAMA ',0.9735,0.,0.,0,'ONLY', PAR, 3)

      PAR(1)=0.5
      PAR(2)=2.5
      PAR(3)=2.
      CALL GSVOLU('HIJA' , 'BOX ' ,4, PAR, 0, IVOL)

      PAR(1)=0.5
      PAR(2)=1.805
      PAR(3)=2.
      CALL GSPOSP('HIJA', 1, 'MAMA ', -0.0265,-0.695,0.,0,'ONLY', PAR, 3)

      PAR(1)=0.1
      PAR(2)=1.805
      PAR(3)=2.
      CALL GSVOLU('IJAL' , 'BOX ' ,16, PAR, 0, IVOL)
      CALL GSPOSP('IJAL', 1, 'MAMA ', -0.6265,-0.695,0.,0,'ONLY', PAR, 3)

      PAR(1)=0.5
      PAR(2)=1.29
      PAR(3)=2.0
      CALL GSPOSP('HIJA',2,'MAMA ', -1.2265,-1.21,0.,0,'ONLY',PAR,3)

      PAR(1)=0.1
      PAR(2)=1.29
      PAR(3)=2.
      CALL GSPOSP('IJAL',2,'MAMA ', -1.8265,-1.21,0.,0,'ONLY',PAR,3)

      PAR(1)=0.5
      PAR(2)=0.765
      PAR(3)=2.
      CALL GSPOSP('HIJA',3,'MAMA ', -2.4265,-1.735,0.,0,'ONLY',PAR,3)

      PAR(1)=0.1

```



```

PAR(2)=0.765
PAR(3)=2.
CALL GSPOSP('IJAL',3,'MAMA ', -3.0265, -1.735, 0., 0, 'ONLY', PAR, 3)

```

B.3.1.2 gustep.f

Es una de las rutinas más importantes. Es aquí en donde se hace el conteo de partículas, o más bien de interacciones fotoeléctrico (PHOT) y Compton (COMP) en la parte designada como región activa del detector. La complejidad de los conteos se debe a que cuando en alguno de estos dos procesos se debía generar un electrón con energía menor que 10 keV, GEANT no consideraba su creación, sin embargo sí reportaba qué tipo de interacción había sucedido. De esta forma se hicieron converger dos conteos diferentes a un mismo número para tener mayor conocimiento del funcionamiento de GEANT. Uno de estos conteos se denomina conteo de fotones y se refiere a los fotones que interactuaron en el silicio. El otro conteo se llama conteo de electrones y considera los electrones que GEANT genera pero suma las interacciones en las que GEANT no consideró la creación del electrón. Para el procesamiento de datos externo a GEANT se usó el conteo de fotones, aunque hubiera podido ser el de electrones pues son iguales. El archivo mostrado corresponde a la simulación angiográfica, en la cual se van escribiendo los archivos de salida phot.dat y elec.dat que contienen información acerca de la cinemática y posición de las interacciones en el silicio, a medida que cada partícula es procesada. Los conteos de la simulación de eficiencia son iguales, pero la escritura del archivo de salida se realiza en guout.f que se llama al final del procesamiento de un evento. Esto se hace porque para la eficiencia no se necesita saber nada acerca de la interacción, excepto que sucedió.

```

*****
C CONTEO DE TODOS LOS FOTONES Y "ELECTRONES NO EXITOSOS".

C      ACA SE CUENTAN FOTONES COMO PROCESOS COMP Y PHOT EXITOSOS.
C      EN LOS CASOS NO EXITOSOS SE AUMENTA LA CUENTA TANTO DE FOTONES COMO DE ELECTRONES.
C      NO SE TIENEN EN CUENTA PHOT NO EXITOSOS DEBIDO A QUE ESTOS OCURREN A ENERGIAS
C      MENORES APROXIMADAMENTE A 12keV, POR ESO SI SE QUIERE CALCULAR EFICIENCIA A
C      ENERGIAS MENORES SE DEBE ACTIVAR EL CODIGO CORRESPONDIENTE. NO IMPORTANTE EN LA
C      SIMULACION DEL FANTOMA PUES SE TRABAJA ALREDEDOR DE 30 keV. POR EL CONTRARIO
C      COMP NO EXITOSOS PUEDEN OCURRIR A CUALQUIER ENERGIA.

C      RESUMEN: 1. ACA SE CUENTAN PROCESOS EXITOSOS Y NO EXITOSOS PARA FOTONES (NOPHO).
C               2. PROCESOS NO EXITOSOS PARA ELECTRONES (NELEC)

C SI ES UN FOTON EN LA REGION "ACTIVA" DEL DETECTOR. INDI HACE QUE PUEDA SER CONTADO
SOLO UNA VEZ:

      IF(IPART.EQ.1.AND.INDI.EQ.1)THEN
      IF(VECT(1).GT.1.55.AND.VECT(1).LT.2.55)THEN
      IF(VECT(2).GT.-1.919 .AND.VECT(2).LT.1.919)THEN
      IF(VECT(3).GT.-0.015 .AND.VECT(3).LT.0.015)THEN

C      SI EN ESTE PASO PRODUJO PARTICULAS SECUNDARIAS (PROCESOS EXITOSOS)

      IF(NGKINE.GT.0)THEN
      IF(KCASE.EQ.1414482000.OR.KCASE.EQ.1347243843)THEN
      NOPHO=NOPHO+1
      INDI=0
      WRITE(10,8),IPART, NOPHO,VECT(1),VECT(2),VECT(3),NUMED,VERT(2)
      ENDIF

```


Explicación del significado de las variables (Más información respecto de las variables de GEANT se encuentra en [4]):

- NOPHO: Variable creada por el usuario que lleva cuenta de las interacciones PHOT y COMP contando el número de fotones que registraron dichas interacciones.
- NELECT: Variable creada por el usuario que cuenta lo mismo que NOPHO pero contando electrones generados. En los casos de interacciones no exitosas NOPHO y NELECT son aumentados bajo las mismas condiciones lógicas.
- IPART: Tipo de partícula que está siendo rastreada. 1 para fotones y 3 para electrones.
- INDI: Bandera creada por el usuario para evitar el recuento de interacciones con NOPHO.
- INDI2: Igual que INDI pero para el caso de NELECT. Son variables reiniciadas en gukine.f, lo que asegura su habilitación como banderas para cada evento.
- KCASE: Identificador de los procesos de interacción. 1414482000 para PHOT y 1347243843 para COMP.
- ISTOP: Estatus de la partícula rastreada. 0 para partícula que seguirá siendo rastreada; 1 cuando ha desaparecido y 2 cuando está por debajo de los cortes de energía o ha interactuado pero no se han generado partículas secundarias.
- DESTEP: Pérdida de energía en el paso actual.
- VECT(i): Coordenada i de la posición de la partícula en el paso presente de rastreo. Se da el caso de pasos de rastreo consecutivos de una partícula con iguales coordenadas de posición. i = 1 para X, 2 para Y y 3 para Z.
- VERT(i): Coordenada i de la posición de origen (vértice) de la partícula que está siendo rastreada.
- GEKIN: Energía cinética de la partícula en GeV.

En la siguiente tabla se dan los valores de dos variables que se usan en las condiciones lógicas para contar interacciones no exitosas y se comparan con los valores para los casos exitosos. Estos son valores correspondientes al fotón que interactuó.

	ISTOP	DESTEP
PHOT exitoso	1	$\neq 0$ (energía de enlace)
PHOT no exitoso	2	$\neq 0$ (energía de enlace)
COMP exitoso	0	0
COMP no exitoso	0	$\neq 0$ (energía cinética del electrón que debió ser generado)

Tabla B.1 Valores de las variable ISTOP y DESTEP de un fotón para las interacciones por efecto fotoeléctrico y Compton para casos exitosos (generación de electrón como partícula secundaria) y no exitosos (no generación de electrón).

B.3.2 Rutina externa a GEANT encargada de la asignación de las interacciones a las microcintas en la simulación angiográfica

La siguiente rutina se encarga de leer los archivos de salida de GEANT phot.dat y elec.dat, que contienen básicamente la misma información. Sin embargo la rutina no se ha modificado aún para procesar uno sólo de los archivos, de manera que se está

realizando la misma tarea dos veces. Con base en la información en el archivo, se asigna la interacción a una microcinta y una coordenada a la microcinta, de acuerdo con la geometría definida en ugeom.f. Se muestra la parte correspondiente al procesamiento de phot.dat pues la parte de elec.dat es idéntica.

```

C*****
C  PROCESAMIENTO DE LA SALIDA DE GEANT EN LA SIMULACION DEL FANTOMA
C*****

      INTEGER BIN(384), BINE(384), BINP(384)
      REAL X, Y, Z, YSTRIP(384), YV
      REAL R,UNI,GAP,SUNI
      INTEGER N, EOF, NSTRIP, I, J, K, FLAG
      PARAMETER(UNI=0.01)

C      UNI ES EL ANCHO DE UNA MICROCINTA MAS EL ESPACIO ADYACENTE A LA DERECHA QUE LA
C      SEPARA DE LA SIGUIENTE EN CENTIMETROS. ESTO ES LLAMADO UNIDAD
      PARAMETER(GAP=0.001)

C      GAP ES LA SEPARACION EN CENTIMETRON ENTRE Y=0 Y EL EXTREMO DERECHO DE LA UNIDAD
C      NUMERO 192.

      PARAMETER(SUNI=0.002)

C      SUNI ES EL ANCHO DEL ESPACIO ENTRE MICROCINTAS EN CENTIMETROS, ES DECIR LA PARTE
C      PEQUEÑA DE UNA UNIDAD.

      INTEGER IPART, NOPHO, NUMED, ITRA
      INTEGER NELECT,NPAIR
      REAL GKIN(384),GK

C      APERTURA DE ARCHIVOS
      I=1
C      ARCHIVOS DE ENTRADA

      OPEN(UNIT=10, FILE='phot.dat', STATUS='UNKNOWN')
      OPEN(UNIT=12, FILE='elec.dat', STATUS='UNKNOWN')

C      ARCHIVOS DE SALIDA PARA HACER LOS PERFILES
      OPEN(UNIT=14, FILE='EBIN31432e3c185seed.dat', STATUS='UNKNOWN')
      OPEN(UNIT=15, FILE='PBIN31432e3c185seed.dat', STATUS='UNKNOWN')

      DO WHILE (I.LE.384)
        BIN(I)=0
        BINE(I)=0
        BINP(I)=0
        YSTRIP(I)=1E6
        GKIN(I)=0.
        I=I+1
      END DO

C      A MEDIDAD QUE SE LEE EL ARCHIVO, LA INTERACCION ES ASIGNADA A UNA MICROCINTA.

      READ(UNIT=10,FMT=4,IOSTAT=EOF)IPART,NOPHO,X,Y
      +      ,Z,NUMED,YV
4      FORMAT(' ',I5,3X,I10,3X,E12.6,3X,E12.6,3X
      +      ,E12.6,3X,I5,3X,E12.6)
6      IF(EOF.EQ.0)THEN
        N=AINT((Y-GAP)/UNI )

C      DETERMINACION DEL NUMERO DE MICROCINTA DE ACUERDO CON LA CORRDENADA Y EN QUE
C      OCURRIO LA INTERACCION EN LA GEOMETRIA DEL MONTAJE. CALCULO DE LA COORDENADA Y DE
C      MICROCINTA (YSTRIP).

      R=(Y-GAP-N*UNI)
      IF(Y.GE.0)THEN
        IF(R.LE.UNI-SUNI/2)THEN
          NSTRIP=N+1+192

          BIN(NSTRIP)=BIN(NSTRIP)+1
          IF(YSTRIP(NSTRIP).EQ.1E6)THEN
            YSTRIP(NSTRIP)=( (NSTRIP-192)*UNI)-0.006+GAP
          ENDIF
          write(*,*)'NSTRIP = ',NSTRIP

```

```

ELSE
  NSTRIP=N+2+192
  BIN(NSTRIP)=BIN(NSTRIP)+1
  IF(YSTRIP(NSTRIP).EQ.1E6)THEN
    YSTRIP(NSTRIP)=( (NSTRIP-192)*UNI)-0.006+GAP
  ENDIF
  write(*,*)'NSTRIP =',NSTRIP
ENDIF
ELSE
  IF(R.LE.-(SUNI/2))THEN
    NSTRIP=N+192

    BIN(NSTRIP)=BIN(NSTRIP)+1
    IF(YSTRIP(NSTRIP).EQ.1E6)THEN
      YSTRIP(NSTRIP)=( (NSTRIP-192)*UNI)-0.006+GAP
    ENDIF
    write(*,*)'NSTRIP =',NSTRIP
  ELSE
    NSTRIP=N+1+192
    BIN(NSTRIP)=BIN(NSTRIP)+1
    IF(YSTRIP(NSTRIP).EQ.1E6)THEN
      YSTRIP(NSTRIP)=( (NSTRIP-192)*UNI)-0.006+GAP
    ENDIF
    write(*,*)'NSTRIP =',NSTRIP
  ENDIF
ENDIF

READ(10,5,IOSTAT=EOF)IPART,NOPHO,X,Y
+ ,Z,NUMED,YV
5  FORMAT(' ',I5,3X,I10,3X,E12.6,3X,E12.6,3X
+ ,E12.6,3X,I5,3X,E12.6)
GO TO 6
ENDIF

WRITE(*,*)'EOF =',EOF

C      ESCRITURA DEL ARCHIVO DE SALIDA CON EL NUMERO DE MICROCINTA, LA COORDENADA Y DE
C      MICROCINTA Y EL NUMERO DE CONTEOS PARA LAS 384 MICROCINTAS

I=1
DO WHILE(I.LE.384)

C  DEBUG      write(*,*)I,' ',YSTRIP(I),' ',BIN(I)
      WRITE(15,28)I,YSTRIP(I),BIN(I)
28      FORMAT(1X,I5,3X,E12.6,3X,I5)

      I=I+1
ENDDO

CLOSE(10)
CLOSE(12)
CLOSE(14)
CLOSE(15)
END

```

En [3] se puede obtener una introducción al manejo básico de GEANT y en [4] una explicación de muchas de las variables de GEANT que contienen información física y del estado de rastreo de las partículas.

REFERENCIAS

- [1] *GEANT-Detector Description and simulation tool*, GEANT Version 3.21/13 Released on 15/11/1999, Application Software Group, Computing and Networks, CERN, Geneva, Switzerland.
- [2] *GEANT User's Guide*, CERN Geneva Switzerland, October 1994 ed.
- [3] <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant/> , Tutorial en línea de GEANT.
- [4] <http://wwwasdoc.web.cern.ch/wwwasdoc/geantold/H2GEANTBASE030.html>, *GEANT overview of common blocks*.
- [5] Muñoz J. Andrés: *Simulación en MCNP de un fantoma angiográfico usando la técnica de energía dual*. Universidad de los Andes, 2004
- [6] W.R. Leo: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987.
- [7] H. Cember: *Introduction to Health Physics*, McGraw-Hill USA, 3rd ed, 1996.
- [8] E. Krestel: *Imaging Systems for Medical Diagnostics*, Siemens Aktiengesellschaft Berlin Munich, 1990.
- [9] K.K. Shung: *Principles of Medical Imaging*, Academic Press San Diego New York, 1992.
- [10] http://ric.uthscsa.edu/personalpages/lancaste/DI_II.html, J.L. Lancaster: Handouts for the graduate program course “Advanced Diagnostic Imaging” at University of Texas Health Science Center at San Antonio, 2004, based on revisions of: Bruce H. Hasegawa: *The Physics of Medical X-Ray Imaging*, 2nd ed.
- [11] <http://www.to.infn.it/~prino/xrays/xrays.html>. Tesis de Enrico Tomassi: *Rivelatore al Silicio*, 2003.
- [12] A. Peisert: *Silicon Microstrip Detectors*. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Padova Italia, 1992.
- [13] Curso de Protección Radiológica para el Manejo de Material Radiactivo. Unidad de de Seguridad Nuclear, Protección Radiológica y Gestión Ambiental de Ingeominas, Bogotá D.C, 2002.
- [14] R.E. Alvarez: *Energy Selective Reconstructions in X-Ray Computerized Tomography*. Phys. Med. Biol., 1976, Vol. 21, N°5, 733-744.
- [15] A. Tufannelli: *Novel X-Ray Source for Dual-Energy Subtraction Angiography*. Submitted to SPIE, Medical Imaging Conference 2002, (MI 4682-33).

- [16] <http://www.mathcad.com/Library/LibraryContent/MathML/compton.htm>
The kinematics and dynamics of Compton scattering. A document from the Mathcad Library by Johann Van Rooven.

- [17] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html> National
Institute of Standards and Technology (NIST), Photon Cross Sections Database.

- [18] <http://www.unifr.ch/physics/me/cours/methodes/script.html> *Constituants de la matière. Méthodes expérimentales.* Dr Françoise Mulhauser SE 2001.
Université de Fribourg.

- [19] http://www.pueblo.gsa.gov/cic_text/health/fullbody-ctscan/what.htm
FDA, U.S.A. Food and Drug administration, Center for Devices and Radiological Health.

- [20] http://www.gehealthcare.com/rad/xr/education/dig_xray_intro.html
General Electric Healthcare: Education and Diagnostic Imaging.

- [21] <http://www.esrf.fr/UsersAndScience/Experiments/Imaging/ID17/angio>
The European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), at Grenoble, France.

- [22] http://detserv1.dl.ac.uk/Herald/xray_review_angiography.htm
Synchrotron Radiation Department, Daresbury Laboratory, Warrington, WA4 4AD UK.

- [23] Baldazzi G.: *X-ray imaging with a silicon microstrip detector coupled to the RX64 ASIC.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 509(2003) 315-320

- [24] Kittel C.: *Introduction to Solid State Physics.* John Wiley & Sons, 7th ed. 1996.