Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Utilización del código Montecarlo – Penélope para la simulación de la interacción radiación - materia

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Carlos Luis GUZMÁN ACHALLMA

ASESOR

Dr. Raúl Félix CARITA MONTERO

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guzmán, C. (2018). *Utilización del código Montecarlo – Penélope para la simulación de la interacción radiación - materia*. [Monografía técnica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	CARLOS LUIS GUZMÁN ACHALLMA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70424550
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6382-8898
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	RAUL FELIX CARITA MONTERO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08385676
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6275-5554
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	LUIS ALBERTO BOLARTE CANALES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07900417
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	EDUARDO CUSTODIO CHUNG
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09069935
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Obligatorio. Indique el lugar o lugares y sus coordenadas en **grados decimales GD** donde ha sido realizada la investigación. La ubicación geográfica no está referida a su domicilio, en el caso que no precise un lugar donde se haya realizado la investigación coloque Universidad Nacional Mayor de San Marcos y sus coordenadas geográficas. Ejemplo: Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Latitud: -12.05819 Longitud: -77.01891
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 - 2018
URL de disciplinas OCDE	Física atómica, molecular y química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.03.01

UNMSM
Firmado digitalmente por JIMENEZ TINTAYA Cesar Omar FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.12.2022 08:02:02 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 16:00 horas del martes 31 de julio de 2018, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Luis Alberto Bolarte Canals (Presidente), Mg. Eduardo Custodio Chung (Miembro), y el Dr. Raúl Félix Carita Montero (Asesor), se dió inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Monografía Técnica para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M3 – Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

CARLOS LUIS GUZMÁN ACHALLMA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Carlos Luis Guzmán Achallma, a realizar una exposición del Trabajo de Monografía Técnica titulada: "Utilización del código Montecarlo – Penélope para la simulación de la interacción radiación - materia".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Asimismo, se verifico que el promedio obtenido por el bachiller en el VIII Ciclo de Actualización Profesional es de dieciséis (16).

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Luis Alberto Bolarte Canals, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

16	17	17
NOTA DEL VIII CAP	NOTA DE LA SUSTENTACIÓN DE LA MONOGRAFÍA	PROMEDIO

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al Consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Carlos Luis Guzmán Achallma En virtud de haber obtenido un promedio de...Diecisiete..... (17). Según el artículo 46° del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias Físicas. Siendo las .....Horas, se levanta la Sesión.

Mg. Luis Alberto Bolarte Canals
PRESIDENTE

Mg. Eduardo Custodio Chung
MIEMBRO

Dr. Raúl Félix Carita Montero
ASESOR

Dirección: Calle Germán Amézaga N.° 375 - Lima
Facultad de Ciencias Físicas
Apartado Postal: 14-0149 – Lima 14 Perú

Escuela Académico Profesional de Física
6197000 Anexo 3805
E-mail eapfis@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

CALIFICACIÓN DEL JURADO

BACHILLER: CARLOS LUIS GUZMÁN ACHALLMA

SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA

"Utilización del código Montecarlo - Penélope para la simulación de la interacción radiación - materia"

JURADO CALIFICADOR	NOTA	FIRMA
Mg. Luis Alberto Bolarte Canals PRESIDENTE	17	
Mg. Eduardo Custodio Chung MIEMBRO	17	
Dr. Raúl Félix Carita Montero ASESOR	17	
PROMEDIO	17	

HORA : 17:00 HORAS

FECHA : Martes 31 de julio de 2018

Dirección: Calle Germán Amézaga N.° 375 - Lima
Facultad de Ciencias Físicas
Apartado Postal: 14-0149 – Lima 14 Perú

Escuela Académico Profesional de Física
6197000 Anexo 3805
E-mail eapfis@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

1. Facultad: Ciencias Físicas
2. Escuela Profesional: Física
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad: Mg. Jiménez Tintaya, César Omar
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica: Mg. Jiménez Tintaya, César Omar
5. Operador del programa Informático de similitudes: Mg. Jiménez Tintaya, César
6. Documento evaluado: Tesis para optar el Título profesional de Licenciado en Física: "Utilización del código de Montecarlo – Penélope para la simulación de la interacción radiación – materia"
7. Autor del documento: Carlos Luis Guzmán Achallma.
8. Fecha de recepción del documento: 30/11/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 01/12/22
10. Software utilizado
    - Turnitin
11. Configuración del programa detector de similitudes
    - Excluye textos entrecomillados
    - Incluye Bibliografía
    - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes: 10% (diez por ciento)
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas
    - eprints.ucm.es < 3%
    - tesis.ipn.mx < 2%
    - hdl.handle.net < 2%
    - acceda.ulpgc.es < 2%
    - www.scribd.com < 1%
14. Observaciones: ninguna
15. Calificación de originalidad
    - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
16. Fecha del Informe: 01 de diciembre del 2022

UNMSM
Firmado digitalmente por JIMENEZ TINTAYA Cesar Omar FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 01.12.2022 17:11:04 -05:00

Firma del Evaluador

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que hicieron posible la realización de esta monografía.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO ii
CONTENIDO iii
LISTA DE TABLAS v
LISTA DE FIGURAS vi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS 2
2.1. OBJETIVO GENERAL 2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
2.2.1. Simular el cabezal de radioterapia utilizando el código Montecarlo – Penelope. 3
2.2.2. Simular los materiales que serán irradiados utilizando el código Montecarlo – Penelope. 3
2.2.3. Calcular la cantidad de dosis de radiación recibida en cada material en el proceso de radioterapia a través de la simulación. 3
CAPÍTULO 3: Fundamento Teórico 4
3.1. Interacción Radiación - Materia 5
3.1.1. Efecto Fotoeléctrico 6
3.1.2. Efecto Compton 7
3.1.3. Producción De Pares 7
3.1.4. Dispersión Rayleigh 8
3.2. Acelerador Lineal 9
3.3. Penelope 2003 11
3.3.1. Mecanismo del Código Penelope 13
3.3.1.1. Simulación de fotones en Penelope 15
3.3.1.2. Simulación de electrones y positrones en Penelope 15
3.3.2. Archivo y bases de datos de materiales 16
3.3.3. Rutinas del programa Penelope 16
3.3.4. Implementación del Programa Penelope 2003 25
3.3.4.1. Implementación de PENSLAB 32
3.3.4.2. Implementación de PENCYL 35

3.3.4.3. Implementación de PENDOSES....38
CAPÍTULO 4: Simulación de los rutinas del Programa Penelope....41
4.1. Simulación de PENSLAB....41
4.2. Simulación de PENCYL....45
4.3. Simulación de PENDOSES....48
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES....51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS....52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de las ecuaciones…….. 22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de electrones…….…….. 6
Figura 2. “Secciones eficaces” – Caso del hidrógeno..…….. 8
Figura 3. Principales componentes del cabezal de un acelerador lineal …….. 10
Figura 4. Estructura del código PENELOPE……. 12
Figura 5. Compilación del programa Penelope…… 14
Figura 6. Simulación del programa Penelope…… 14
Figura 7. Archivo de entrada “Penslab.in”…….. 17
Figura 8. Archivo de entrada “Pencyl.in”…….18
Figura 9. Archivo “Pendoses.geo”……... 21
Figura 10. Vista de un acelerador lineal considerando los materiales del archivo pendoses.geo desde el programa gview 2d…….. 23
Figura 11. Archivo de entrada “Pendoses.in”…… 24
Figura 12. Archivos zip del programa Penelope ……25
Figura 13. Carpeta fortran, gnuplot y el programa Penelope en el disco C……..26
Figura 14. Archivos de la carpeta Penelope…….. 27
Figura 15. Archivos de la carpeta examples……. 27
Figura 16. Ubicación: C:/g77/bin/g77.exe……. 28
Figura 17. Archivos de extensión F…… 29
Figura 18. Copiar los archivos de extensión F a la carpeta examples……. 29

Figura 19. Copiar los archivos gview2d, gwied3d, gviewc a la carpeta examples 30
Figura 20. Copiar los materiales a utilizar a la carpeta examples……. 31
Figura 21. Copiar el archivo wgnuplot.exe a la carpeta examples…… 32
Figura 22. Creación del archivo penslab.exe en el programa cmd…….. 33
Figura 23. Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77…….. 33
Figura 24. Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Penslab……. 34
Figura 25. Creación del archivo pencyl.exe……. 35
Figura 26. Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77…….. 36
Figura 27. Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Pencyl…….. 37
Figura 28. Creación del archivo pendoses.exe……. 38
Figura 29. Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77……... 39
Figura 30. Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Pendoses…….. 40
Figura 31. Simulación en Penslab……...42
Figura 32. Archivos de salida luego de la simulación en Penslab…… 43
Figura 33. Código en cmd para graficar los resultados de la simulación en PENSLAB
……44
Figura 34. Gráfica de dosis vs profundidad de la simulación en PENSLAB……. 44
Figura 35. Simulación en Pencyl……. 45
Figura 36. Archivos de salida luego de la simulación en Pencyl…… 46
Figura 37. Código en cmd para graficar los resultados de la simulación en PENCYL
……...47
Figura 38. Gráfica de dosis vs profundidad de la simulación en PENCYL…….. 48
Figura 39. Simulación en Pendoses…….. 49
Figura 40. Archivos de salida luego de la simulación en Pendoses…… 50

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En la actualidad para combatir el cáncer se utiliza la radioterapia, donde los tejidos que presentan el cáncer son irradiados, sin embargos se corre el riesgo que puedan afectar tejidos sanos; para reducir dicho riesgo es de muy importante implementar una adecuada planificación, presentándose la simulación como la principal alternativa. El programa PENELOPE 2003 mediante la utilización del código Montecarlo permite reproducir mediante la simulación, los modelos matemáticos las interacciones y trayectorias de las partículas a partir del conocimiento de las distribuciones de probabilidad de los procesos físicos implicados en la interacción radiación – materia. Es por ello que se quiere demostrar la utilidad del programa Penélope en el proceso de radioterapia simulando el cabezal del acelerador lineal de terapia, simulando los materiales característicos que serán irradiados, y calculando las dosis de radiación recibida en cada material en el proceso de radioterapia.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Demostrar la utilidad del programa Penelope 2003 en el proceso de Radioterapia mediante la interacción de la materia con las radiaciones ionizantes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1. Simular el cabezal de radioterapia utilizando el código Montecarlo – Penelope.

2.2.2. Simular los materiales que serán irradiados utilizando el código Montecarlo – Penelope.

2.2.3. Calcular la cantidad de dosis de radiación recibida en cada material en el proceso de radioterapia a través de la simulación.

CAPÍTULO 3: Fundamento Teórico

La radiación como energía puede moverse a través de ondas o partículas de un lugar a otro, además la radiación de alta energía, como los rayos X, puede modificar o destruir células, es por ello que la radioterapia se presenta como una de las principales alternativas para combatir el cáncer (Lamanna, y otros, 2012). Actualmente el cáncer es uno de los mayores problemas que afecta a la población debido a que cada año más personas sufren de este mal (OMS, 2012). Sin embargo a pesar de que año a año la ciencia avanza en sus descubrimientos, el cáncer actualmente es una de las mayores dificultades a las que se tiene que enfrentar la sociedad.

Actualmente se combate el cáncer de manera multidisciplinaria debido a la complejidad del mismo. Las tres principales técnicas terapéuticas para el éxito en el tratamiento del cáncer son: cirugía, quimioterapia y radioterapia. (Herranz, 2013). De ellos la radioterapia es la más importante en los casos donde los pacientes presentan una enfermedad localizada. Es por ello que casi la mitad de pacientes utiliza la radioterapia para su curación (Delaney, Jacob, Featherstone, & Barton, 2005).

Para combatir al cáncer, la radioterapia desde inicios del siglo XX ha evolucionado en paralelo con el desarrollo de la ciencia. Principalmente la radioterapia consiste en aplicar radiación ionizante sobre la materia maligna, de manera que las partículas emitidas puedan matar o impedir la reproducción celular maligna. (Jaffray, 2005).

3.1. Interacción Radiación - Materia

Cuando un haz de fotones atraviesa un medio, estos interaccionan con la materia produciéndose transferencia de energía. Las partículas que se encuentran cargadas, son puestas en movimiento para producir a su vez ionizaciones, excitaciones y radiaciones electromagnéticas en su trayectoria. Particularmente, los positrones se pueden también ionizar. De esta forma las partículas cargadas pasan su energía al medio a lo largo de su camino, y esta se convierte en dosis absorbida en el volumen irradiado. (Herranz, 2013).

La distribución de dosis se relaciona con los distintos procesos por medio de los cuales la energía en el medio es absorvida. Existen fundamentalmente cuatro procesos de interacción de los fotones con la materia en el rango clínico, los cuales son los siguientes: Dispersión Rayleigh, Absorción fotoeléctrica, Dispersión Compton, Producción de pares. (Attix, 1986).

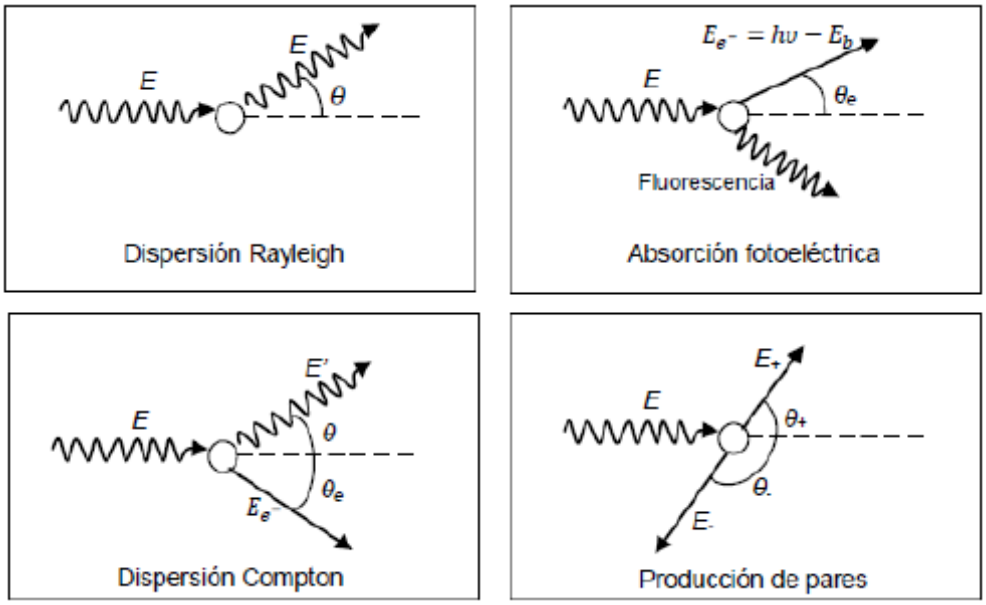


*Figura 1. I***nteracción de electrones**.
Fuente. (Salvat, Fernandez Varea, & Sempau, 2006)

3.1.1. Efecto Fotoeléctrico

Este proceso se desarrolla cuando un fotón es absorbido porque al presentar alta energía en la interacción con un electrón. El fotoelectrón, y el fotón incidente presentan una energía cinética similar luego de la interacción. En medios absorbentes que presentan un alto número atómico, el efecto fotoeléctrico tiene una mayor probabilidad y va disminuyendo la energía del fotón.

3.1.2. Efecto Compton

Este proceso se desarrolla con la interacción de un electrón libre con un fotón, esté entrega su energía al electrón y lo dispersa con una desviación angular, y en otra dirección se va dispersando el fotón. Este efecto se desarrolla mayormente en medios de bajo número atómico.

3.1.3. Producción De Pares

En este proceso el fotón interactúa con el campo electromagnético del núcleo y cede toda su energía en el proceso creando un par electrón - positrón. Ya que la masa en reposo del electrón es equivalente a 0,51 MeV, se requiere de una energía mínima de 1,02 MeV (umbral) para crear el par de cargas. Este proceso se ve favorecido por el aumento de la energía del fotón incidente (a partir del umbral) y de Z.

3.1.4. Dispersión Rayleigh

En este proceso el electrón interactúa con una de una onda electromagnética, la cual junto al electrón con la misma frecuencia vuelven a irradiar la energía.

De estos cuatro procesos mencionados, el efecto Compton es el más utilizado en los procedimientos de radioterapias con fines curativos (Figura 2).

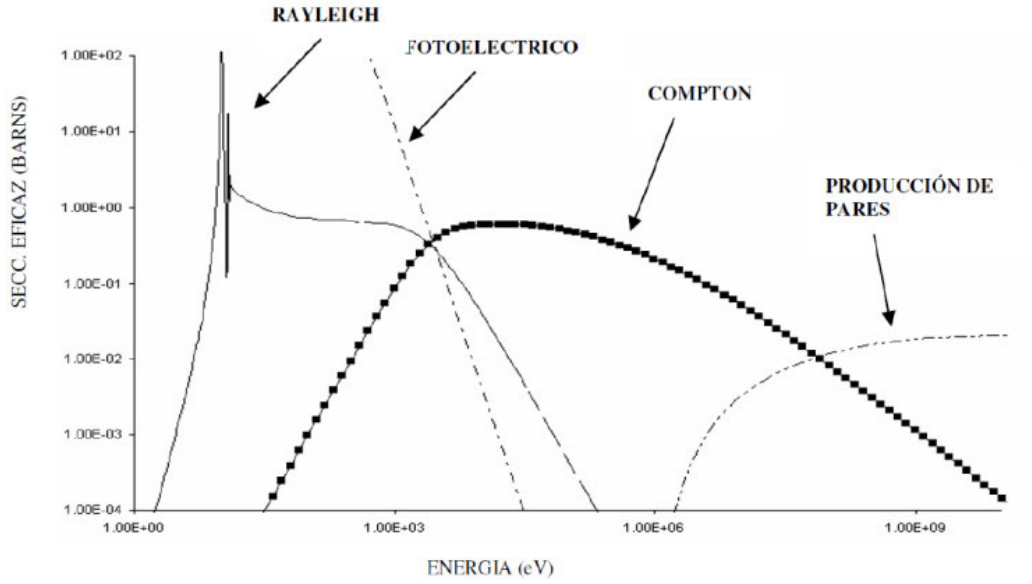


*Figura 2. "**Secciones eficaces" – Caso del hidrógeno**.*
Fuente. (Massa, 2008)

En el gráfico se muestra las secciones eficaces de los diferentes casos que ha interactuado los fotones para 1 eV hasta 1 GeV de energía. (Massa, 2008)

3.2. Acelerador Lineal

En radioterapia se utilizan los aceleradores lineales convencionales con el objetivo de generar fotones o un haz de electrones, la radiación que produce este acelerador que presenta una energía alta y forma un espectro que presenta poca energía en keV hasta decenas de MeV de acuerdo al tipo de acelerador lineal.

Un acelerador lineal permite que los electrones se aceleren entre dos electrodos. Con rangos de energías cinéticas de 4 a 25 MeV son acelerados los electrones, siguiendo un camino lineal a través de campos no conservativos de radiofrecuencias de microondas, dentro de una estructura especial al vacío llamada guía aceleradora. (Khan, 2003)

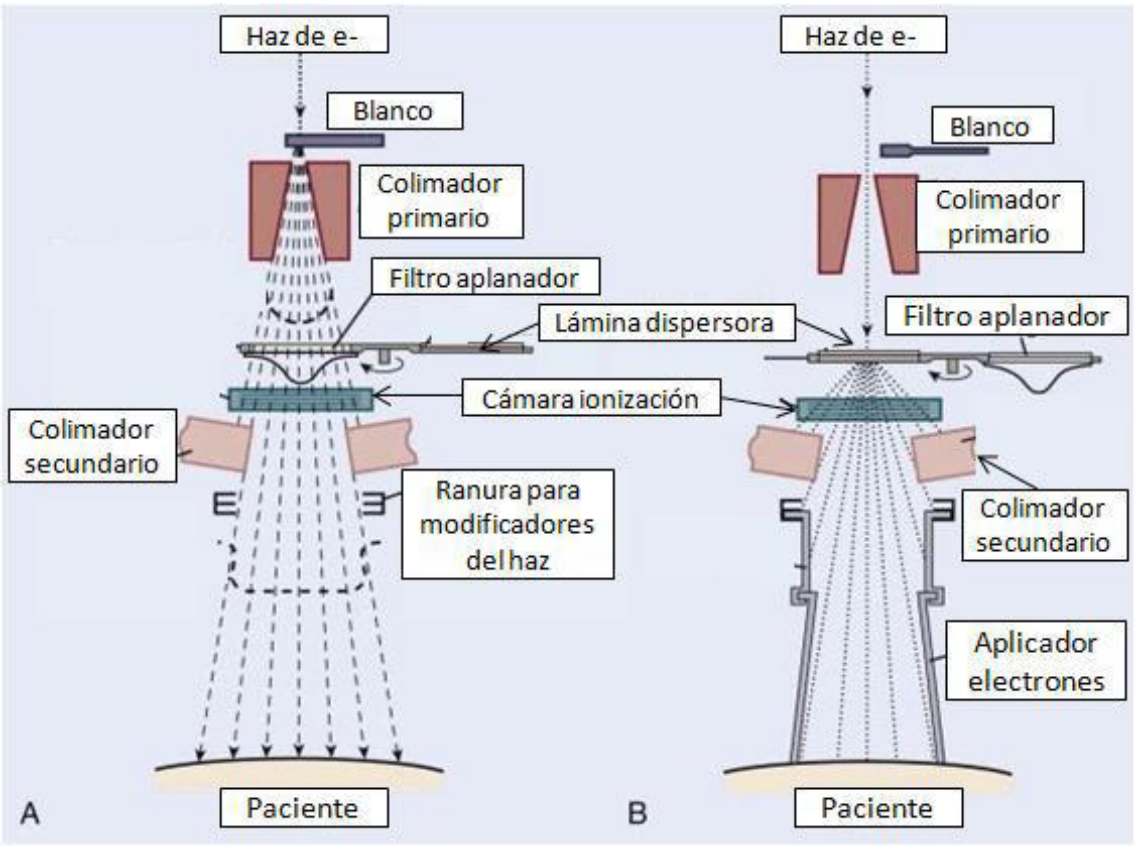


Figura 3. **Principales componentes del cabezal de un acelerador lineal**
Fuente. (Khan, 2003)

3.3. Penelope 2003

PENELOPE es un código Monte Carlo diseñado para la simulación del transporte e interacción de fotones, electrones y positrones de energías entre 100 eV y 1 GeV. Está escrito en lenguaje Fortran 77. El código penelope es un software que permite la simulación del transporte de fotones, electrones y positrones en un medio arbitrario mediante el método de Monte Carlo, y en un amplio rango de energías de la radiación (Salvat, Fernandez Varea, & Sempau, 2006).

PENELOPE realiza la simulación de Monte Carlo del transporte de fotones electrónicos acoplados en materiales arbitrarios y geometrías cuádricas complejas. Se utiliza un procedimiento mixto para simular interacciones de electrones y positrones (dispersión elástica, dispersión inelástica y emisión bremsstrahlung), en el que se simulan eventos "hard" (es decir, aquellos con ángulo de deflexión y / o pérdida de energía mayores que los límites preseleccionados). de una manera detallada, mientras que las interacciones "soft" se calculan a partir de enfoques de dispersión múltiple. Las interacciones de fotones (dispersión de Rayleigh, dispersión de Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares electrón-positrón) y la aniquilación de positrones se simulan de forma detallada. (Nuclear Energy Agency, 2015)

El paquete de distribución del código PENELOPE presenta una estructura esquematizada y su contenido está distribuido de la siguiente manera:

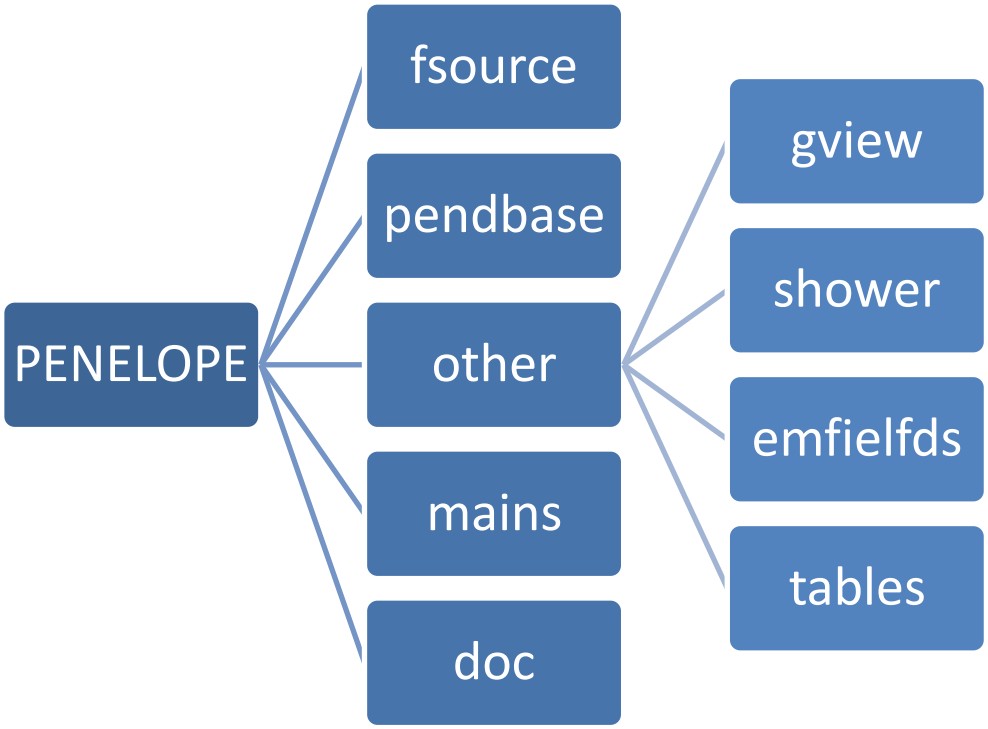


Figura 4. ***Estructura del código PENELOPE****.*
Fuente. (Salvat, Fernandez Varea, & Sempau, 2006)

3.3.1. Mecanismo del Código Penelope

Lo medular de la simulación se realiza a través de subrutinas que posee “PENELOPE” mediante ello se desarrolla la simulación de haces de electrones y fotones, estás son conceptuadas como reproducciones de las materias reales.. PENELOPE simula la radiación fluorescente que resulta de las vacancias producidas en las capa K y la sub-capa L por absorción fotoeléctrica y dispersión Compton de fotones y por impacto electrón/positrón. La relajación de estas vacancias alcanza hasta que las capas K y L son llenadas, esto es hasta que las vacancias han migrado a M y otras capas más externas.

PENELOPE necesita que el usuario edite el programa MAIN ya que es un paquete de sub-rutina para que de esta manera se realice la coordinación para la simulación con una finalidad determinada. Los archivos en letras mayúsculas forman parte del paquete PENELOPE y los que están en letra minúscula deben ser usados o creados por el usuario. El archivo main.exe necesita de la información de entrada contenida en los archivos emph entrada.in, geometria.geo y material.mat, para que la simulación ocurra y sea creado el archivo de salida salida.dat.

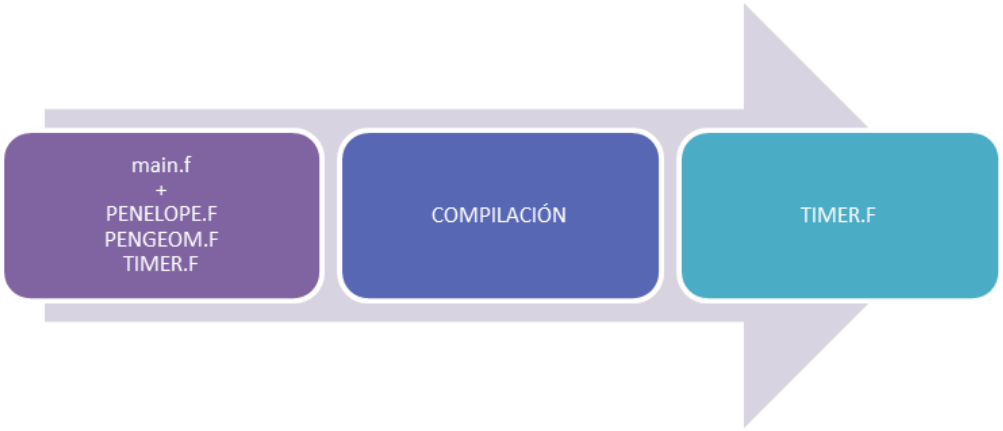


Figura 5. **Compilación del programa Penelope**.
Fuente. Elaboración Propia

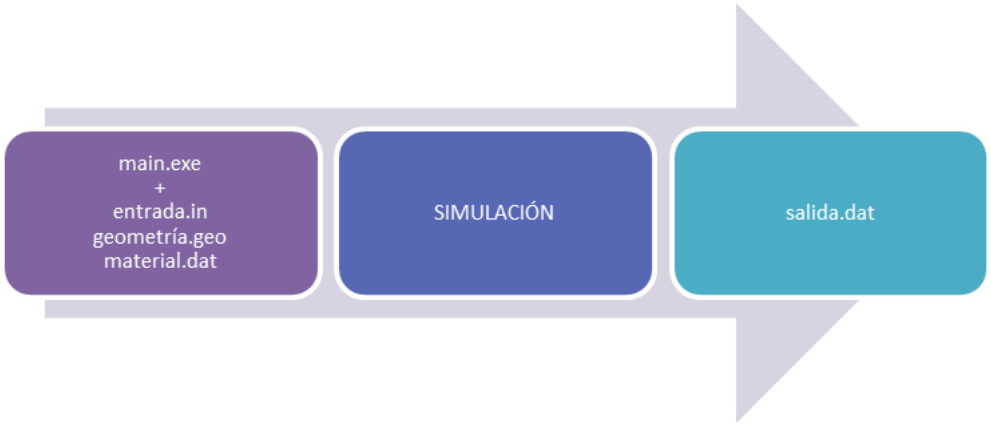


Figura 6. **Simulación del programa Penelope**.
Fuente. Elaboración Propia

3.3.1.1. Simulación de fotones en Penelope

- Scattering coherente (Rayleigh)
- Scattering incoherente (Compton)
- Absorción fotoeléctrica
- Producción de pares
- Interacción delta

3.3.1.2. Simulación de electrones y positrones en Penelope

- Aniquilación (solo para positrones)
- Ionización de capas internas
- Dispersión inelástica fuerte ($\theta > \theta c$)
- Interacción delta
- Dispersión elástica fuerte ($\theta > \theta c$)
- Emisión por Bremsstrahlung
- Interacción artificial débil ($\theta < \theta c$)

3.3.2. Archivo y bases de datos de materiales

PENELOPE presenta toda la información que se necesita sobre las cantidades de interés para cada material, mediante el archivo de datos de materiales. Este archivo es creado por medio del programa auxiliar MATERIAL, que extrae los datos de interacción atómica de la base de datos. Existe un conjunto de 279 materiales en el programa MATERIAL, el cual toma la información de manera directa desde el archivo PSCOMPOST.TAB (Salvat, Fernandez Varea, & Sempau, 2006).

3.3.3. Rutinas del programa Penelope

En PENELOPE hay tres rutinas: cada uno es PENSLAB para simulación con geometría básica en forma lineal, PENCYL para simulación con geometría de base cilíndrica y PENDOSE para simulación con una geometría compleja geométrica cuadriculada definida.

3.3.3.1. PENSLAB

En la rutina PENSLAB, la geometría del sistema es lineal, por lo que los parámetros de geometría que necesitan definirse solo en grosor. En el archivo de entrada "penslab.in"

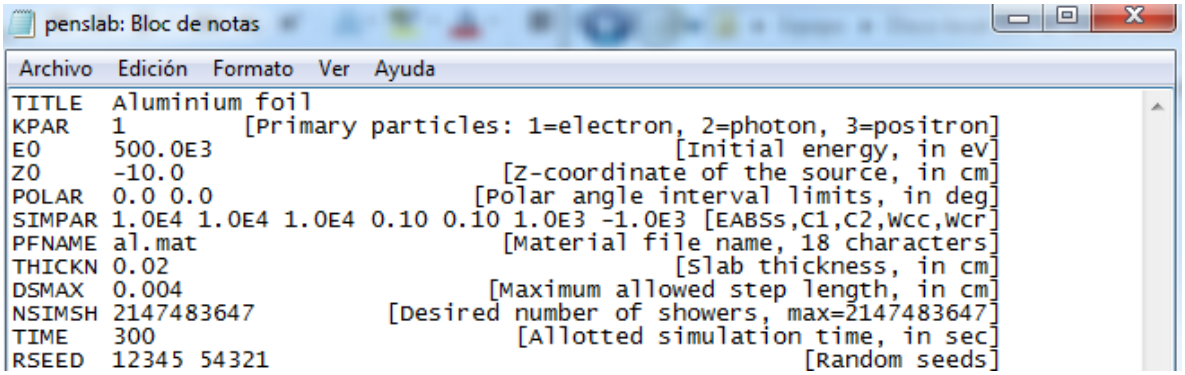


Figura 7. **Archivo de entrada "Penslab.in"**.
Fuente. Elaboración Propia

En la sección TITLE, le asignamos un título a la simulación, en la sección KPAR, escogemos el tipo de partícula primaria a trabajar con los siguientes códigos (1=electrón, 2=photon, 3=positrón), en la sección E0 definimos la energía inicial de la fuente, en la sección PFNAME seleccionamos el nombre del archivo del material con el que vamos a trabajar, y en la sección THICKN definimos el espesor lineal con valor en centímetros, después de la palabra clave THICKN, en la sección TIME le asignamos el tiempo de la simulación.

3.3.3.2. PENCYL

En la rutina PENCYL, la geometría básica del sistema es cilíndrica, por lo que debe definirse alta, POSICIÓN, el radio exterior y el radio en el cilindro. Como en los parámetros de geometría de rutina PENSLAB, PENCYL se define en el archivo de entrada llamado “pencyl.in”

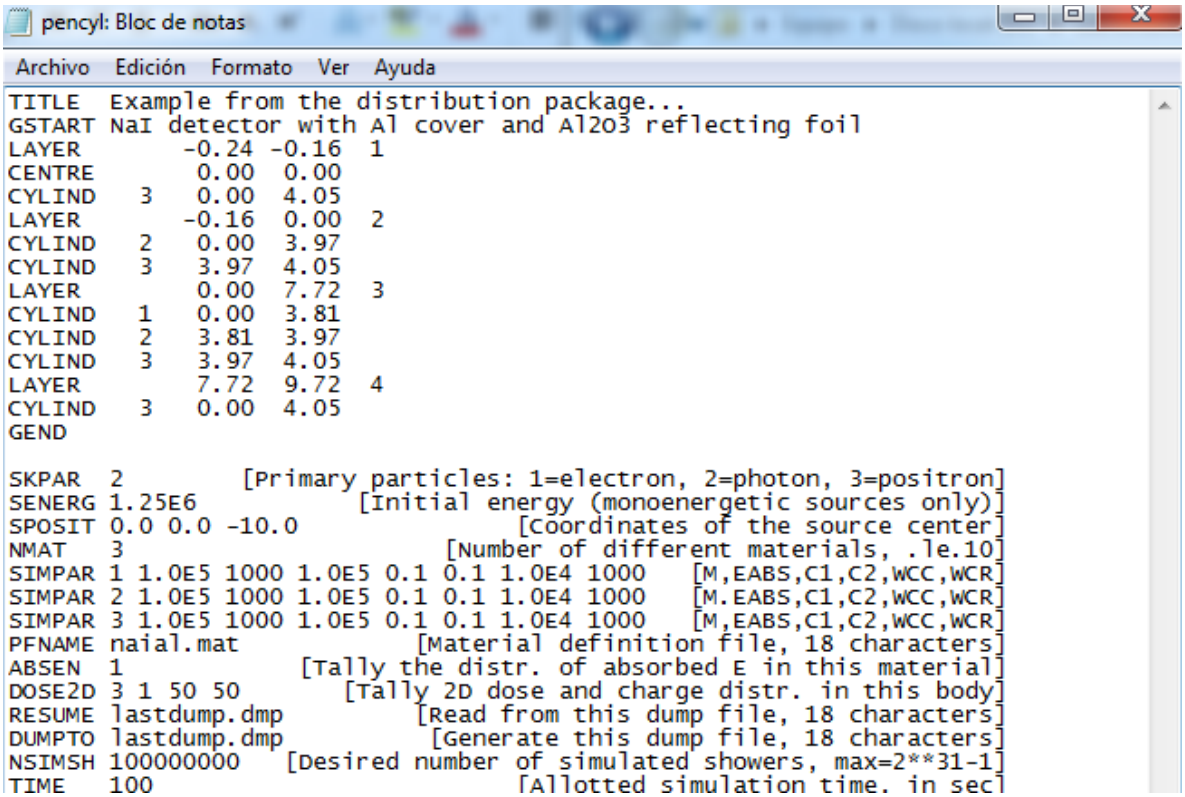


Figura 8. **Archivo de entrada “Pencyl.in”**.
Fuente. Elaboración Propia

En la sección TITLE, le asignamos un título a la simulación, entre palabras Claves GSTAR y GEND definimos la geometría del cilindro a través de la posición geométrica donde se encuentren; la siguiente línea es la palabra clave LAYER, en esta línea contiene el límite inferior y el borde superior del cilindro en coordenadas z. Después de eso es la palabra clave CENTER, que define la ubicación de los cilindros en coordenadas xy. Luego, la palabra clave CILIND, que contiene la definición del radio interior y el radio exterior del cilindro. Cuando la estructura de geometría está compuesta más de una capa, entonces cada capa se define como el orden y la secuencia anterior la capa debe definirse en orden inverso comenzando desde la capa inferior; en la sección SKPAR, escogemos el tipo de partícula primaria a trabajar con los siguientes códigos (1=electrón, 2=photon, 3=positrón), en la sección SENERG definimos la energía inicial de la fuente, en la sección PFNAME seleccionamos el nombre del archivo del material con el que vamos a trabajar, en la sección TIME le asignamos el tiempo de la simulación.

3.3.3.3. PENDOSES

Para la rutina PENDOSES primero debemos de definir la geometría en el archivo “PENDOSES.geo”.

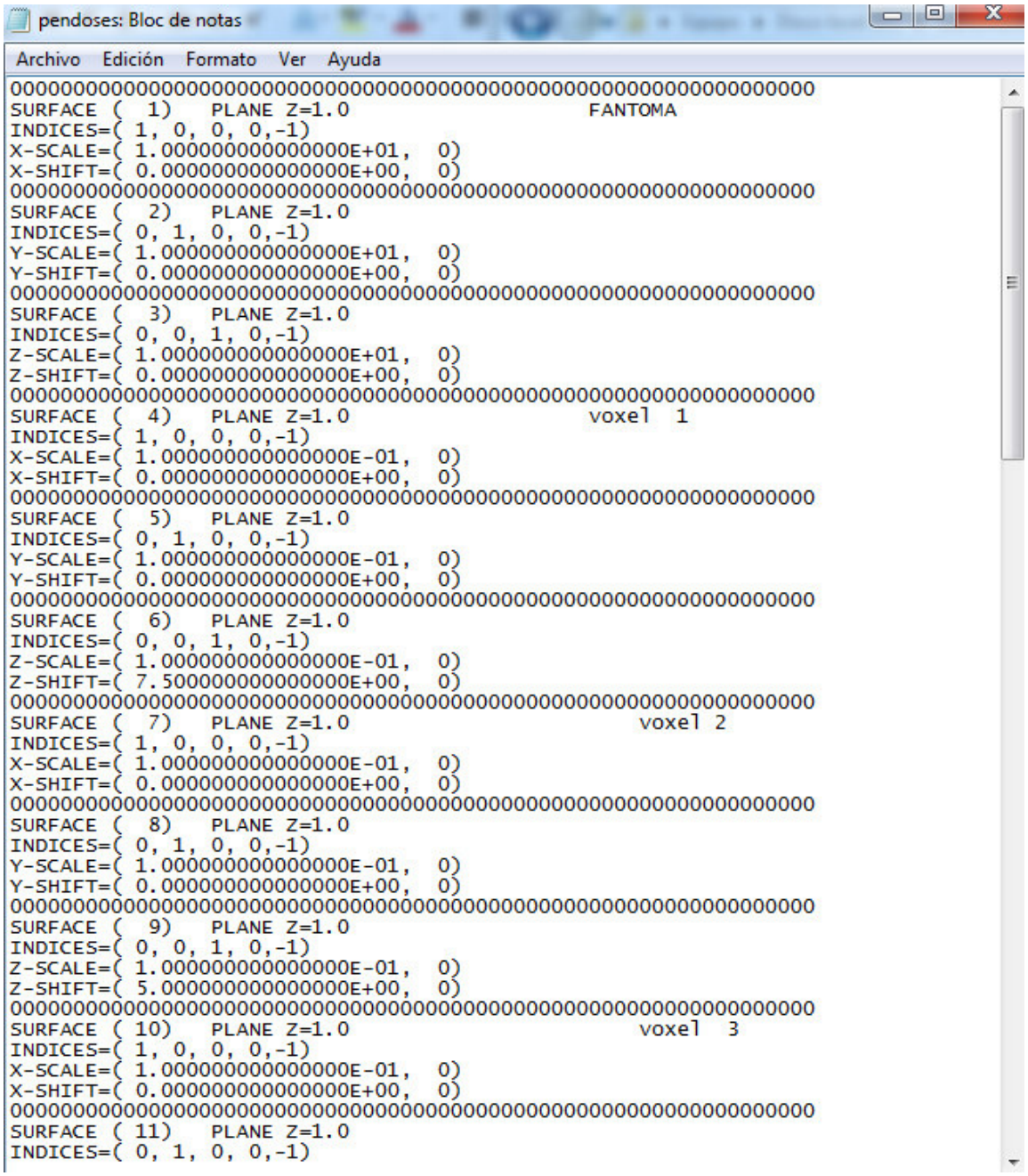


Figura 9. **Archivo "Pendoses.geo"**.
Fuente. Elaboración Propia

La geometría se define mediante códigos como se puede apreciar en la figura. Estas geometrías complejas se arreglan combinando varias superficies definidas por la ecuación cuadrática:

$$f(x,y,z) = I_1x^2 + I_2y^2 + I_3z^2 + I_4z + I_5$$

Escribiendo las ecuaciones en el archivo de geometría hecho usando coeficientes geometría en la Tabla 1. En la simulación usando la rutina PENDOSES usada cilindro.

Tabla 1. Coeficiente de las ecuaciones.

ECUACIÓN	COEFICIENTE	FORMA
$z - 1 = 0$	0 0 0 1 -1	Plano
$z^2 - 1 = 0$	0 0 1 0 -1	Par de planos paralelos
$x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0$	1 1 1 0 -1	Esfera
$x^2 + y^2 - 1 = 0$	1 1 0 0 -1	Cilindro
$x^2 - y^2 - 1 = 0$	1 -1 0 0 -1	Cilindro hiperbólico
$x^2 - y^2 - z^2 = 0$	1 1 -1 0 0	Cono
$x^2 + y^2 - z^2 - 1 = 0$	1 1 -1 0 -1	Hoja hiperbólica
$x^2 + y^2 - z^2 + 1 = 0$	1 1 -1 0 1	Dos hojas hiperbólica
$x^2 + y^2 - z^2 = 0$	1 1 0 -1 0	Paraboloide
$x^2 - z = 0$	1 0 0 -1 0	Cilindro parabólico
$x^2 - y^2 - z = 0$	1 -1 0 -1 0	Paraboloide hiperbólico

FUENTE: (Salvat, Fernandez Varea, & Sempau, 2006)

Como programa de ayuda en el paquete de instalación, el programa proporcionado por PENELOPE, gview2d para mostrar el código de archivo de geometría bidimensional y gview3d puede producir una vista tridimensional de los archivos de geometría.

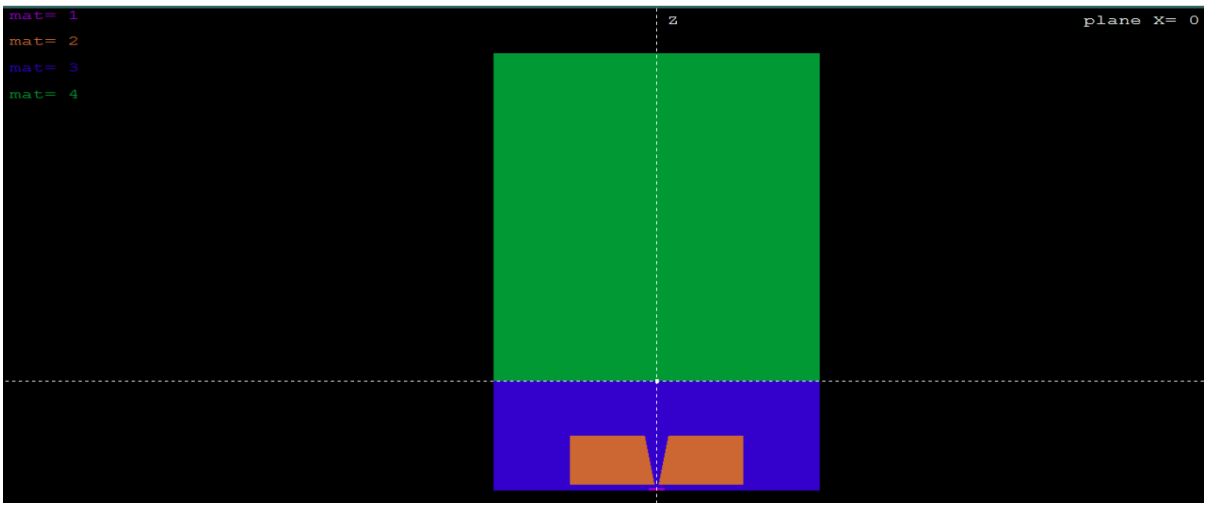


Figura 10. **Vista de un acelerador lineal considerando los materiales del archivo pendoses.geo desde el programa gview 2d**.
Fuente. Elaboración Propia

Como se puede observar en la leyenda de la imagen, la geometría consta de 4 materiales, el material 1 es el tungsteno, el material 2 es el coalimador de cobre, el material 3 se considera al aire, el material 4 se considera al agua.

Una vez definida la geometría, PENDOSES se define en el archivo de entrada llamado “pendoses.in”

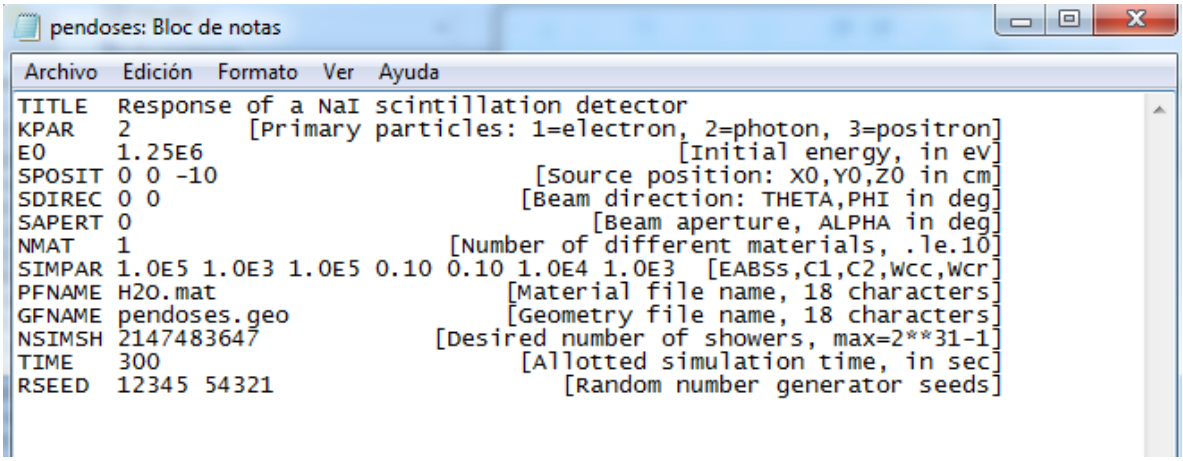


Figura 11. **Archivo de entrada “Pendoses.in”**.
Fuente. Elaboración Propia

En la sección TITLE, le asignamos un título a la simulación; en la sección KPAR, escogemos el tipo de partícula primaria a trabajar con los siguientes códigos (1=electrón, 2=photon, 3=positrón), en la sección E0 definimos la energía inicial de la fuente, en la sección SPOSIT definimos la posición en donde se encontrará la fuente, en la sección SAPERT se define el ángulo de apertura del haz de la fuente, en la sección PFNAME seleccionamos el nombre del archivo del material con el que vamos a trabajar, en la sección GFNAME seleccionamos el archivo donde se encuentra la geometría compleja que hemos definido, en la sección TIME le asignamos el tiempo de la simulación.

3.3.4. Implementación del Programa Penelope 2003

El programa penelope por defecto viene zipeado junto al programa gnuplot

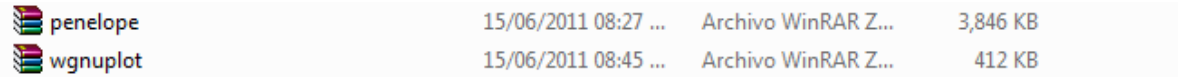


Figura 12. **Archivos zip del programa Penelope**
Fuente. Elaboración Propia

Se debe descomprimir dichos archivos y a su vez tener disponible el programa g77

Copiar en el disco C; las carpetas: Penelope (que contiene el programa), Gnuplot (para la gráfica de datos), G77 (Fortran)

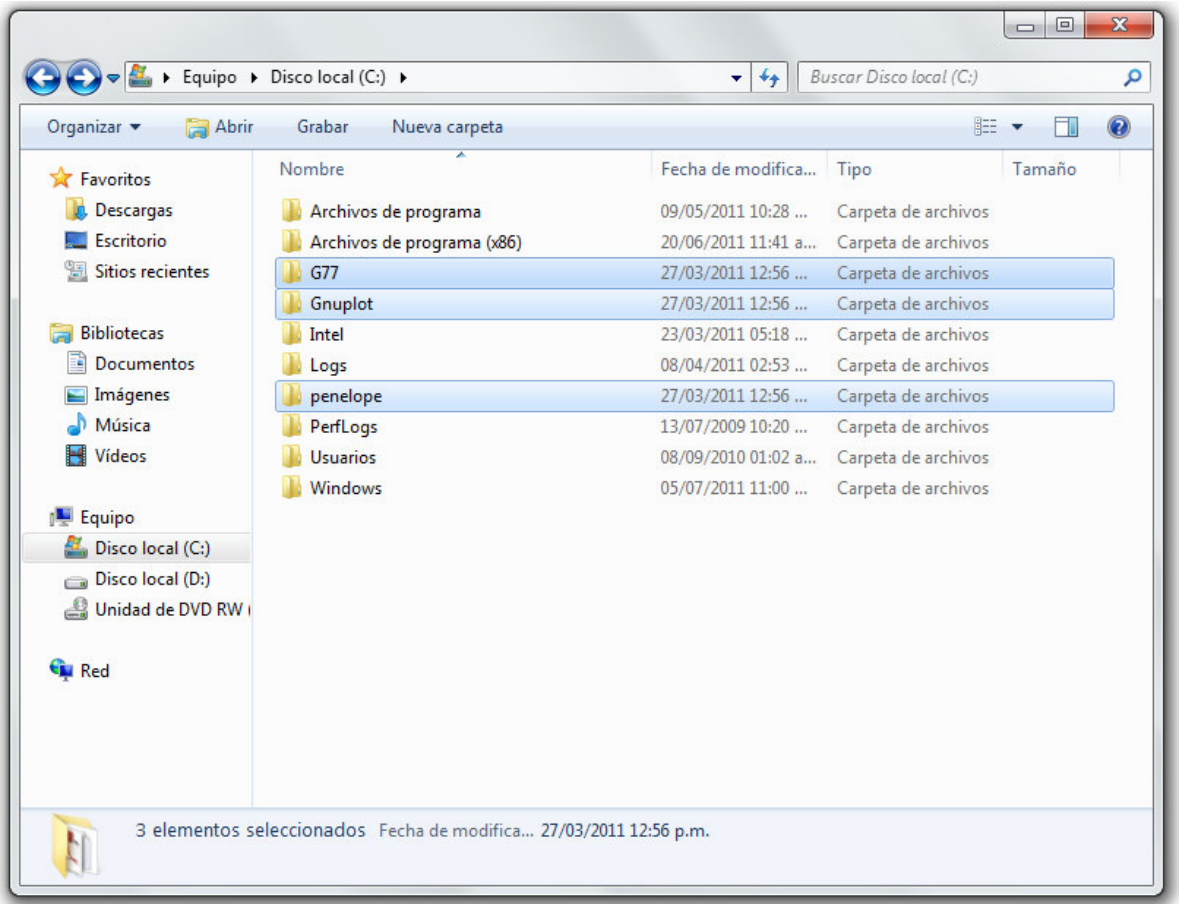


Figura 13. **Carpeta fortran, gnuplot y el programa Penelope en el disco C**
Fuente. Elaboración Propia

La carpeta Penelope contiene las siguientes carpetas: examples, fsource, other, pendbase; y los siguientes archivos, manual.pdf, NEA-1525_008, tutorial.pdf

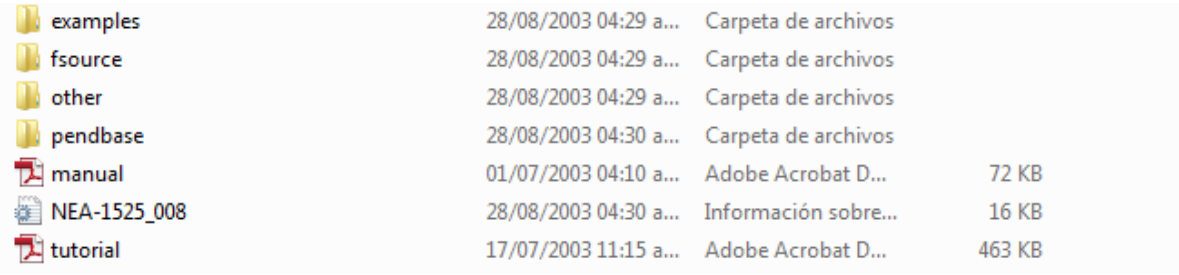


Figura 14. **Archivos de la carpeta Penelope**
Fuente. Elaboración Propia

En carpeta llamada examples en la carpeta Penelope, contiene por defecto el archivo al (el cual representa el material del elemento químico aluminio), el archivo naial (representa el material del compuesto químico NaIAl), el archivo Pencyl.in (el cual es el archivo de entrada para la simulación pencyl), pendoses.geo (archivo mediante el cual se define la geometría a trabajar), pendoses.in (archivo de entrada para la simulación pendoses), penslab.in (archivo de entrada para la simulación penslab); en esta carpeta trabajaremos la simulación según sea el caso:

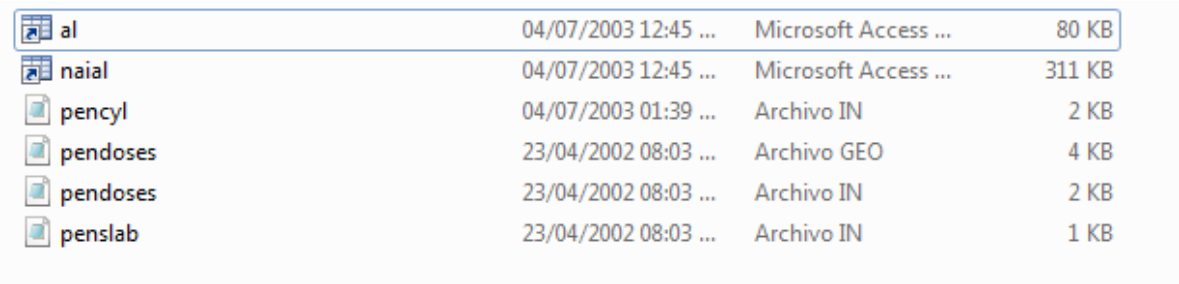


Figura 15. **Archivos de la carpeta examples**
Fuente. Elaboración Propia

Copiar el archivo g77.exe que se encuentra en la carpeta bin, la cual se encuentra en la carpeta g77; ubicación C:/g77/bin hacia la carpeta examples

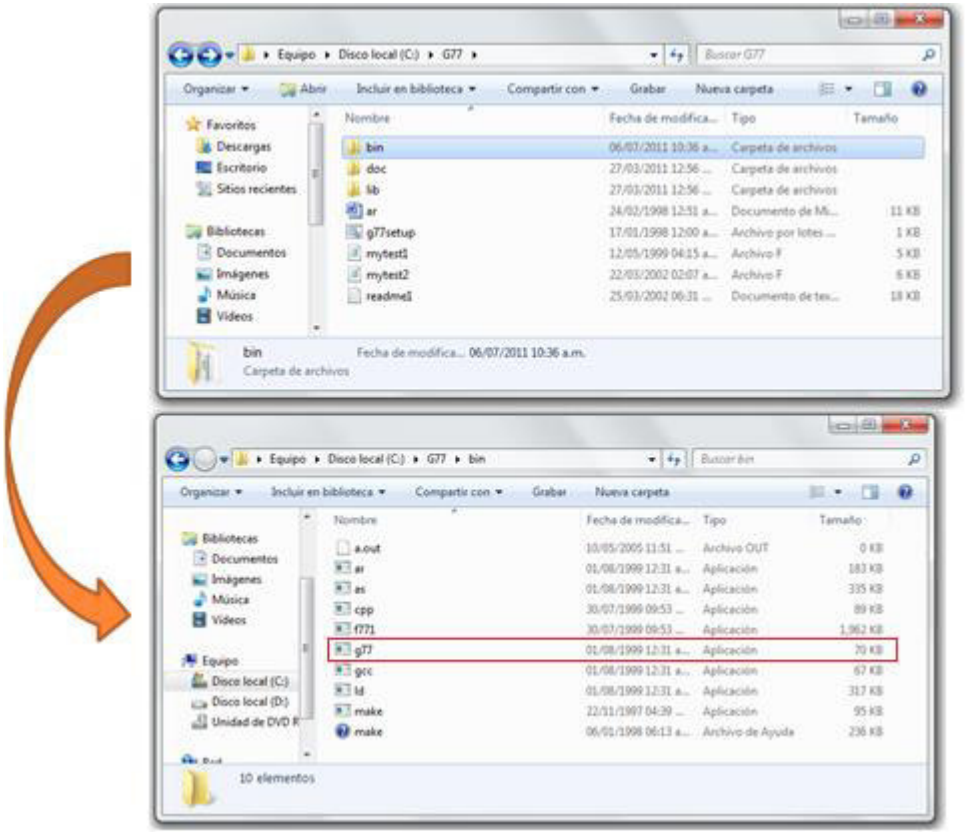


Figura 16. **Ubicación: C:/g77/bin/g77.exe**
Fuente. Elaboración Propia

En la carpeta fsource que se encuentra en la carpeta Penelope, se encuentran los archivos de extensión “F”

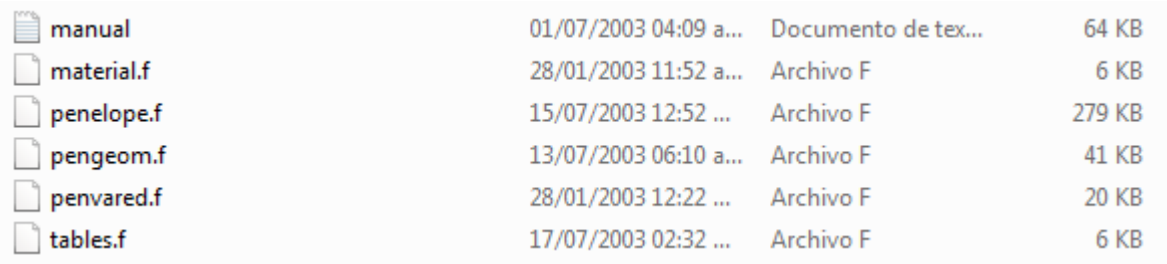


Figura 17. **Archivos de extensión F**
Fuente. Elaboración Propia

Los archivos penelope.f pencyl.f, pendoses.f, penslab.f, y timer.f se deben copiar a la carpeta examples.

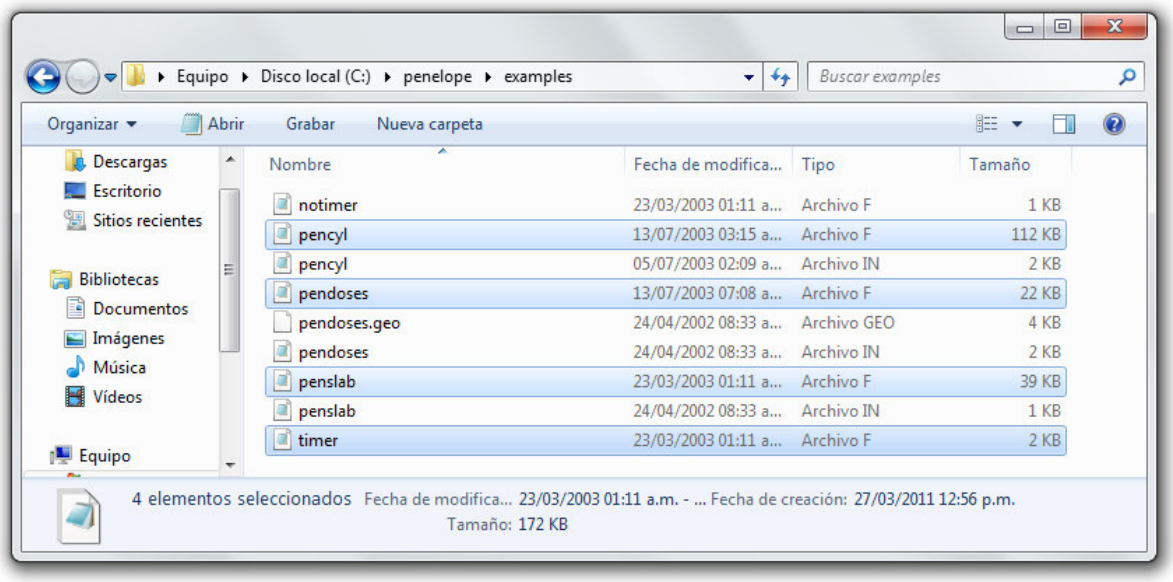


Figura 18. **Copiar los archivos de extensión F a la carpeta examples**
Fuente. Elaboración Propia

Así mismo de la carpeta gview, que se encuentra en el directorio C:/penelope/other/gview, se debe copiar los archivos gview2d, gview3d, gviewc hacia la carpeta examples.

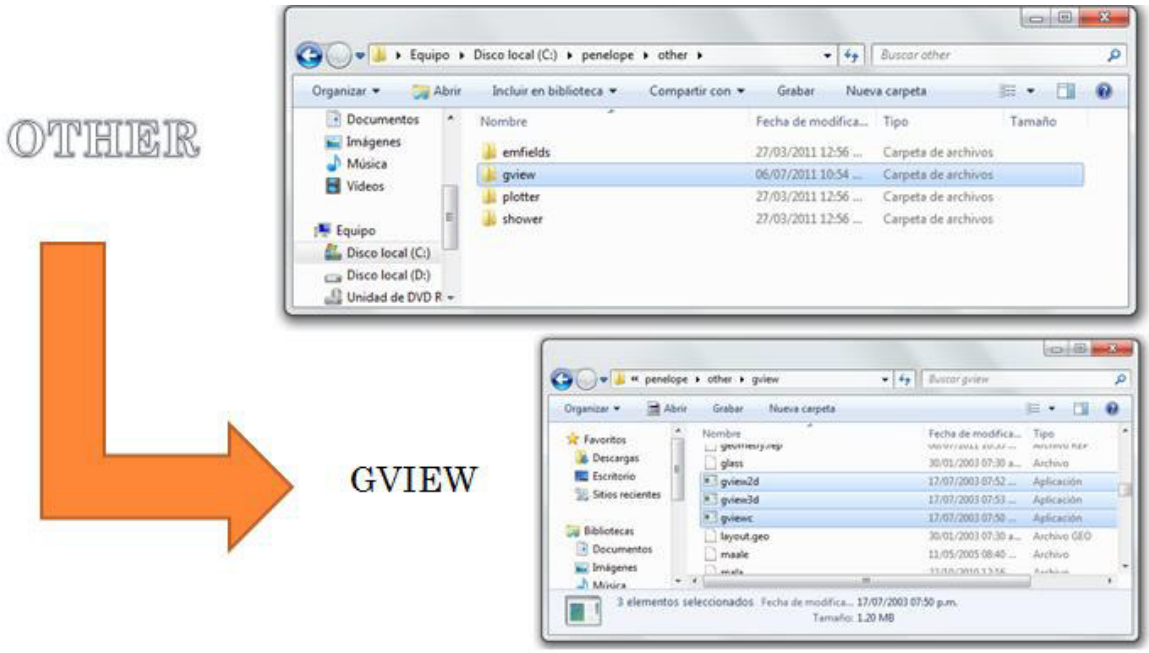


Figura 19. **Copiar los archivos gview2d, gwied3d, gviewc a la carpeta examples**
Fuente. Elaboración Propia

Para elegir con que material vamos a trabajar, ya sea para el caso de un fantoma de agua, para el cual se requiere los materiales de acrílico, agua, aire, y los materiales propios del acelerador lineal; todos estos materiales se encuentran en la carpeta pendbase, la cual se encuentra en el directorio c:/penelope/pendbase, luego de definir los materiales a utilizar, los seleccionamos y copiamos a la carpeta examples.

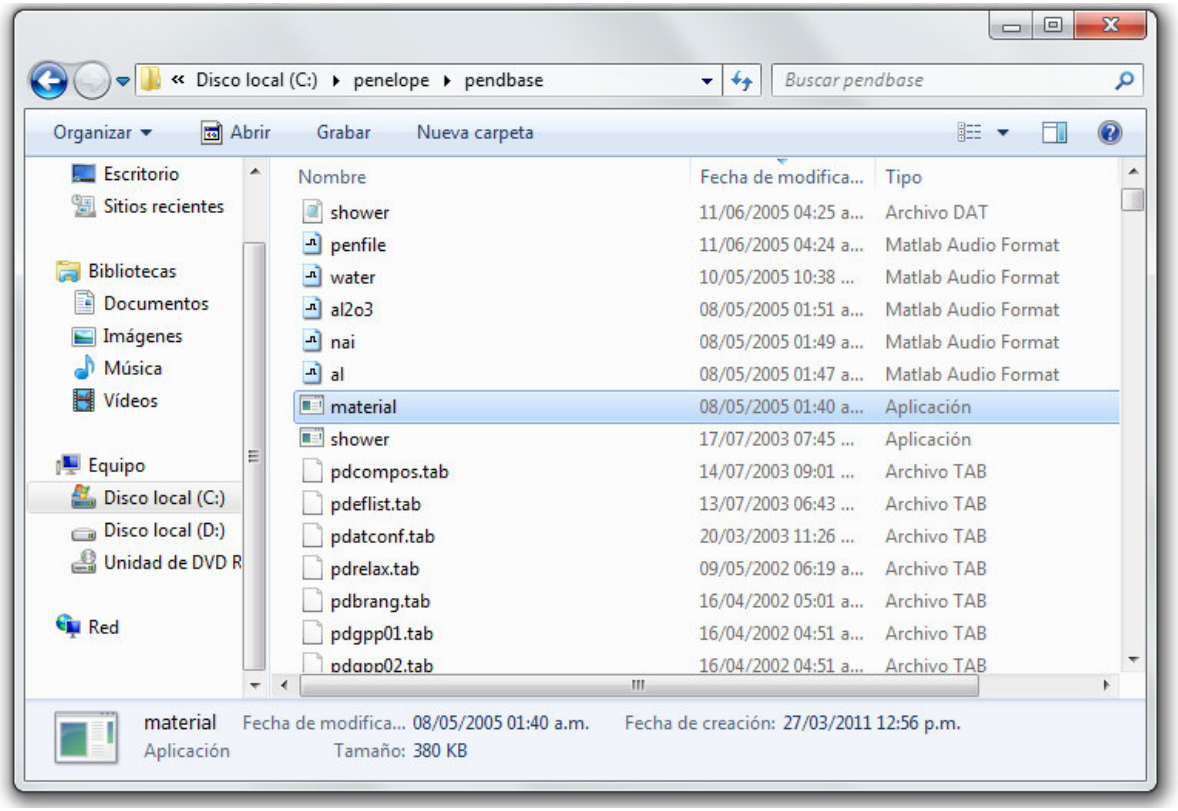


Figura 20. **Copiar los materiales a utilizar a la carpeta examples**
Fuente. Elaboración Propia

Nos dirigimos a la carpeta bin, de la carpeta gnuplot (directorio c:/gnuplot/bin) y copiamos el archivo wgnuplot.exe hacia la carpeta examples.

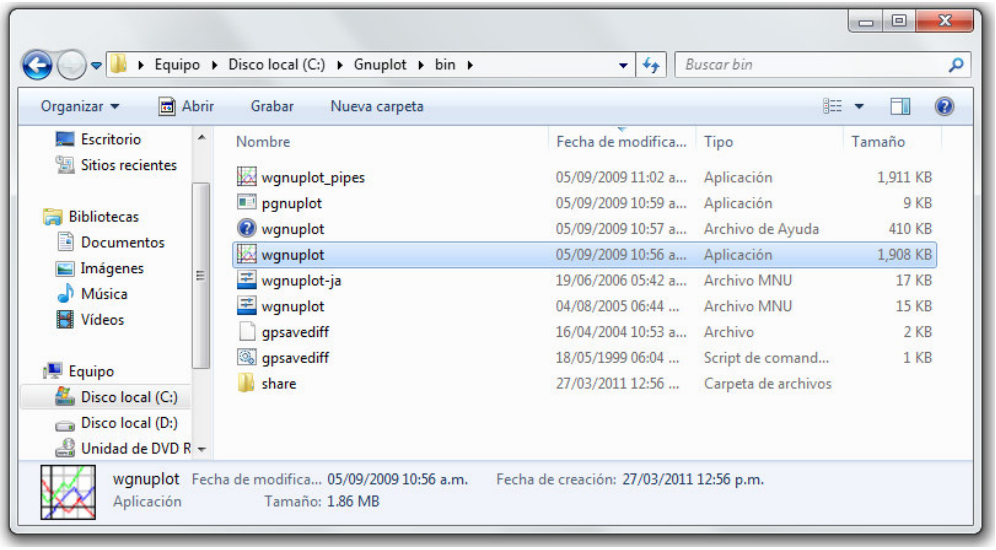


Figura 21. **Copiar el archivo wgnuplot.exe a la carpeta examples**
Fuente. Elaboración Propia

Para poder realizar la simulación ya sea en PENSLAB, PENCYL o PENDOSES es necesario tener los archivos EXE (penslab.exe, pencyl.exe o pendoses.exe) y para obtenerlos debemos copiar para cada caso los siguientes archivos a la carpeta bin de la carpeta g77.

3.3.4.1. Implementación de PENSLAB

Copiamos la carpeta penslab.f, timer.f, penelope.f, al directorio c:/g77/bin

Abrimos el programa cmd y creamos el archivo penslab.exe a través de g77 penslab.f penelope.f timer.f –o penslab.exe

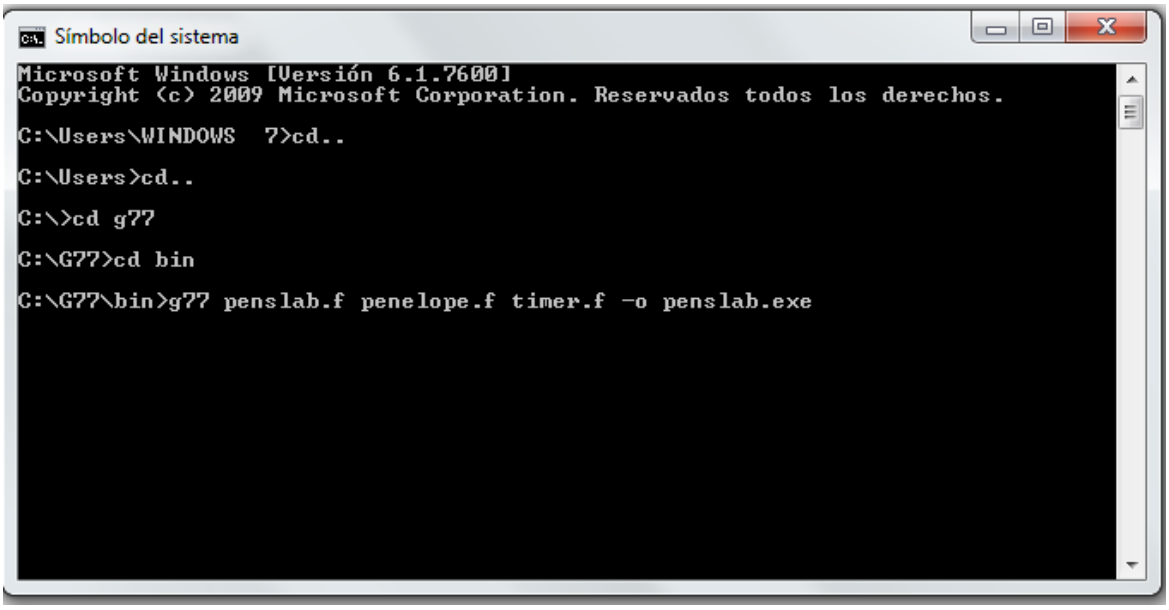


Figura 22. **Creación del archivo penslab.exe en el programa cmd.**
Fuente. Elaboración Propia

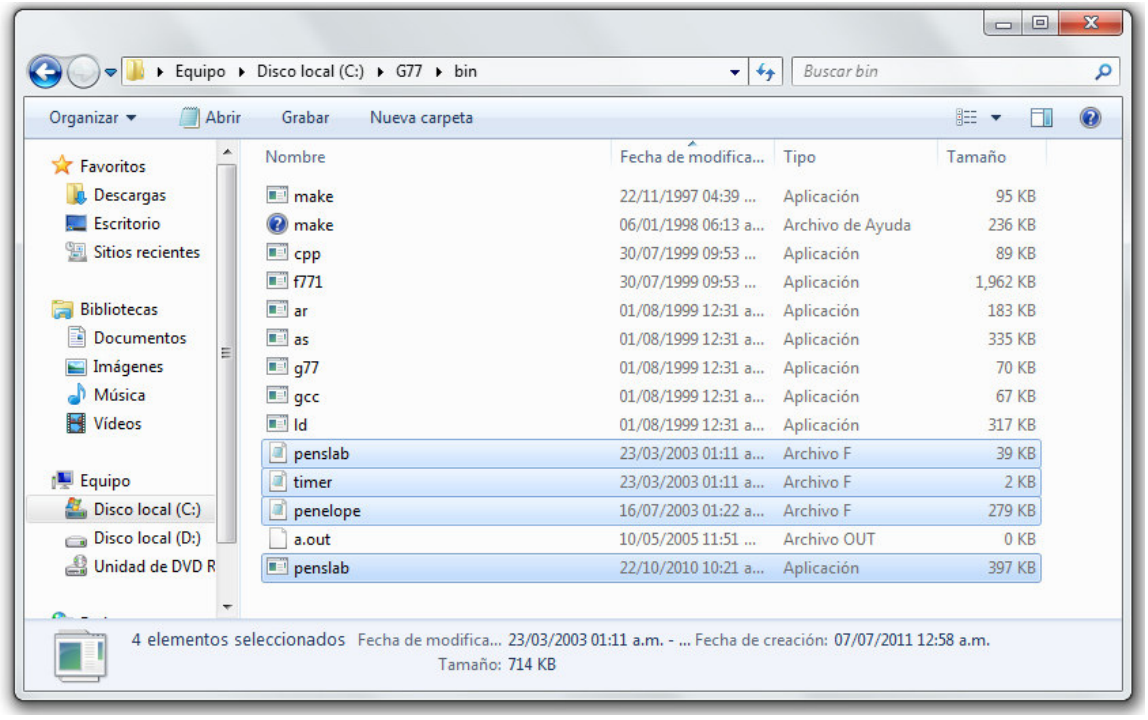


Figura 23. **Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77.**
Fuente. Elaboración Propia

Creamos la carpeta Penslab dentro de la carpeta examples y copiamos los archivos penslab.f, penslab.in, penslab.gnu, timer.f, penelope.f material.mat, wgnuplot.exe, penslab.exe. Siendo el archivo principal, el archivo de entrada penslab.in donde se pondrán las condiciones de la simulación

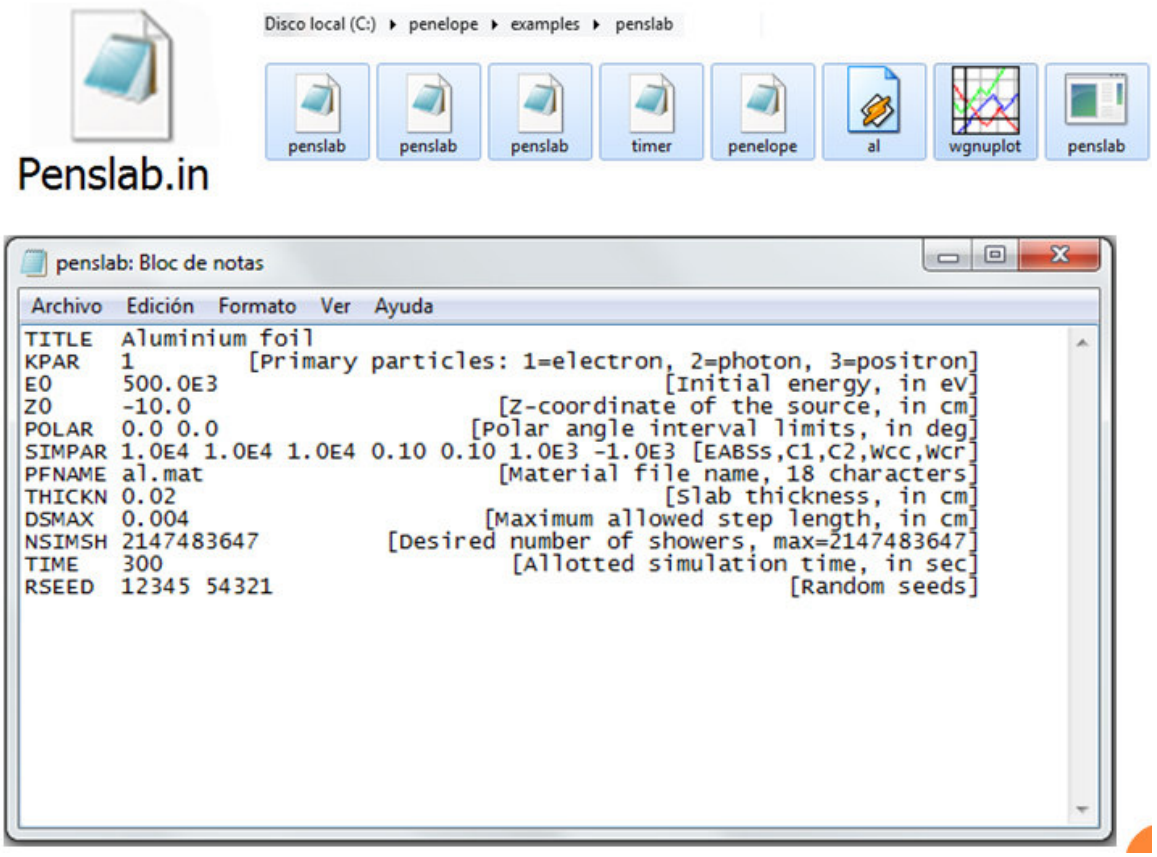


Figura 24. **Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Penslab.**
Fuente. Elaboración Propia

Luego de obtener estos archivos, ya no es necesario realizar todo el procedimiento anterior, puesto que para una siguiente simulación se pueden copiar los archivos a una nueva carpeta y solamente modificar los datos del archivo penslab.in.

3.3.4.2. Implementación de PENCYL

Similar al caso de PENSLAB. Copiamos la carpeta penvared.f, timer.f, penelope.f, penslab.f al directorio c:/g77/bin

Abrimos el programa cmd y creamos el archivo penslab.exe a través de g77 pencyl.f penelope.f penvared.f timer.f –o pencyl.exe

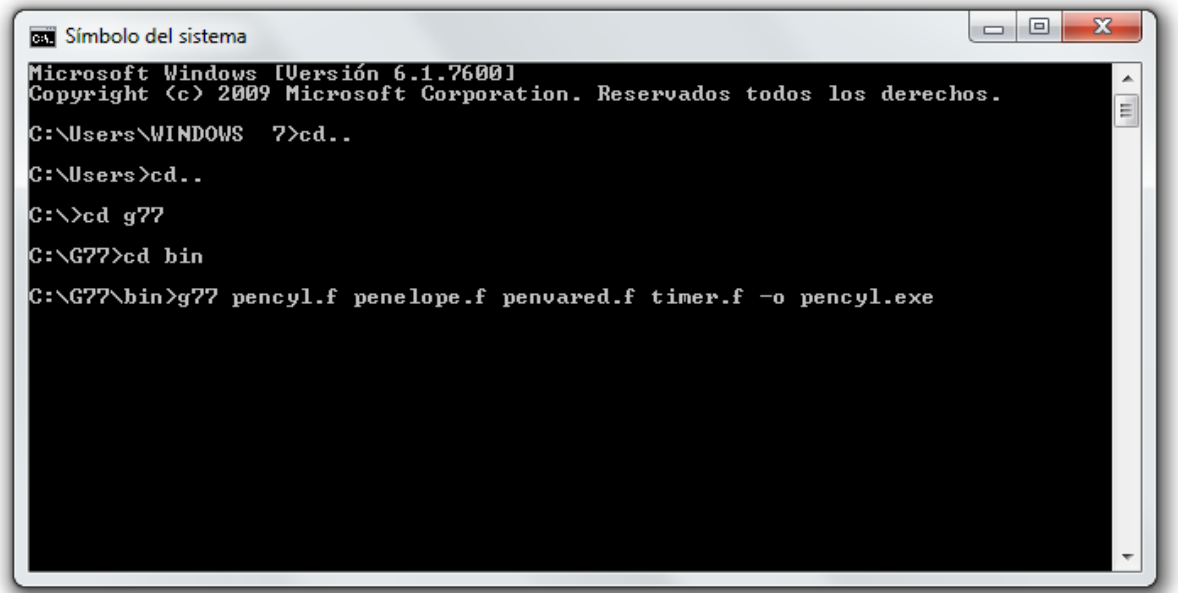


Figura 25. **Creación del archivo pencyl.exe.**
Fuente. Elaboración Propia

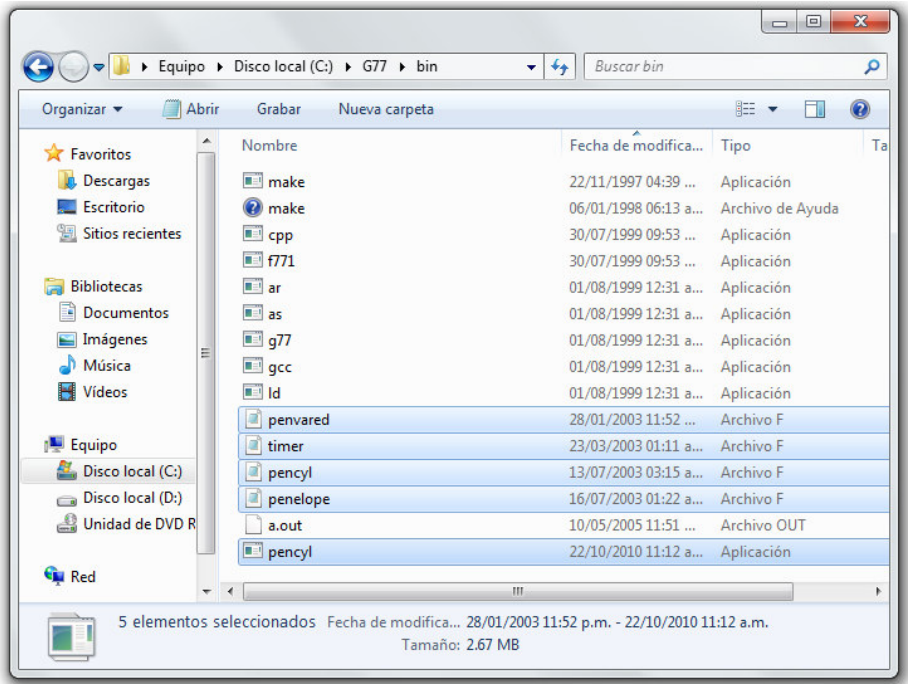


Figura 26. **Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77.**
Fuente. Elaboración Propia

Creamos la carpeta Pencyl dentro de la carpeta examples y copiamos los archivos pencyl.f, pencyl.in, pencyl.gnu, timer.f, penelope.f material.mat, wgnuplot.exe, pencyl.exe. Siendo el archivo principal, el archivo de entrada penslab.in donde se pondrán las condiciones de la simulación

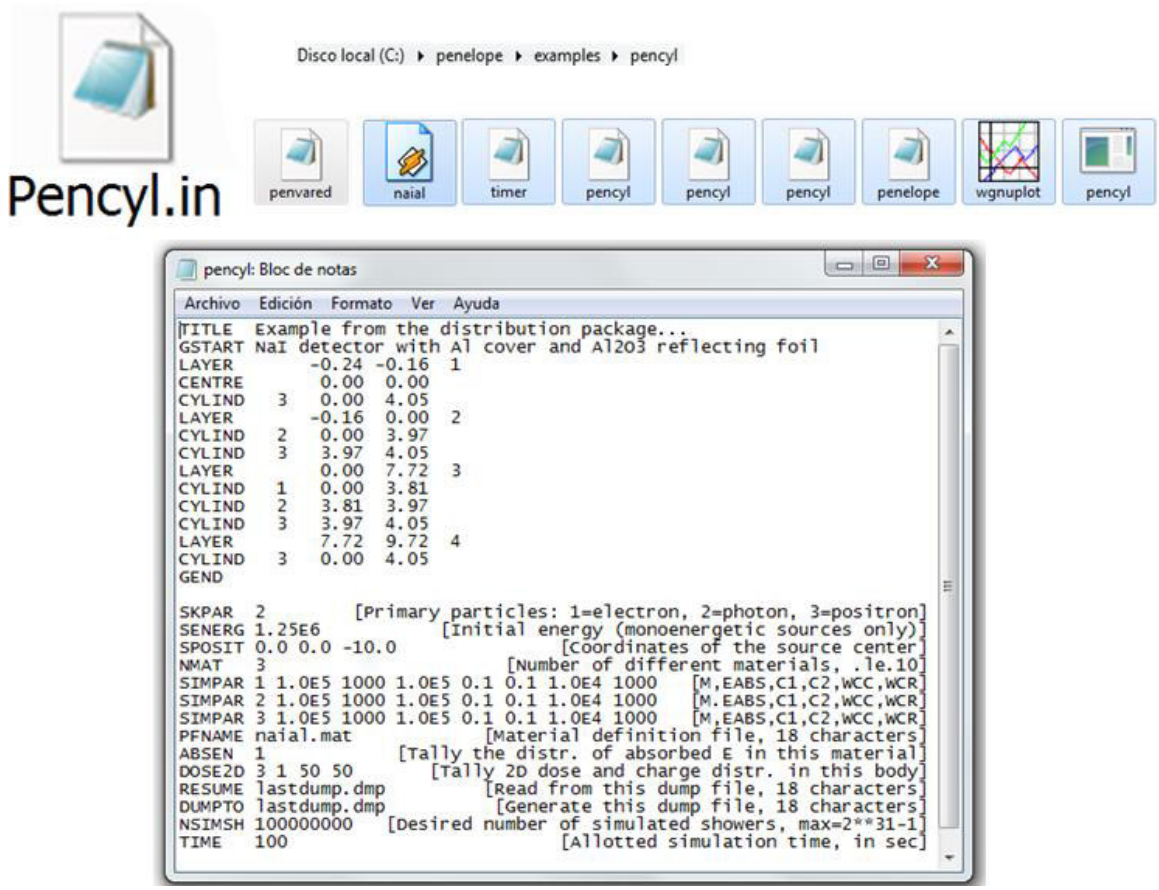


Figura 27. **Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Pencyl.**
Fuente. Elaboración Propia

Luego de obtener estos archivos, ya no es necesario realizar todo el procedimiento anterior, puesto que para una siguiente simulación se pueden copiar los archivos a una nueva carpeta y solamente modificar los datos del archivo pencyl.in.

3.3.4.3. Implementación de PENDOSES

Similar al caso de PENSLAB y PENCYL. Copiamos la carpeta pengeom.f, timer.f, penelope.f, pendoses.f al directorio c:/g77/bin

Abrimos el programa cmd y creamos el archivo penslab.exe a través de g77 pendoses.f penelope.f pengeom.f timer.f –o pendoses.exe

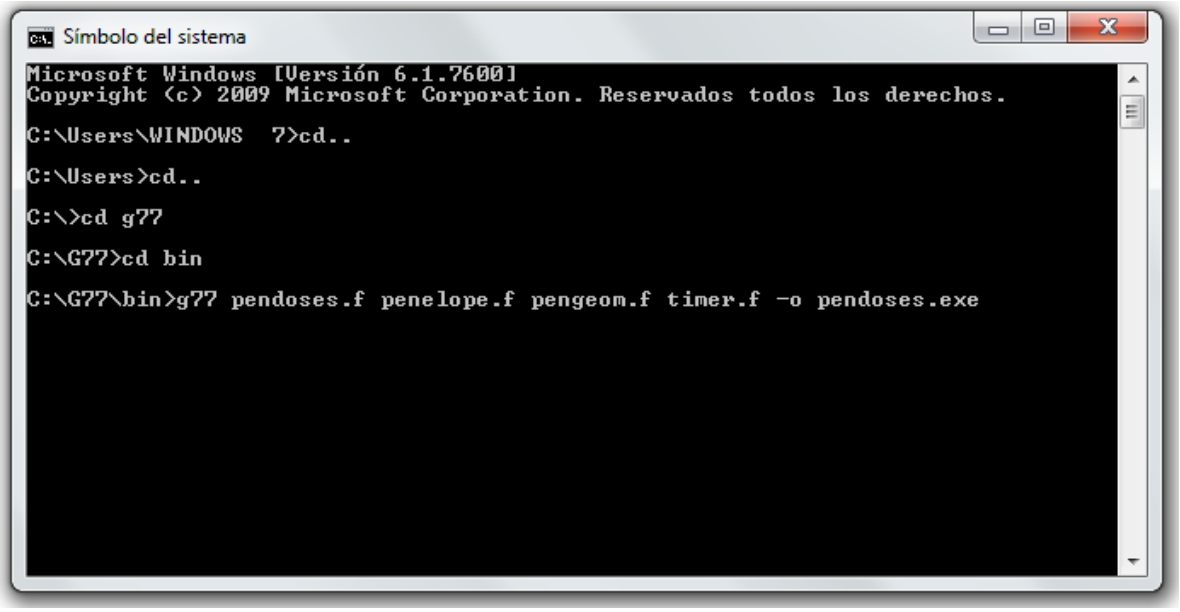


Figura 28. **Creación del archivo pendoses.exe.**
Fuente. Elaboración Propia

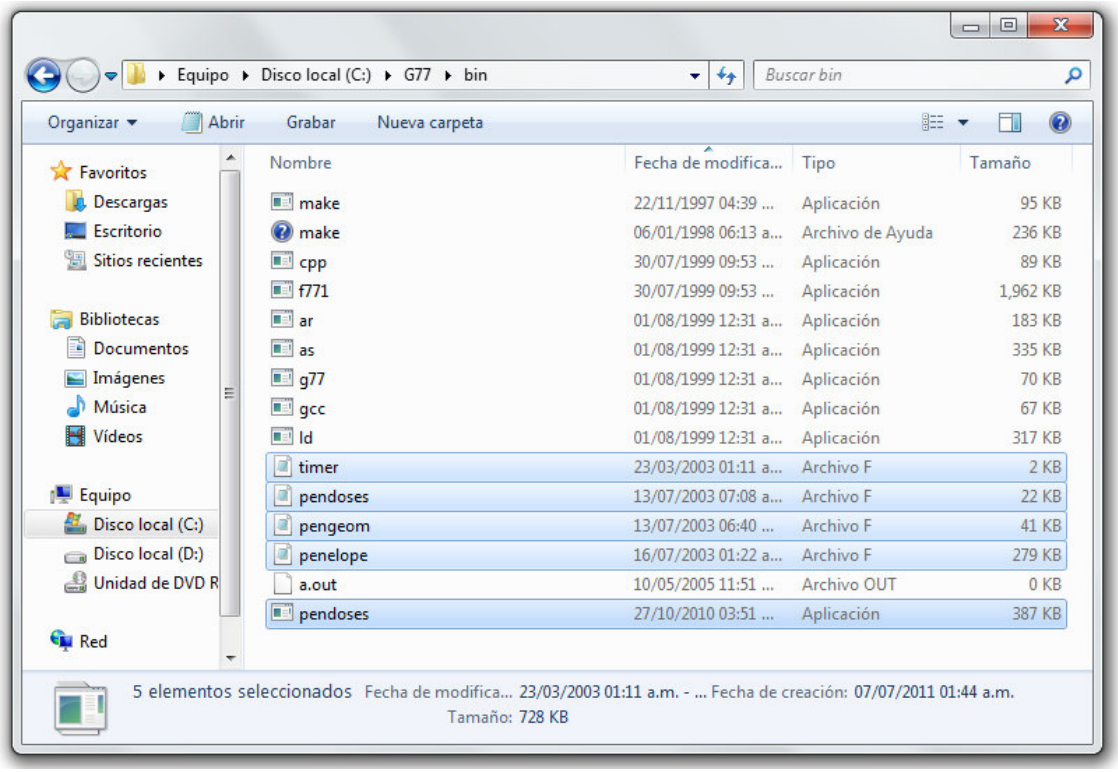


Figura 29. **Trasladar los archivos a la carpeta bin del programa g77.**
Fuente. Elaboración Propia

Creamos la carpeta Pendoses dentro de la carpeta examples y copiamos los archivos pendoses.geo, pendoses.f, pendoses.in, pendoses.gnu, timer.f, pengeom.f penelope.f material.mat, wgnuplot.exe, pendoses.exe. Siendo el archivo principal, el archivo de entrada penslab.in donde se pondrán las condiciones de la simulación.

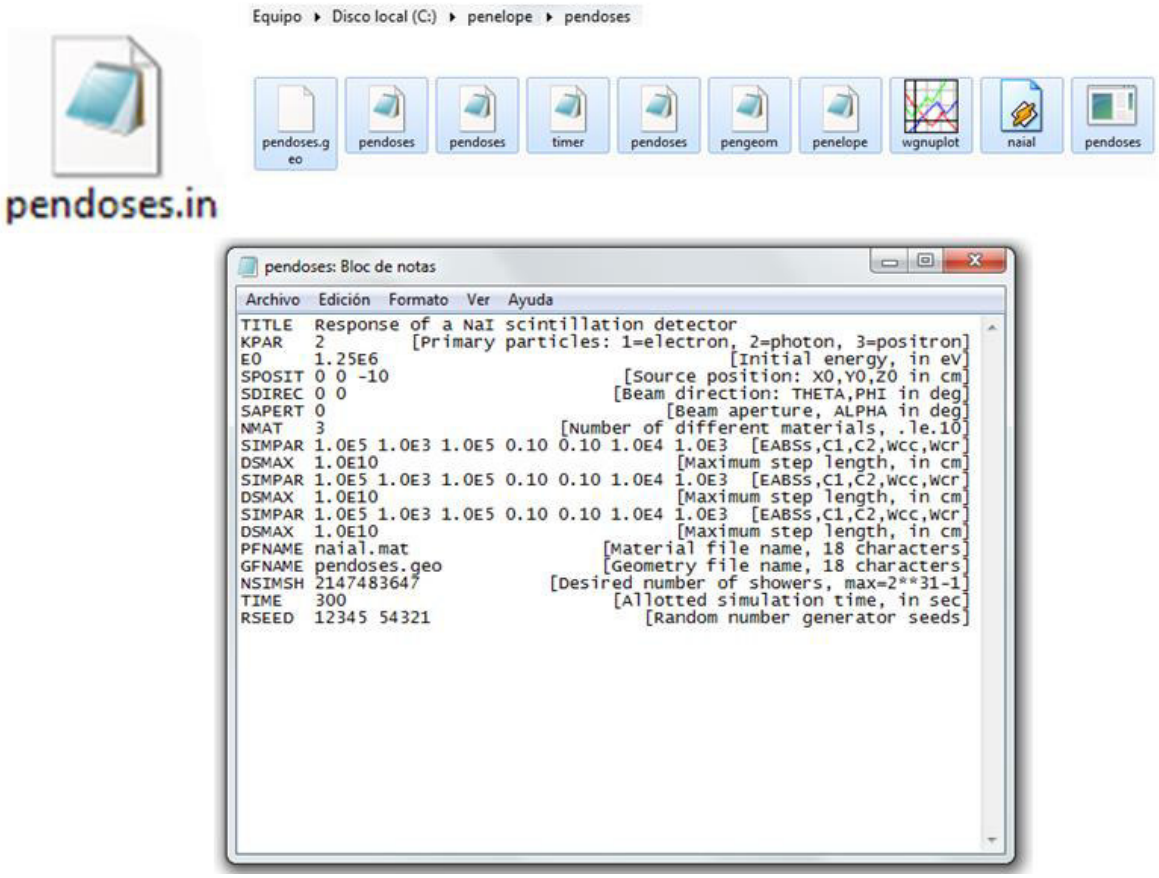


Figura 30. **Archivos necesarios para la simulación en la carpeta Pendoses.**
Fuente. Elaboración Propia

Luego de obtener estos archivos, ya no es necesario realizar todo el procedimiento anterior, puesto que para una siguiente simulación se pueden copiar los archivos a una nueva carpeta y solamente modificar los datos del archivo pendoses.geo y pendoses.in

CAPÍTULO 4: Simulación de los rutinas del Programa Penelope

4.1. Simulación de PENSLAB

Para realizar la simulación, se tiene que ingresar al archivo de entrada “Penslab.in” e ingresar los datos, tal como se explicó en el capítulo 1.

Luego se debe ingresar a la carpeta penslab a través del programa cmd y escribir lo siguiente penslab < penslab.in

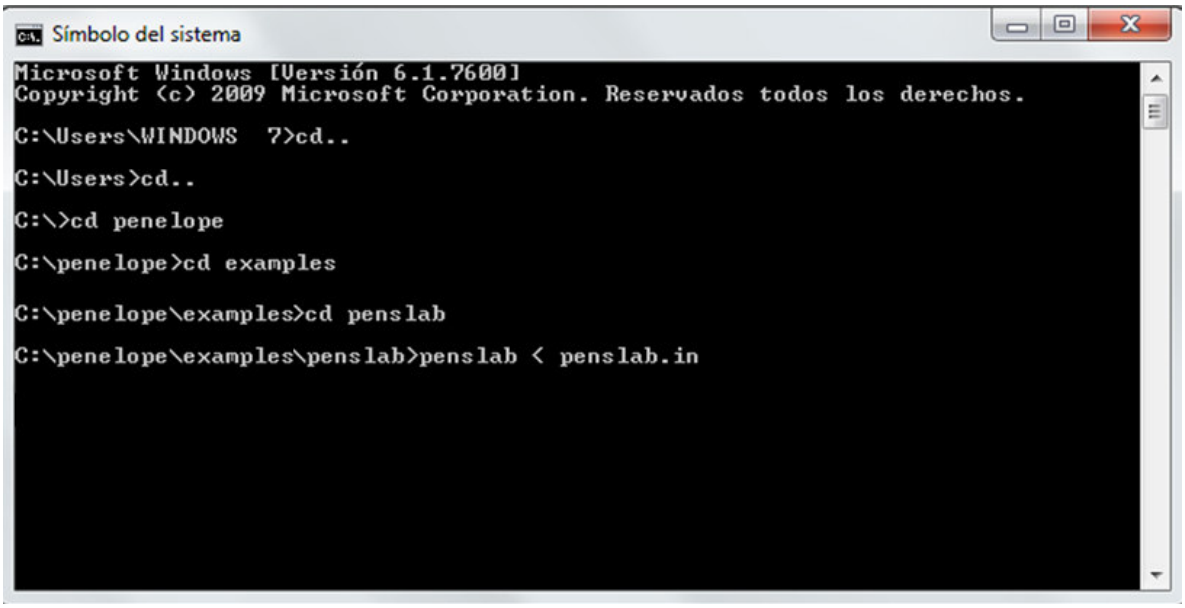
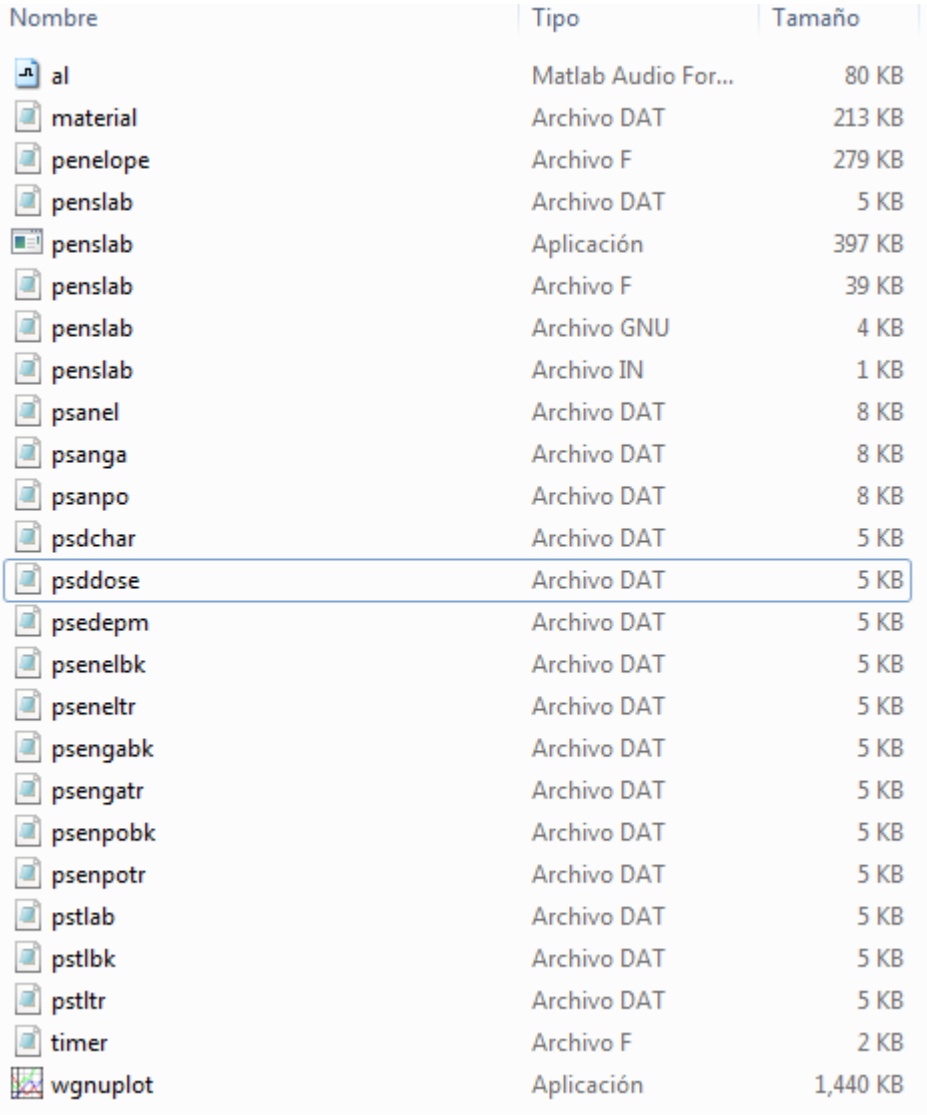


Figura 31. **Simulación en Penslab**
Fuente. Elaboración Propia

Una vez realizada la simulación en PENSLAB, se obtendrá los siguientes archivos de salida, que tienen como extensión DAT



Nombre	Tipo	Tamaño
al	Matlab Audio For...	80 KB
material	Archivo DAT	213 KB
penelope	Archivo F	279 KB
penslab	Archivo DAT	5 KB
penslab	Aplicación	397 KB
penslab	Archivo F	39 KB
penslab	Archivo GNU	4 KB
penslab	Archivo IN	1 KB
psanel	Archivo DAT	8 KB
psanga	Archivo DAT	8 KB
psanpo	Archivo DAT	8 KB
psdchar	Archivo DAT	5 KB
psddose	Archivo DAT	5 KB
psedepm	Archivo DAT	5 KB
psenelbk	Archivo DAT	5 KB
pseneltr	Archivo DAT	5 KB
psengabk	Archivo DAT	5 KB
psengatr	Archivo DAT	5 KB
psenpobk	Archivo DAT	5 KB
psenpotr	Archivo DAT	5 KB
pstlab	Archivo DAT	5 KB
pstlbk	Archivo DAT	5 KB
pstltr	Archivo DAT	5 KB
timer	Archivo F	2 KB
wgnuplot	Aplicación	1,440 KB

Figura 32. **Archivos de salida luego de la simulación en Penslab**
Fuente. Elaboración Propia

Para poder apreciar las gráficas en gnuplot, es necesario escribir el siguiente comando en cmd

```
C:\penelope\examples\penslab>wgnuplot penslab.gnu
```

Figura 33. **Código en cmd para graficar los resultados de la simulación en PENSLAB**
Fuente. Elaboración Propia

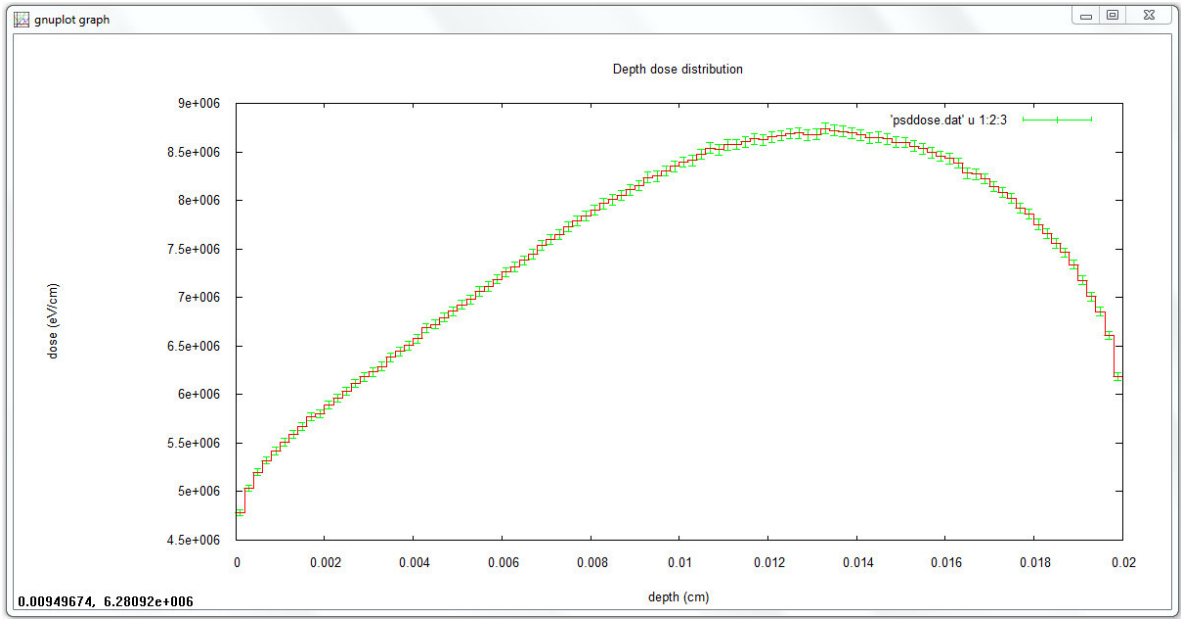


Figura 34. **Gráfica de dosis vs profundidad de la simulación en PENSLAB**
Fuente. Elaboración Propia

4.2. Simulación de PENCYL

Para realizar la simulación, se tiene que ingresar al archivo de entrada “Pencyl.in” e ingresar los datos, tal como se explicó en el capítulo 1.

Luego se debe ingresar a la carpeta pencyl a través del programa cmd y escribir lo siguiente pencyl < pencyl.in

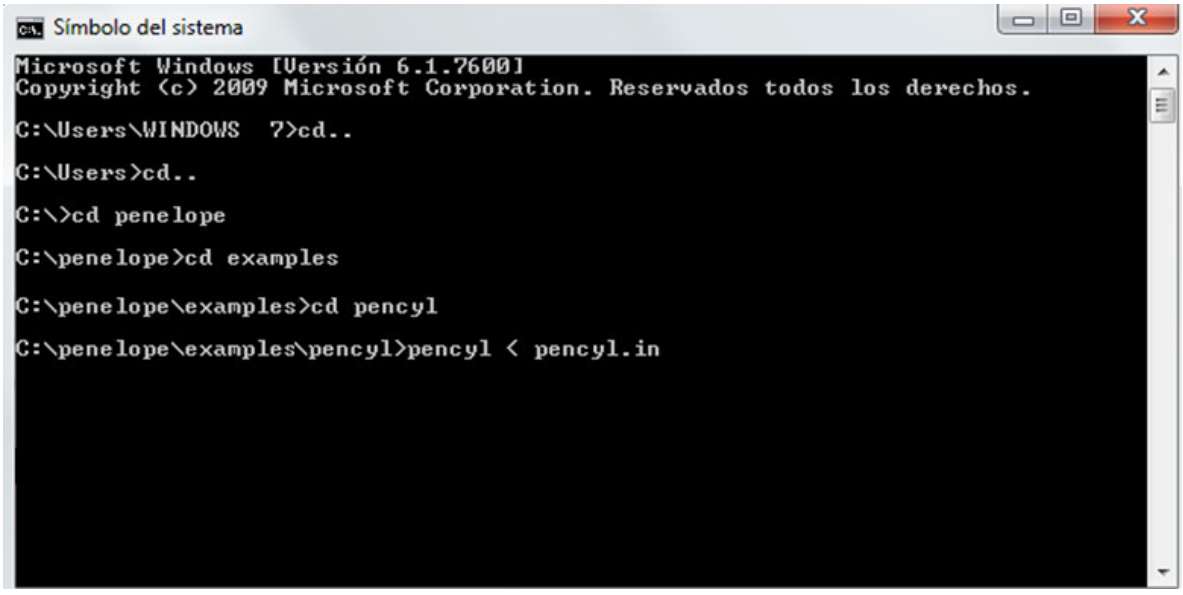
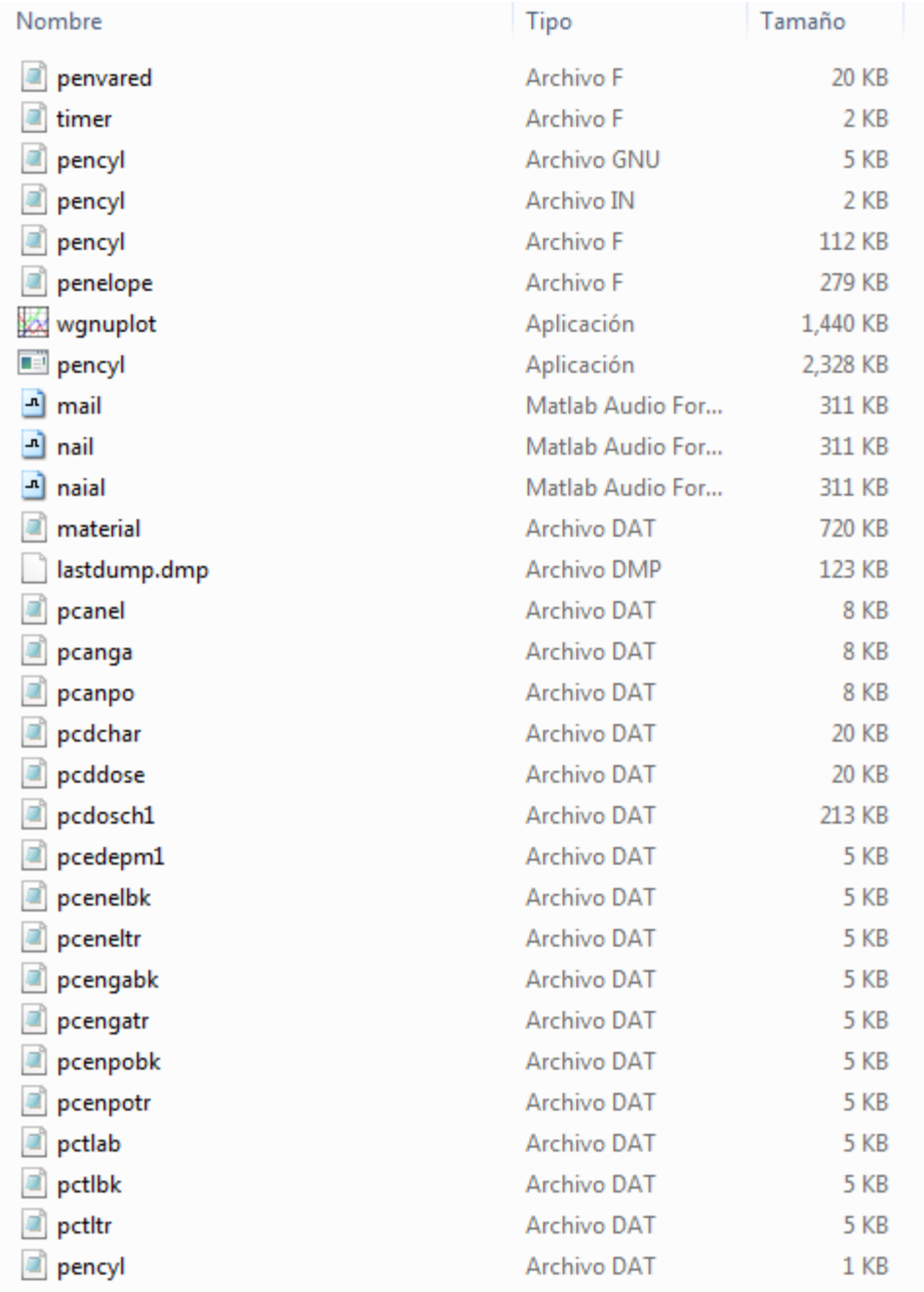


Figura 35. **Simulación en Pencyl**
Fuente. Elaboración Propia

Una vez realizada la simulación en PENCYL, se obtendrá los siguientes archivos de salida, que tienen como extensión DAT



Nombre	Tipo	Tamaño
penvared	Archivo F	20 KB
timer	Archivo F	2 KB
pencyl	Archivo GNU	5 KB
pencyl	Archivo IN	2 KB
pencyl	Archivo F	112 KB
penelope	Archivo F	279 KB
wgnuplot	Aplicación	1,440 KB
pencyl	Aplicación	2,328 KB
mail	Matlab Audio For...	311 KB
nail	Matlab Audio For...	311 KB
naial	Matlab Audio For...	311 KB
material	Archivo DAT	720 KB
lastdump.dmp	Archivo DMP	123 KB
pcanel	Archivo DAT	8 KB
pcanga	Archivo DAT	8 KB
pcanpo	Archivo DAT	8 KB
pcdchar	Archivo DAT	20 KB
pcddose	Archivo DAT	20 KB
pcdosch1	Archivo DAT	213 KB
pcedepm1	Archivo DAT	5 KB
pcenelbk	Archivo DAT	5 KB
pceneltr	Archivo DAT	5 KB
pcengabk	Archivo DAT	5 KB
pcengatr	Archivo DAT	5 KB
pcenpobk	Archivo DAT	5 KB
pcenpotr	Archivo DAT	5 KB
pctlab	Archivo DAT	5 KB
pctlbk	Archivo DAT	5 KB
pctltr	Archivo DAT	5 KB
pencyl	Archivo DAT	1 KB

Figura 36. **Archivos de salida luego de la simulación en Pencyl**

Fuente. Elaboración Propia

Para poder apreciar las gráficas en gnuplot, es necesario escribir el siguiente comando en cmd

```
C:\penelope\examples\pencyl>wgnuplot pencyl.gnu
```

Figura 37. **Código en cmd para graficar los resultados de la simulación en PENCYL**
Fuente. Elaboración Propia

Finalmente obtenemos la gráfica de la distribución de dosis de profundidad realizada en la simulación

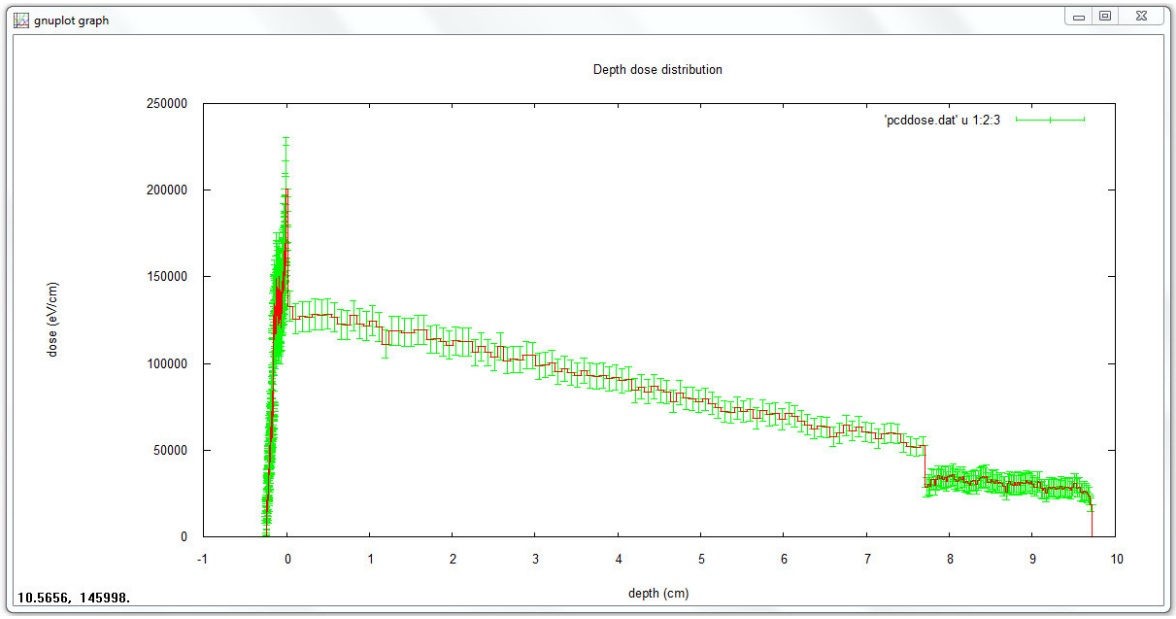


Figura 38. **Gráfica de dosis vs profundidad de la simulación en PENCYL**
Fuente. Elaboración Propia

4.3. Simulación de PENDOSES

Para realizar la simulación, se tiene que crear la geometría de la simulación en el archivo “Pendoses.geo”, luego ingresar al archivo de entrada “Pendoses.in” e ingresar los datos, tal como se explicó en el capítulo 1.

Por último se debe ingresar a la carpeta pendoses a través del programa cmd y escribir lo siguiente pendoses < pendoses.in

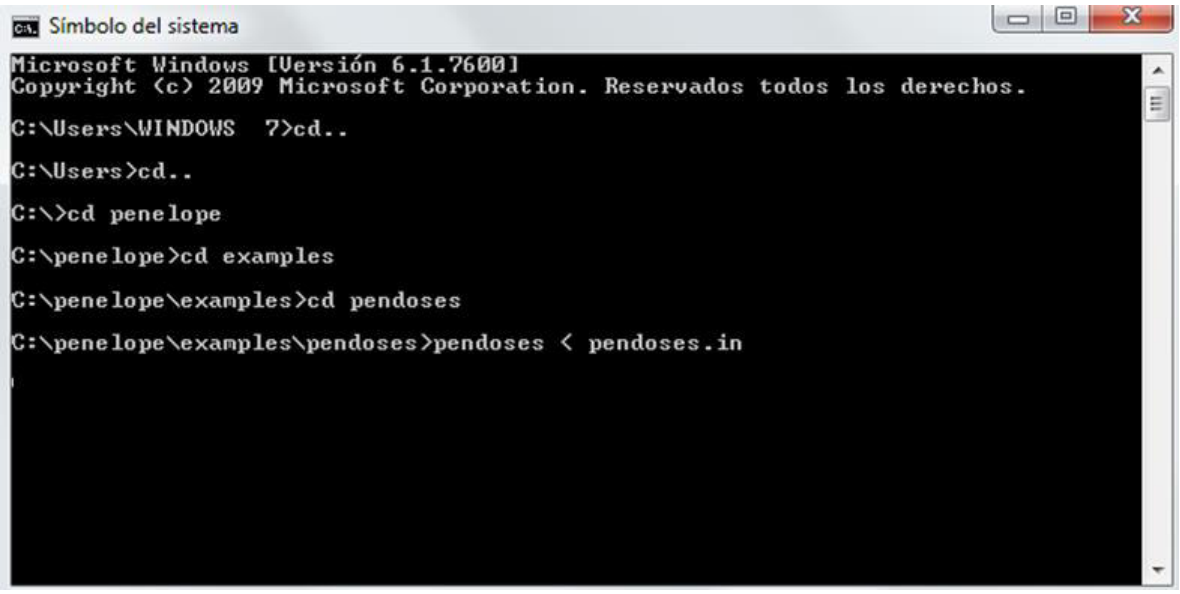


Figura 39. **Simulación en Pendoses**
Fuente. Elaboración Propia

Una vez realizada la simulación en PENDOSES, se obtendrá los siguientes archivos de salida.



Nombre	Tipo	Tamaño
pendoses.geo	Archivo GEO	4 KB
pendoses	Archivo IN	2 KB
pendoses	Archivo GNU	1 KB
timer	Archivo F	2 KB
pendoses	Archivo F	22 KB
pengeom	Archivo F	41 KB
penelope	Archivo F	279 KB
wgnuplot	Aplicación	1,908 KB
naial	Matlab Audio For...	311 KB
pendoses	Aplicación	387 KB
material	Archivo DAT	3 KB
pddepen	Archivo DAT	5 KB
pendoses	Archivo DAT	9 KB

Figura 40. **Archivos de salida luego de la simulación en Pendoses**
Fuente. Elaboración Propia

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

A través del programa Penelope se puede simular el proceso de Radioterapia mediante la interacción de las radiaciones ionizantes con la materia.

Ingresando los datos en los archivos de entrada del programa y a través de la creación de la geometría del sistema se puede simular el cabezal de radioterapia.

El programa Penelope nos permite simular los materiales que serán irradiados.

Al finalizar la simulación, obtenemos los archivos de salida, los cuales al graficarlos se consigue la cantidad de dosis de radiación recibida en cada material en el proceso de radioterapia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Attix, F. (1986). *Introduction to Radiological Physics anda Radiation Dosimetry.* New York: Wiley.

Delaney, G., Jacob, S., Featherstone, C., & Barton, M. (2005). *The role of radiotherapy in cancer treatment: estimating optimal utilization from a review of evidence-based clinical guidelines.*

Herranz, E. (2013). *Simulaciones Monte Carlo para Radioterapia Intraoperatoria con haces de electrones.*

Jaffray, D. (2005). *Emergent technologies for 3-dimensional image-guided radiation delivery.*

Khan, F. (2003). *The physics of radiation therapy.* Philadelphia: Lippincott.

Lamanna, E., Gallo, A., Russo, F., Brancaccio, R., Soriani, A., & L, S. (2012). *IntraOperative Radiotherapy with Electron Beam, Modern Practices in Radiation Therapy*. Retrieved from Dr.Gopishankar Natanasabapathi: http://www.intechopen.com/books/modern-practices-in-radiation-therapy/intra-operative-radiotherapy-withelectron-b

Massa, J. (2008). *Optimización del Cálculo del Efecto Fotoeléctrico en dosis de Radioterapia.* Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Nuclear Energy Agency. (2015, Mayo 11). *NEA*. Retrieved Diciembre 10, 2017, from NEA: https://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1525

OMS. (2012). *Estadísticas Sanitarias Mundiales.*

Salvat, F., Fernandez Varea, J., & Sempau, J. (2006). *PENELOPE – A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, en Workshop Proceedings Barcelona.* Barcelona.