

# Simulación mediante *Geant4* de un Calorímetro electromagnético

Ana Belén Pérez Cerdán  
Carlos Escobar Ibáñez

16 de junio de 2004

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Desarrollo de la Simulación</b>	<b>3</b>
<b>3. Estudio de la cascada electromagnética</b>	<b>5</b>
3.1. Respuesta de un calorímetro electromagnético a $e^\pm$ y $\mu^\pm$ . . . . .	5
3.1.1. Simulación con electrones . . . . .	5
3.1.2. Simulación con muones . . . . .	7
3.2. Estudio de las características de la cascada electromagnética . . . . .	9
3.2.1. Dependencia del número de secundarios con la Z del material . . . . .	9
3.2.2. Linealidad en el número de positrones y electrones generados con la energía para un mismo material . . . . .	12
3.3. Desarrollo longitudinal de la cascada. Modelo de <i>Rossi-Heitler</i> . . . . .	14
3.3.1. Máxima deposición de energía en función de la energía para un mismo material . . . . .	15
3.3.2. Comparación cuantitativa del modelo y del MonteCarlo . . . . .	17
3.4. Conclusiones . . . . .	20
<b>4. Referencias</b>	<b>20</b>

# 1. Introducción

El presente trabajo desarrolla los aspectos fundamentales de la simulación de un calorímetro electromagnético llevada a cabo con *Geant4*. Lo que se pretende estudiar particularmente son las cascadas electromagnéticas generadas por leptones ligeros, haciendo un estudio de los factores que influyen en su generación así como las propias características de ésta.

# 2. Desarrollo de la Simulación

La simulación se ha llevado a cabo partiendo desde cero en lo referente a la simulación con *Geant4*. Ha sido el primer contacto serio que hemos tenido con este código, pues en el curso no hubo tiempo para tratarlo. Para poder desarrollar algo coherente y completo hemos tenido que partir del código fuente del ejemplo *N03* que incluye *Geant4*. Una vez estudiado el código, sus funciones y sus resultados concluimos que nos podría servir de base para nuestros fines.

Para poder obtener los datos que queríamos se tuvo que modificar el código existente y en algunos casos ampliarlo bastante. También se tuvo que dar soporte para guardar los datos *interesantes* para nuestros fines. Una vez modificado el código fuente se compiló y se observó un pequeño inconveniente, los parámetros (variables) que debíamos variar para generar los distintos ficheros estaban incluidos en el mismo código fuente y no era posible cambiarlos si tener que volver a compilar el *software*. Por esta razón se implementó el soporte para poder modificar dichos parámetros en *runtime*, es decir, sin tener que compilar el código fuente. Se estructuraron las opciones interesantes en ficheros *mac*. Se tiene la estructura que muestra la fig. 1. Modificando éstos ficheros se consigue cambiar aspectos geométricos, características de las partículas incidentes, etc...

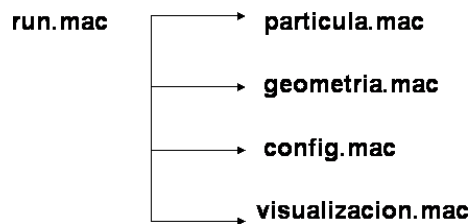


Figura 1: Estructura de los ficheros *mac*

Lo que nos quedaba era sólo generar los ficheros de datos (*RAW data*). Esto llevó bastante tiempo y sobretodo bastante espacio de disco. Primero generamos ficheros con 25 eventos y luego con 250 para comprobar y chequear la simulación y hacer un análisis preliminar de los datos y resultados. Una vez que se vio que todo cuadraba (más o menos) nos lanzamos a la producción de los ficheros que necesitábamos variando energías y materiales según correspondiera. Se decidió generar 1000 eventos para cada uno. Esto llevó casi una semana en un

PC (la generación era por las noches). Después se subió a 2500 eventos en unos pocos casos. En la tabla 1 están los ficheros generados junto con sus características.

Eventos	$E_0$ (GeV)	Material	Z	Fichero	Tamaño (MB)
1000	1	Pb	82	1GeV_Pb_1000events.dat	58
1000	2.5	Pb	82	2.5GeV_Pb_1000events.dat	145
1000	5	Pb	82	5GeV_Pb_1000events.dat	290
1000	7.5	Pb	82	7.5GeV_Pb_1000events.dat	434
1000	10	Pb	82	10GeV_Pb_1000events.dat	577
1000	12.5	Pb	82	12.5GeV_Pb_1000events.dat	721
1000	15	Pb	82	15GeV_Pb_1000events.dat	864
1000	1	Al	13	1GeV_Al_1000events.dat	73
1000	10	Al	13	10GeV_Al_1000events.dat	734
1000	1	Cu	29	1GeV_Cu_1000events.dat	70
1000	10	Cu	29	10GeV_Cu_1000events.dat	689
1000	10	lAr	18	10GeV_lAr_1000events.dat	611
1000	10	Pb+lAr	-	10GeV_Pb+lAr_1000events.dat	974
2500	1	Pb	82	1GeV_Pb_2500events.dat	145
2500	1	lAr	18	1GeV_lAr_2500events.dat	153
2500	1	Pb+lAr	-	1GeV_Pb+lAr_2500events.dat	245

Cuadro 1: Resumen de los archivos generados para la simulación

Una vez generados los ficheros de datos (6.7GB) nos quedaba la no menos ardua tarea del análisis de los datos. Para ello, se realizaron varias macros. Hay una principal, *analisis.cc*, que es la que se encarga de analizar todos los datos. Las otras las hicimos para generar ciertos ajustes concretos y una superposición de gráficas.

Todos los datos estan disponibles en un DVD debido a lo que ocupan (6.7GB que se quedan en 2.0GB comprimidos). También esta el código fuente y las macros en ROOT de análisis.

## 3. Estudio de la cascada electromagnética

### 3.1. Respuesta de un calorímetro electromagnético a $e^\pm$ y $\mu^\pm$

El objetivo de este apartado es la simulación de la respuesta de un calorímetro electromagnético frente a dos tipos distintos de partículas, en concreto,  $e^-$  y  $\mu^-$  (el uso de partículas con carga positiva es equivalente), y verificar a partir de qué energía comienza a ser importante la radiación por *Bremmstrahlung* y comienza a manifestarse la cascada electromagnética.

En este caso se ha simulado un calorímetro homogéneo de hierro. Se han variado las dimensiones de éste en función de la energía de la partícula ya que existe una dependencia proporcional de la longitud transversal del calorímetro y la energía de la partícula ( $x_{transversal} \propto \ln E$ ) que luego se tratará.

#### 3.1.1. Simulación con electrones

Para el caso de los  $e^-$ , la energía crítica,  $E_c$ , para el hierro, es decir, la energía a la cual las pérdidas por radiación se igualan a las de ionización, es de 22.4MeV. Es a partir de dicha energía cuando comienza a desarrollarse la cascada electromagnética. En la simulación se pretenderá llevar a cabo la visualización cualitativa de la dependencia con la energía y por lo tanto, cuándo la cascada comienza a desarrollarse.

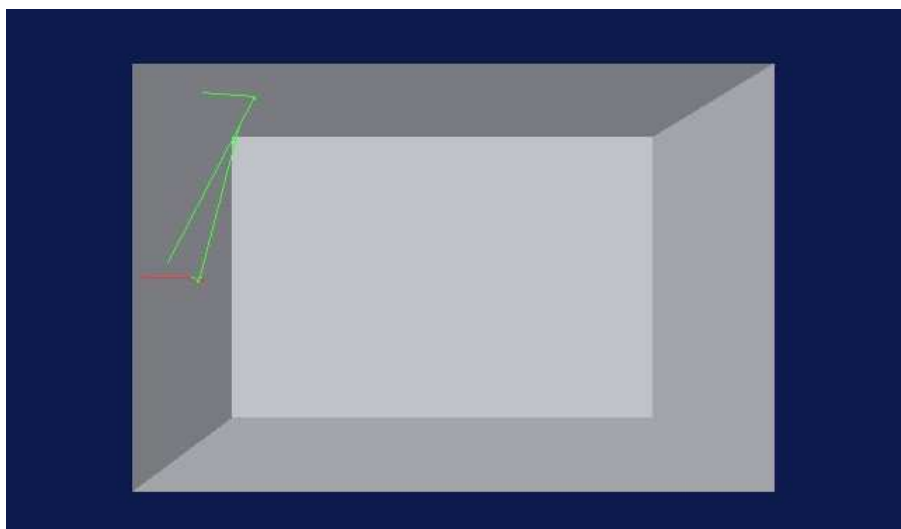


Figura 2: Simulación de un  $e^-$  de 10MeV en un calorímetro de 75 mm de longitud

En primer lugar, se ha simulado la interacción de un  $e^-$  de 10MeV con nuestro calorímetro. Como puede observarse en la fig. 2, únicamente se produce ionización, producción de pares y aniquilación de  $e^+$  y con unas dimensiones muy reducidas del calorímetro es posible contener prácticamente toda la energía del electrón primario (siempre podremos tener pérdidas por fotones de baja energía que escapan). Por el contrario, se verá en el apartado siguiente que

los muones necesitarán un calorímetro de dimensiones mayores para que la partícula deposite toda la energía dentro de él.

A continuación se ha simulado un electrón de 50MeV ( $E > E_c$ ) donde puede verse que la cascada electromagnética comienza a desarrollarse. Así mismo, el depósito de energía llega hasta una mayor profundidad dentro del calorímetro debido a una mayor extensión logitudinal de la cascada, por lo que éste ha de ser de dimensiones considerablemente superiores al utilizado para 10MeV. La fig. 3 muestra estos comentarios.

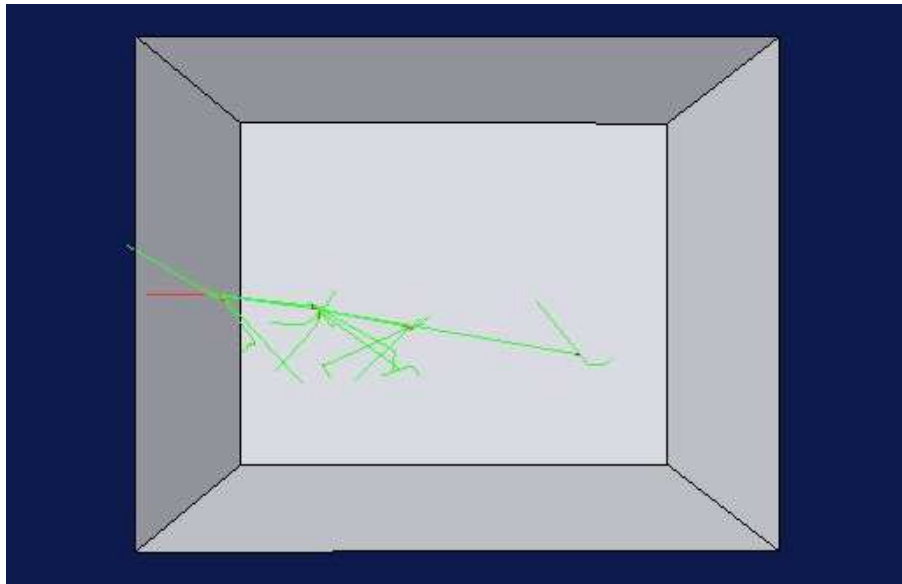


Figura 3: Simulación de un  $e^-$  de 50MeV en 10 cm de  $Fe$ . Se puede ver que la cascada comienza a tener lugar

Con más de 200MeV ya puede apreciarse la cascada electromagnética con claridad. En las fig. 4 y 5 se ve la cascada y el gran número de partículas secundarias generadas. Estas partículas secundarias son  $e^-$ ,  $\gamma$  y  $e^+$ . Existe una pequeña fracción de la energía que escapa debida a  $\gamma$  de baja energía.

Nótese las reducidas dimensiones necesarias para contener toda la cascada electromagnética. En tan solo 20 cm de material ( $Fe$ ) un  $e^-$  de 5GeV deposita toda su energía, mientras que un caso totalmente distinto ocurrirá con los muones. Se puede apreciar cómo la cascada electromagnética se va extendiendo y haciéndose más compleja (más partículas secundarias) conforme se aumenta la energía del  $e^-$ .

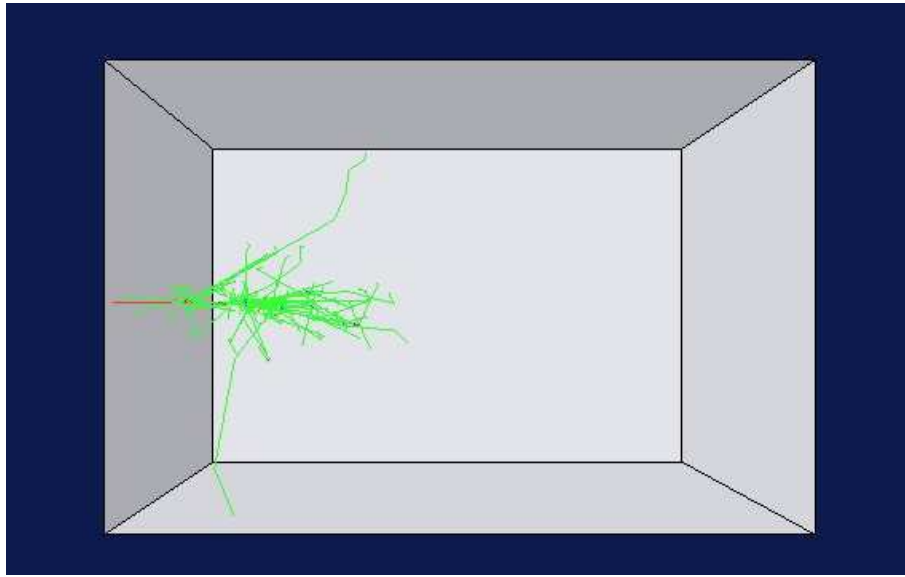


Figura 4: Simulación de un  $e^-$  de 500MeV en 30 cm

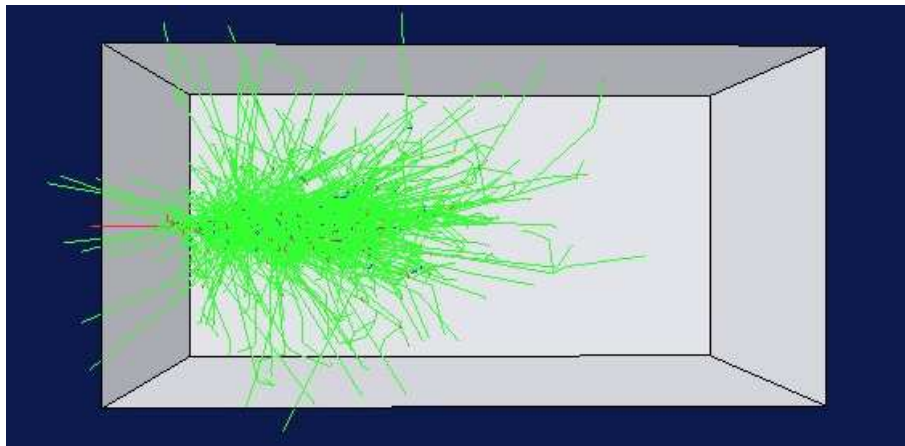


Figura 5: Simulación de un  $e^-$  de 5GeV en 20 cm de longitud. Se puede apreciar el aumento en la complejidad de la cascada con respecto a energías inferiores, es decir, el tremendo número de partículas secundarias

### 3.1.2. Simulación con muones

La respuesta de los muones difiere sustancialmente de la de los electrones en un calorímetro electromagnético. Como primer punto a diferenciar, los muones se comportan de igual manera que las partículas *mip* de un *shower*, perdiendo su energía por excitación o ionización del medio. Debido a esto, las dimensiones de los calorímetros para contener toda la energía de este tipo de partículas tendrán que ser mucho mayores que para los electrones, dado que pierden una pequeña fracción de su energía en cada interacción.

En segundo lugar, la radiación por *Bremmstrahlung* empieza a ser importante a energías del orden del TeV. Una manera de estimar de forma aproximada esta energía crítica de los muones en el hierro, es mediante la ley de escala siguiente en función de la masa de la partícula:

$$\xi_c(\mu^\pm) = \xi_c(e^\pm) \left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^2 \rightarrow \xi_c(\mu^\pm) \simeq 1TeV$$

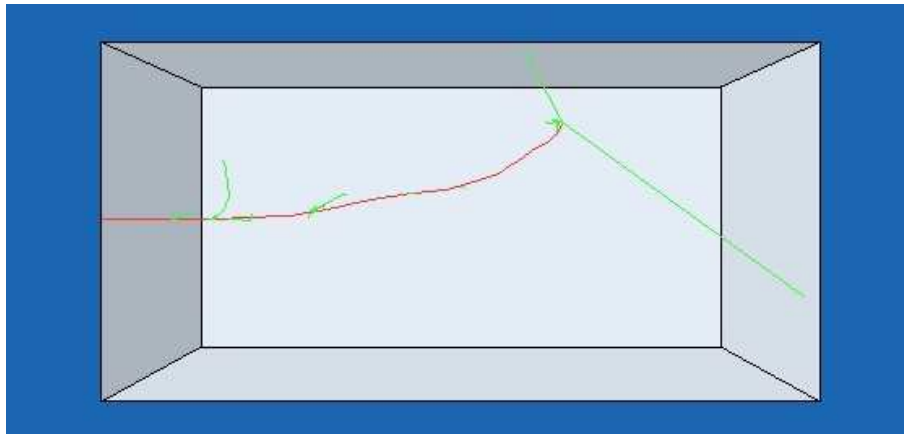


Figura 6: Simulación de un  $\mu^-$  de 1GeV en un calorímetro de *Fe* de 100 cm de longitud

En la fig. 6 se ha simulado un  $\mu^-$  de 1GeV. Puede verse que tan sólo se produce ionización a lo largo del recorrido de la partícula. El tamaño del calorímetro ya resulta ser grande en comparación para un electrón de 5GeV donde la longitud necesaria era de tan sólo 10 cm. Aquí se ha colocado un calorímetro de Fe ( $Z=26$ ) de 1 m de longitud.

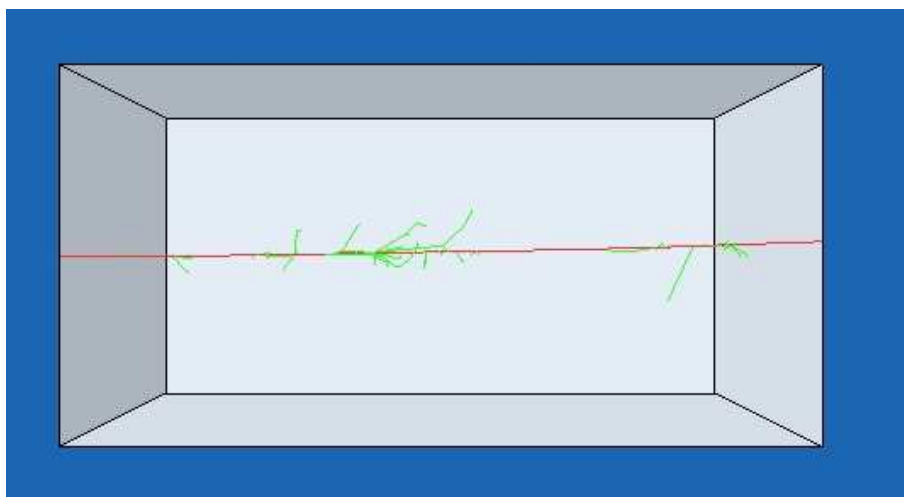


Figura 7: Simulación de un  $\mu^-$  de 10GeV en un calorímetro de 500 cm de longitud



Como puede observarse en la fig. 7, a pesar de haber puesto 5 m de calorímetro para 10GeV, el muón no llega a depositar toda su energía en el interior de éste. Esto es debido a que en este rango de energías el muón se comporta como una partícula *mip* (como ya se comentó anteriormente) depositando una fracción ínfima de su energía. Ello se traduce en la necesidad de un calorímetro extremadamente grande. La manera de proceder en los experimentos reales, es colocar el calorímetro muónico después del electromagnético y del hadrónico con el fin de que el muón haya recorrido material suficiente como para que al llegar a este calorímetro final deposite toda su energía.

La energía crítica, tal y como se ha calculado anteriormente, es de unos cientos de GeV para los muones en el hierro ( $Z=26$ ). Se ha simulado un  $\mu^-$  de 500GeV y en la fig. 8 se puede observar la cascada electromagnética que comienza a tener lugar.

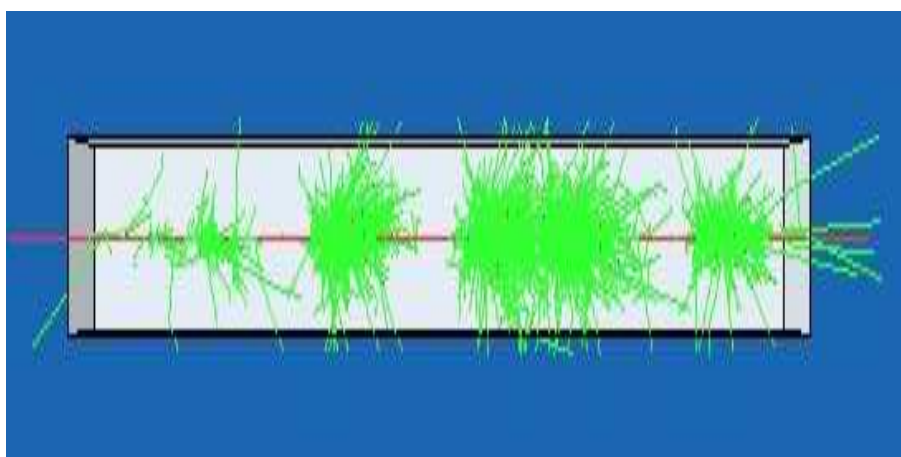


Figura 8: Simulación de un muón de 500GeV en un calorímetro de 1 m de  $Fe$

## 3.2. Estudio de las características de la cascada electromagnética

En este apartado se pretende realizar un estudio pormenorizado de algunas de las propiedades que presenta la cascada electromagnética, como son la influencia del  $Z$  del material en la generación de partículas secundarias, así como el orden de magnitud de producción de electrones respecto a positrones.

### 3.2.1. Dependencia del número de secundarios con la $Z$ del material

Se ha procedido a la simulación de 1000 (o 2500 en unos pocos casos) sucesos donde un  $e^-$  es emitido hacia el calorímetro con el fin de determinar el número de  $e^+$  y  $e^-$  secundarios generados en promedio. A su vez se ha variado el material de que está compuesto el calorímetro con el fin de estudiar la dependencia con el  $Z$  del material, en donde la energía crítica juega un papel fundamental en la extensión longitudinal de la cascada.

De los 1000 (o 2500) sucesos generados para cada material, se han realizado dos histogramas con las partículas secundarias generadas para cada uno de estos sucesos (uno para electrones y otro para positrones), viéndose que se distribuyen alrededor de un valor central. Estos valores se han ajustado a una gaussiana (una para cada histograma) y el centroide de éstas corresponde al valor medio de electrones y positrones generados en la cascada electromagnética respectivamente. A continuación se presentan las figuras<sup>1</sup> obtenidas donde puede verse el ajuste final realizado a partir de los resultados obtenidos en cada suceso.

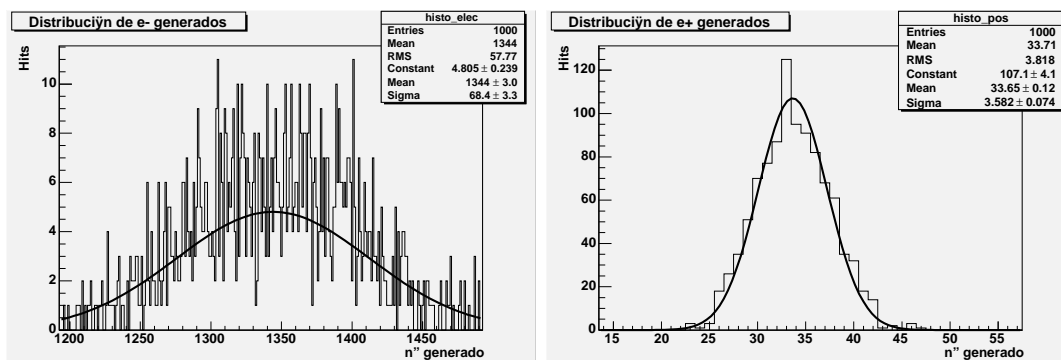


Figura 9: Distribución de los electrones (izda.) y positrones (drcha.) generados por 1 electrón de 1GeV en Cu ( $Z=29$ ). Se ha realizado la media tras 1000 eventos simulados

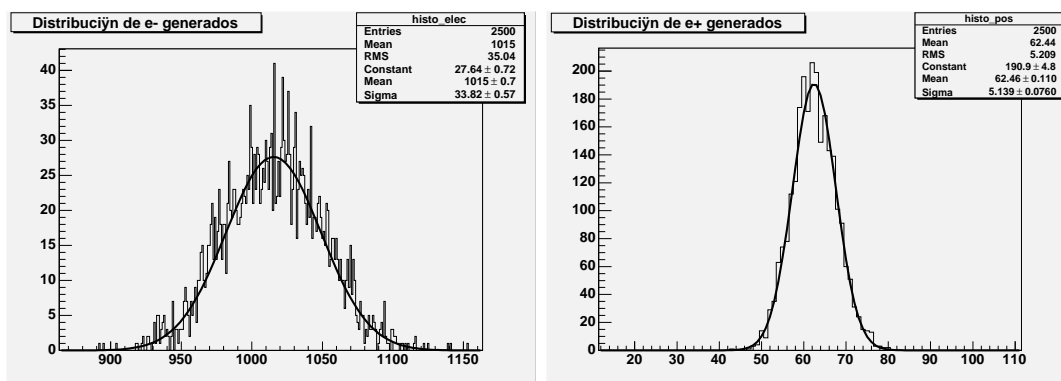


Figura 10: Distribución de los electrones (izda.) y positrones (drcha.) generados por 1 electrón de 1GeV en Pb ( $Z=82$ ). Se ha realizado el ajuste tras 2500 eventos simulados

Como puede concluirse a partir de la tabla 2, existe una clara dependencia con la  $Z$  del material. Cuanto mayor sea dicho valor, la cascada electromagnética se extiende longitudinalmente a mayor profundidad y por tanto, aumenta a su vez el número de partículas secundarias generadas. Esto es debido directamente a la energía crítica del material, para la cual, como anteriormente se ha señalado, se igualan las pérdidas por radiación a las de ionización. En los materiales de alto  $Z$  esta energía crítica es menor, con lo que para la misma energía de la partícula proyectil, ésta generará una cascada que se extenderá a mayores

<sup>1</sup>Se ha prescindido de mostrar todas las gráficas generadas. Las restantes están en el DVD con los datos

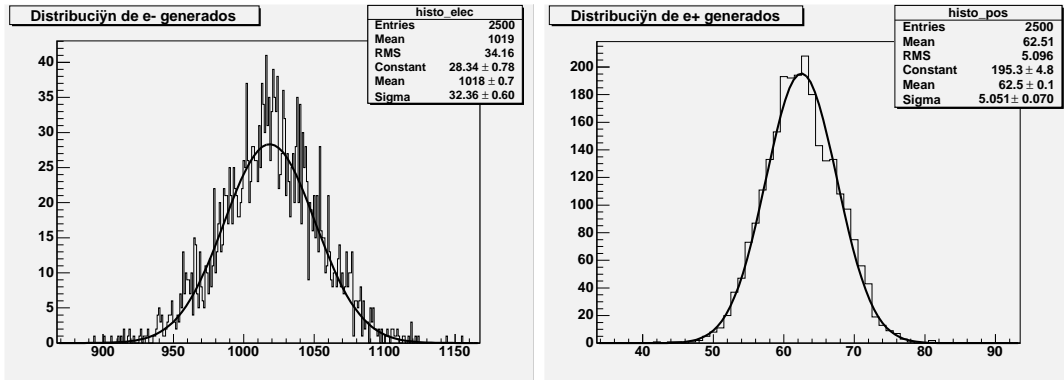


Figura 11: Distribuci3n de los electrones (izda.) y positrones (drcha.) generados por 1 electr3n de 1GeV en LiAr ( $Z=18$ ). Se ha realizado la media tras 2500 eventos simulados

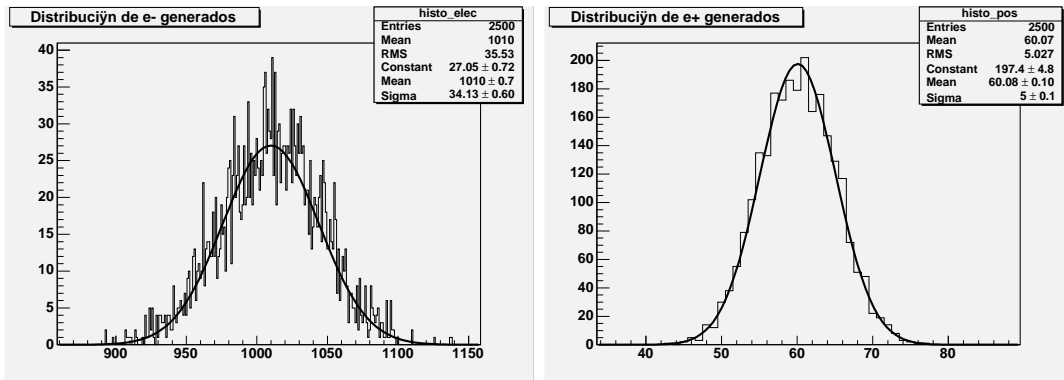


Figura 12: Distribuci3n de los electrones y positrones generados por 1 electr3n de 1GeV en 30 layers de Pb + LiAr con 3mm y 5 mm respectivamente. Se simularon 2500 eventos

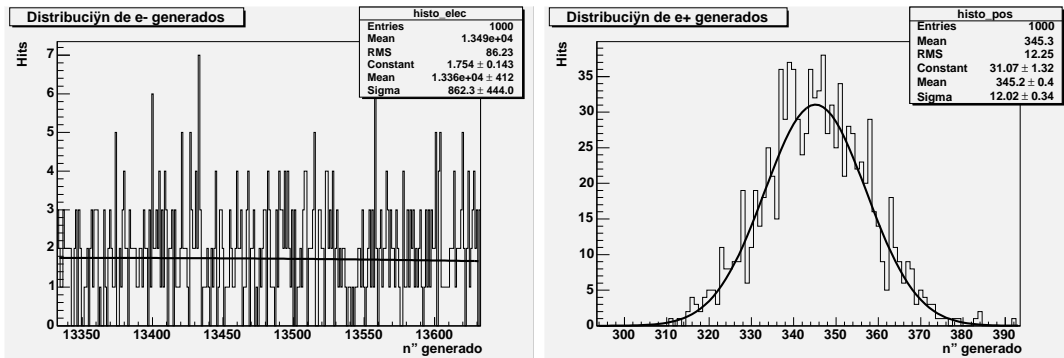


Figura 13: Distribuci3n de los electrones y positrones generados por 1 electr3n de 10GeV en Cu. 1000 eventos simulados

profundidades dentro del calor3metro hasta que se alcance la energ3a cr3tica ( $E < E_c$ ) y las p3rdidas comienzen a ser 3nicamente por ionizaci3n.

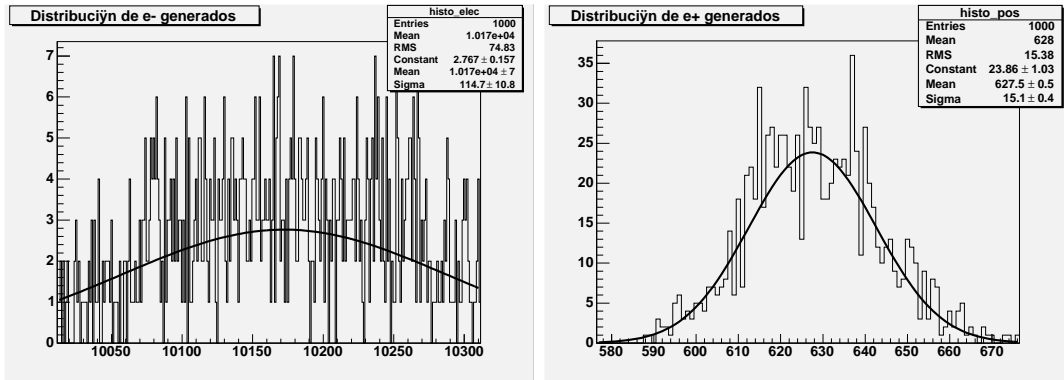


Figura 14: Distribuci3n de los electrones y positrones generados por 1 electr3n de 10GeV en Pb. 1000 eventos simulados

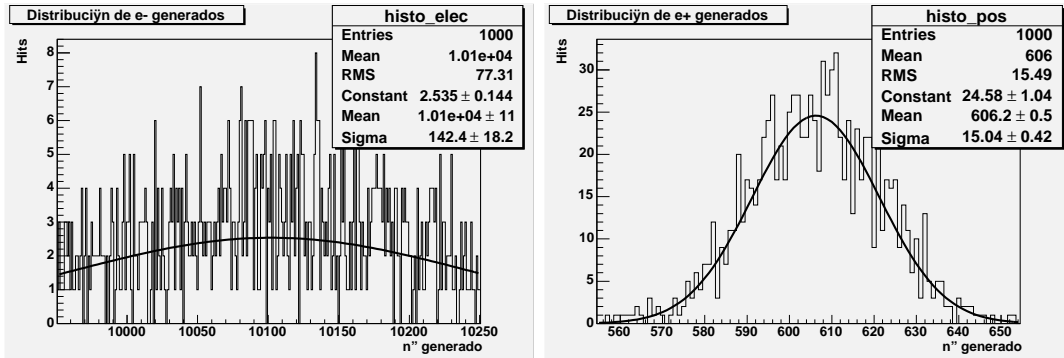


Figura 15: Distribuci3n de los electrones y positrones generados por 1 electr3n de 10GeV en 30 layers de Pb+LiAr con 3mm y 5mm respectivamente. 1000 eventos simulados

Part3cula		e <sup>-</sup>		e <sup>+</sup>	
Material	Z	1GeV	10GeV	1GeV	10GeV
Al	13	1294±6	13130±50	18.84±0.10	193.6±0.3
<i>liquid Ar</i>	18	1018.4±0.7	10236±9	62.50±0.10	630.2±0.6
Cu	29	1344±3	13400±400	33.65±0.12	345.2±0.4
Pb	82	1015.4±0.7	10172±7	62.46±0.11	627.5±0.5
Pb+ <i>liquid Ar</i>	-	1009.9±0.7	10102±11	60.08±0.10	606.2±0.5

Cuadro 2: N3mero de part3culas secundarias (electrones y positrones) generadas en la cascada dependiendo del material y la energ3a

### 3.2.2. Linealidad en el n3mero de positrones y electrones generados con la energ3a para un mismo material

Por otra parte, otra caracter3stica particular que puede observarse es la diferencia en el orden de magnitud de electrones y positrones generados como secundarios. Los positrones

son dos órdenes de magnitud menos numerosos ya que únicamente se producen cuando la producción de pares tiene lugar mientras que en contraposición, los electrones son también generados por efecto fotoeléctrico y Compton, siendo muy numerosos en la cola de la cascada debido a las energías que se tienen en esos momentos y que hacen a estos últimos procesos los dominantes. Nótese a su vez que en la emisión por *Bremmstrahlung* de fotones generados por un electrón primario, la mayor parte de ellos son soft (de baja energía) y son absorbidos por efecto fotoeléctrico o Compton no llegando a tener lugar la producción de pares que conlleva la generación de un positrón, siendo esto otra razón que justifica los resultados obtenidos. Estos pueden llegar incluso a escapar del volumen del calorímetro. No ocurre lo mismo con los fotones duros que producen rápidamente pares.

En la tabla 3 se muestran el número de electrones y positrones producidos en Pb en función de la energía del haz primario (un  $e^-$  en este caso).

Energía(GeV)	electrones	positrones	nº secundarios totales
1	1016.5±1.4	62.66±0.17	1736306
2.5	2545±3	156.8±0.3	4343608
5	5089±4	313.4±0.4	8692078
7.5	7628±8	470.6±0.5	13036616
10	10172±7	627.5±0.5	17378405
12.5	12717±9	783.8±0.6	21726562
15	15250±20	940.8±0.7	26056148

Cuadro 3: Número de partículas secundarias (electrones y positrones) generadas en la cascada para Pb para diferentes energías del haz primario.

Como puede observarse en la fig. 16, la generación de partículas secundarias (es decir, de  $e^-$ ,  $e^+$  y totales) es una función lineal con la energía, siendo el orden de magnitud de electrones dos veces superior al de positrones por las razones que se habían explicado anteriormente.

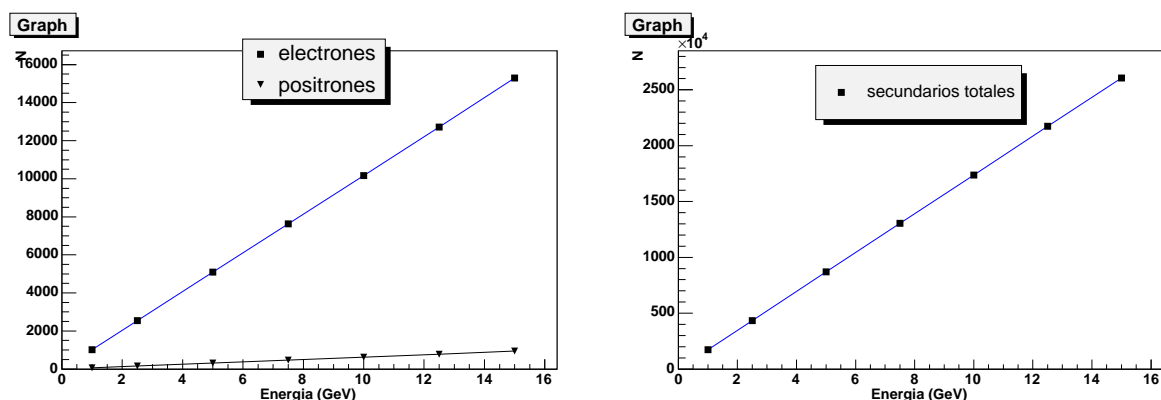


Figura 16: Secundarios generados en Pb en función de la energía.

Otro hecho a señalar es el aumento de secundarios con la energía del haz primario, ya que a mayor energía, a mayor profundidad se extenderá la cascada. Esto se estudiará en el siguiente apartado.

### 3.3. Desarrollo longitudinal de la cascada. Modelo de *Rossi-Heitler*

El modelo de *Rossi-heitler* ofrece una visión simplista del desarrollo del *shower*. En este apartado de la simulación, se pretende llevar a cabo una comprobación de este modelo, obteniendo una estimación por MonteCarlo de la profundidad a la cual se deposita la máxima energía de la cascada y comparándola con aquella que nos da el modelo. En principio la estimación MonteCarlo se acercará más a la realidad que el modelo ya que como se ha remarcado es un modelo sencillo.

Éste predice que tras  $t$  longitudes de radiación<sup>2</sup>, el número de partículas generadas es de  $N = 2^t$ , donde suponiendo un principio de equipartición, la energía de cada partícula será  $E = E_{incidente}/2^t$ . Este desarrollo de la cascada proseguirá y en  $t_{max}$  es donde la deposición de energía alcanza su máximo. Por tanto, la profundidad a la cual se deposita la máxima energía, según este modelo, vendrá dada por:

$$t_{max} = \ln\left(\frac{E_{incidente}}{\xi_c}\right)/\ln 2$$

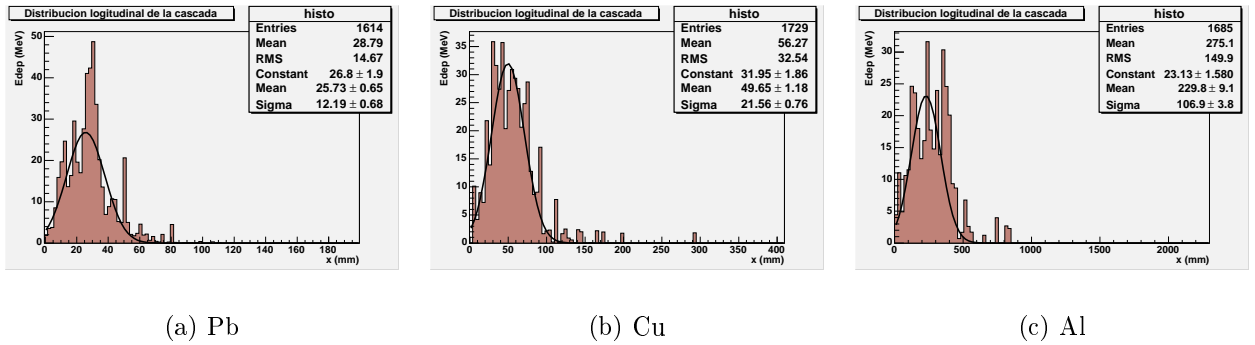


Figura 17: Ejemplos de representaciones de la deposición de energía en función de la profundidad,  $x$  (mm), para distintos materiales con  $e^-$  de 1GeV

Se ha analizado el desarrollo de la cascada en función de la profundidad para un mismo material (Pb) y diferentes energías con el fin de comprobar que efectivamente esta  $t_{max}$  crece con el  $\ln E$ . Para cada una de las energías de la partícula se han generado una gran cantidad de sucesos (1000 o 2500) con el fin de conseguir suficiente estadística y tener una

<sup>2</sup>La longitud de radiación,  $X_0$ , es la distancia a la cual una partícula ha depositado el 63.2% (es decir,  $1-(1/e)E_{incidente}$ ) de su energía por radiación de frenado, *Bremmstrahlung*

distribución gaussiana del valor de dicha  $t_{max}$ . En realidad lo que utilizamos es  $x$  que no es más que  $x = \frac{t}{X_0}$  medida en mm, con lo cual obtenemos  $x_{max}$ .

También se ha realizado el estudio de varios materiales y 2 energías, 1GeV y 10GeV, y se ha comparado el valor que nos proporciona el modelo de *Rossi-Heitler* y la simulación MonteCarlo. La fig. 17 muestra algunos ejemplos.

En las fig. 17 y 18 pueden verse las distribuciones de la deposición de la energía por *Bremmstrahlung* básicamente (excluimos la energía depositada por ionización en este análisis) en función de la profundidad,  $x$  (mm). Para cada suceso obtenemos un valor de  $x_{max}$  y lo almacenamos para luego analizar la distribución resultante y ajustarla a una gaussiana. Dicho ajuste nos da el valor buscado de  $x_{max}$  con su error estadístico.

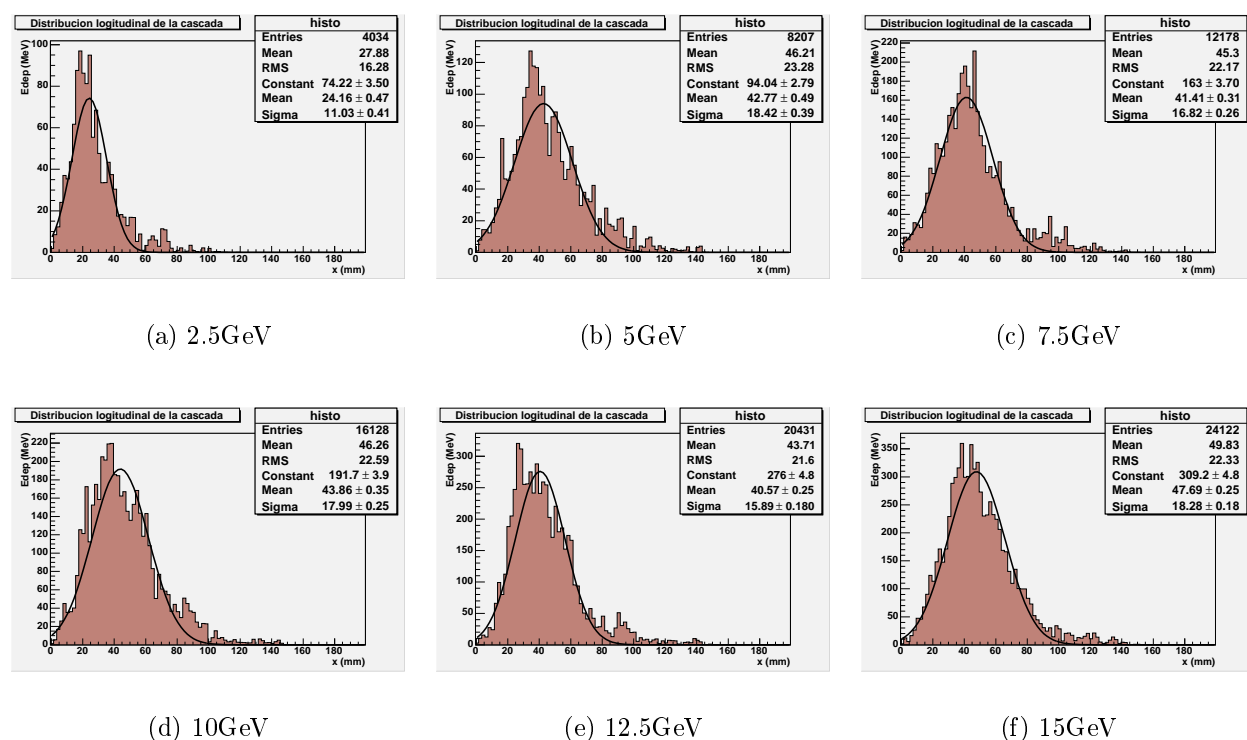


Figura 18: Ejemplos de representaciones de la deposición de energía en función de la profundidad,  $x$  (mm), para distintas energías en Pb

### 3.3.1. Máxima deposición de energía en función de la energía para un mismo material

Primero se ha hecho un estudio variando la energía para un material fijo, en este caso el Pb. La tabla 4 muestra los datos utilizados y los obtenidos. La fig. 19 muestra la relación entre ellas gráficamente.

Material: Pb (Z=82)	$x_{max}$ (mm)	
Energía (GeV)	Modelo RH	MonteCarlo
1	23.6	24.61±0.17
2.5	28.7	33.39±0.18
5	32.6	37.26±0.17
7.5	34.9	40.50±0.18
10	36.5	46.66±0.19
12.5	37.7	43.80±0.19
15	38.8	44.73±0.18

Cuadro 4: Comparación del modelo Rossi-Heitler con el método MonteCarlo

Como se comentó anteriormente se ha analizado el desarrollo de la cascada en función de la profundidad para un mismo material (Pb) y diferentes energías con el fin de comprobar que efectivamente esta  $x_{max}$  es proporcional a  $\ln E$ . En la fig. 19 se puede observar que es correcto afirmar que es proporcional. Hay que tener en cuenta que sólo se dispone de 1000 sucesos para cada energía y por lo tanto, los errores son relativamente grandes. Generando más sucesos se conseguiría mayor precisión.

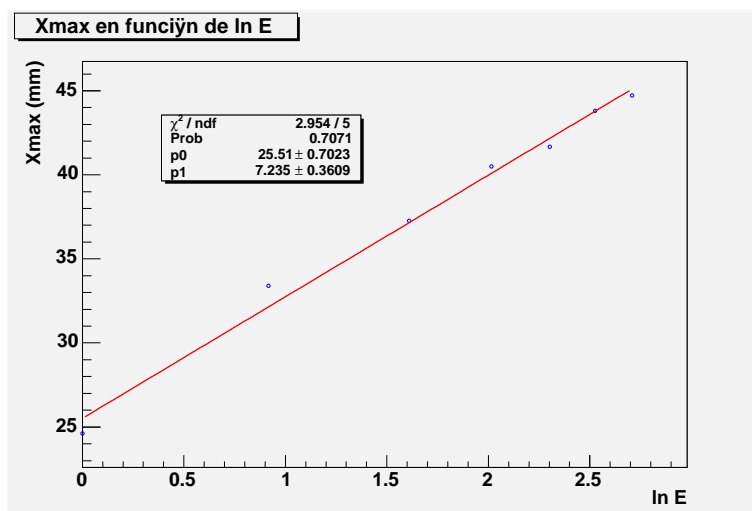


Figura 19: Se puede ver que la profundidad a la cual hay un máximo en la deposición de energía es proporcional al  $\ln E$ . El material utilizado es el Pb. Las energías y los valores de  $x_{max}$  pueden verse en la tabla 4

En la fig. 20 están representadas las curvas para las distintas energías. Se puede ver aquí también cómo aumenta tanto el valor de la deposición de energía como el valor de la profundidad a la cual está el máximo de dicha deposición de energía.

A la vista de los resultados cuantitativos obtenidos de la simulación MonteCarlo podemos decir que la simulación está bien conseguida.



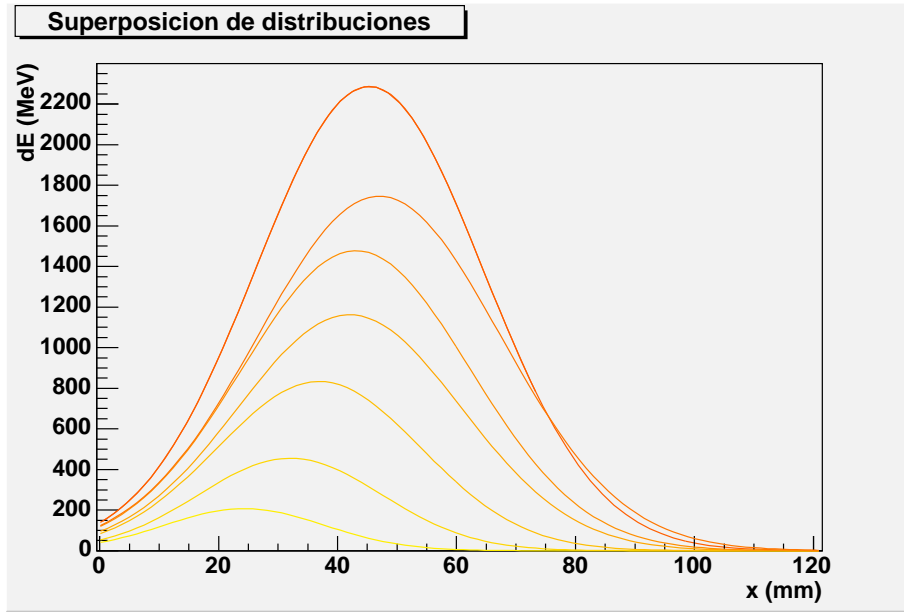


Figura 20: Aquí tenemos la superposición de las curvas, de la deposición de energía en función de la profundidad, para diferentes energías en Pb. La curva amarilla (de menor valor) corresponde a 1GeV y la roja (de mayor valor) a 15GeV. Los valores de las energías están en la tabla 4

### 3.3.2. Comparación cuantitativa del modelo y del MonteCarlo

Los resultados obtenidos para diferentes materiales se encuentran en la tabla 5 donde puede observarse la dependencia con la energía.

Energía	1GeV		10GeV	
Material	$x_{max}^{modeloRH}$ (mm)	$x_{max}^{MC}$ (mm)	$x_{max}^{modeloRH}$ (mm)	$x_{max}^{MC}$ (mm)
Al	218.4	$183.0 \pm 2.7$	423.3	$430.9 \pm 21.5$
Cu	46.0	$45.6 \pm 0.4$	79.0	$90.3 \pm 0.4$
Pb	23.6	$24.65 \pm 0.12$	36.5	$41.66 \pm 0.19$
<i>liquid Ar</i>	36.5	$26.32 \pm 0.11$	68.7	$42.03 \pm 0.20$
Pb+ <i>liquid Ar</i>	21.7	$34.85 \pm 0.19$	42.3	$68.6 \pm 0.5$

Cuadro 5: Comparación de la  $x_{max}$  determinada por métodos de MonteCarlo y aquella que predice el modelo de Rossi-Heitler

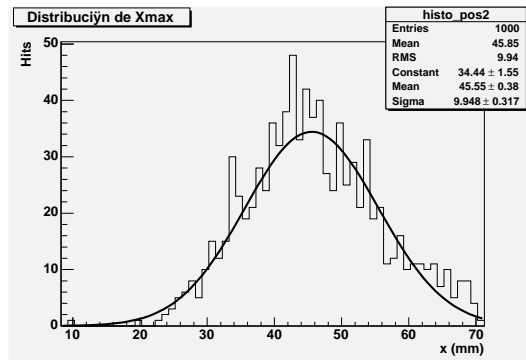


Figura 21: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 1GeV en Cu. 1000 sucesos generados.

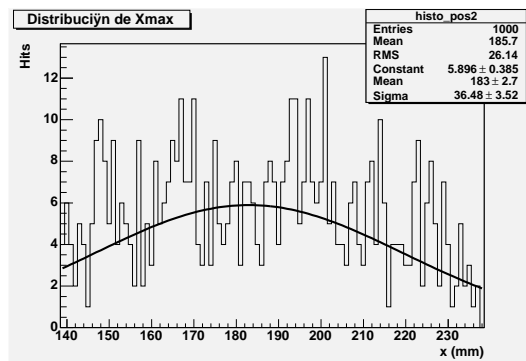


Figura 22: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 1GeV en Al. 1000 sucesos generados.

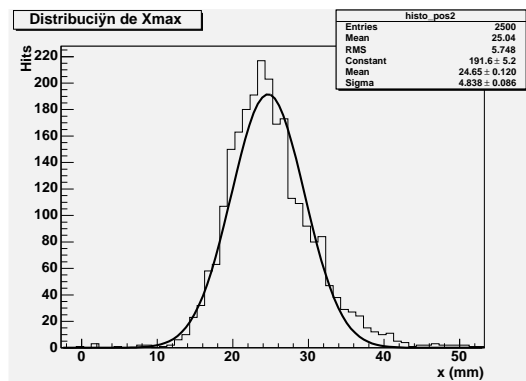


Figura 23: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 1GeV en Pb. 2500 sucesos generados.

Se observan algunas desviaciones en algunos casos con respecto a lo predicho por el modelo. Se ha de tener en cuenta que los valores obtenidos a partir de 3ste no resultan

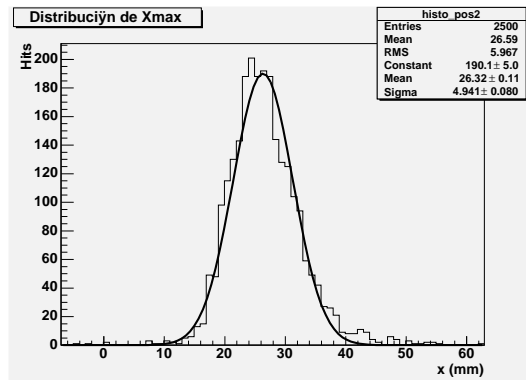


Figura 24: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 1GeV en *liquid Ar*. 1000 sucesos generados.

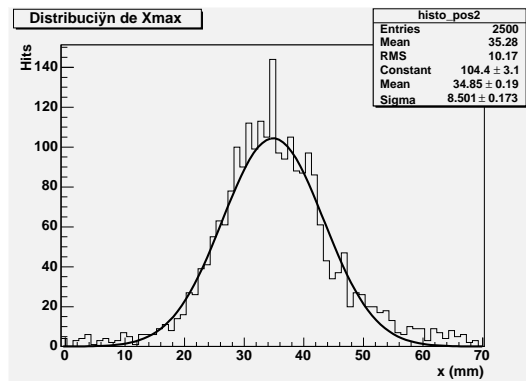


Figura 25: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 1GeV en Pb+*liquid Ar*. 1000 sucesos generados.

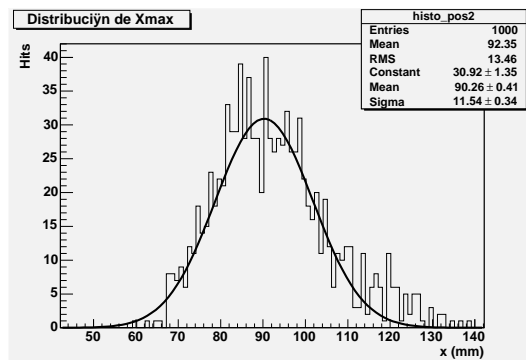


Figura 26: Energ3a depositada en funci3n de la profundidad en mm para electrones de 10GeV en Cu. 1000 sucesos generados

totalmente exactos, por lo que la simulaci3n por Montecarlo que se ha realizado permite obtener un valor m3s realista ya que tiene en cuenta todos los procesos e interacciones que

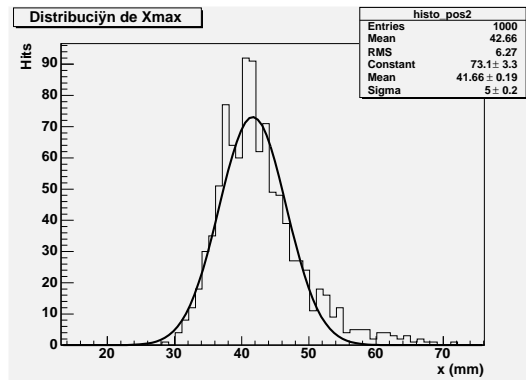


Figura 27: Distribuci3n de los electrones y positrones generados por 1 electr3n de 1GeV en *liquid Ar*. 2500 eventos simulados.

tienen lugar dentro del calor3metro.

### 3.4. Conclusiones

En este trabajo se ha intentado tratar alguno de los aspectos generales de los calor3metros electromagn3ticos realizando una simulaci3n con *Geant4* que permite realizar un estudio de 3stos utilizando t3cnicas MonteCarlo.

Se han pretendido estudiar aquellos detalles subrayados durante el curso de Doctorado con el fin de ahondar en mayor profundidad en 3stos y verificarlos mediante simulaci3n. Esto nos ha permitido trabajar de manera directa con *Geant4* que era a su vez uno de los objetivos de la asignatura.

El programa que se ha realizado y el gran n3mero de sucesos generados ha necesitado de un gran tiempo de computaci3n en la mayor3a de los casos estudiados (en total 6.7GB de datos), llegando incluso a durar un d3a entero alguna de las simulaciones presentadas en ser procesada y almacenada. Se han presentado s3lamente aquellos resultados que consider3bamos de mayor relevancia, pudi3ndose realizar una implementaci3n del programa para el estudio de casos m3s complejos.

## 4. Referencias

1. *Apuntes Ampliaci3n de Instrumentaci3n Nuclear*, curso 2003-2004, **E. Hig3n (UV)**
2. *Geant4 User's Guide, For Application Developers*, December 2003, **Varios**
3. *ROOT User's Guide 3.10*, December, 2003, **Ren3 Brun (CERN)**