
TFG

Universidad de Murcia



Trabajo Fin de Grado

Dinámica de meteoroides

José David Balseca Cisneros

DNI: 58454320-G

Tutor: Gregorio José Molina Cuberos

4º Grado en Física

Julio 2021



D./Dña. José David Balseca Cisneros,
estudiante del Grado en Física de la Facultad de Química
de la Universidad de Murcia, **DECLARO:**

Que el Trabajo de Fin de Grado que presento para su exposición y defensa titulado

Dinámica de meteoroides

..... y
cuyo/s tutor/es es/son

D./Dña. Gregorio José Molina Cuberos

D./Dña.

**es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido
debidamente citadas en el mismo.**

Murcia, a 6 de Julio de 2021

Firma

*Dedicado a mis padres, a mi abuela y a mis tías,
especialmente a mi tía Vivi que en paz descanse.*

Resumen

En el siguiente trabajo se presenta el estudio del comportamiento de la dinámica de meteoroides bajo la influencia de la atmósfera terrestre. Para ello, se parte de las ecuaciones básicas de la física de meteoros, es decir, ecuaciones de un solo cuerpo las cuales, se resuelven numéricamente mediante una interfaz de Matlab, Simulink, donde se establecen las variables y parámetros con los que se llevan a cabo nuestra simulación.

Dentro de este programa se estudia la variación de la masa, la deceleración y el poder visual irradiado. Todo esto se tiene en cuenta para distintos tipos de modelos atmosféricos, desde el más simple, donde se considera el llamado modelo de atmósfera isotérmica, hasta modelos más reales fundamentados en base de datos proporcionados por la NASA como el modelo estándar de 1976, el modelo MSIS-E-90 y modelo NRLMSISE-00. Con todo ello, se procede a realizar una comparación y estudio de las variaciones de los resultados según el modelo considerado.

Los programas se llevan a cabo con meteoroides en el rango de masa de 10^{-3} kg a 10^{-13} kg, y que cubren un rango de velocidad de 11 km/s a 71 km/s. También consideramos las densidades más representativas a la hora de la introducción de las variables: los de asteroide de tipo roca helada (1000 kg/m^3), los de tipo condrita (3400 kg/m^3) y los de tipo hierro (7800 kg/m^3). Se establece la tendencia del comportamiento a la hora de la variación de los parámetros y cómo afectaría su entrada en la atmósfera terrestre.

Abstract

The following work presents the study of the behavior of meteor dynamics under the influence of the Earth's atmosphere. To do this, we start from the basic equations of meteor physics, that is, equations of a single body. They are solved numerically by means of a Matlab interface, Simulink, in which the variables and parameters with which our simulation are carried out are established.

Within this program the variation of mass, speed, deceleration and radiated visual power are studied. All this is taken into account for different types of atmospheric models, from the simplest, where the so-called isothermal atmosphere model is considered, to more realistic models, based on data provided by NASA such as the 1976 standard model, the model MSIS-E-90 and model NRLMSISE-00. With all this, a comparison and study of the variations of the results according to the model considered is carried out.

The programs are carried out with meteoroids in the mass range of 10^{-3} kg to 10^{-13} kg, and covering a meteor velocity range of 11 km/s to 71 km/s. We also consider the most representative densities when introducing the variables: those of asteroid of the frozen rock type (1000 kg / m³), those of the chondrite type (3400 kg / m³) and those of the iron type (7800 kg / m³). The trend of the behavior is established at the time of the variation of the parameters and how it would affect their entry into the Earth's atmosphere.

Índice

1. Introducción	1
2. Revisión de meteoroides	5
2.1. Origen	5
2.2. Dinámica de interacción	7
2.3. Más fenómenos	9
2.4. Composición	10
3. Interacción de meteoros con la atmósfera	14
3.1. Regímenes de interacción	14
3.2. Modelos atmosféricos	16
4. Física de la dinámica de meteoroides	24
4.1. Balance energético	24
4.2. Teoría de un solo cuerpo	28
4.3. Magnitudes absolutas y aparentes	30
5. Modelización	32
5.1. Verificación de funcionalidad del código	34
6. Resultados y discusiones	36
6.1. Efecto de la velocidad	37
6.2. Efecto del tipo de material	38
6.3. Efecto de la masa	41
6.4. Comparación entre modelos atmosféricos	43
7. Conclusiones y trabajos futuros	46
A. Elementos de código utilizados en Simulink	52
B. Diagramas y comandos utilizados en la simulación	54

Índice de figuras

1.	Meteorito tipo hierro	10
2.	Meteorito tipo palasita[18].	11
3.	Meteorito tipo mesosiderita [19].	12
4.	Meteorito tipo condrita[21].	12
5.	Meteorito tipo acondrita [14].	13
6.	Gráfica <i>a</i> : Regímenes en aire no perturbado. Gráfica <i>b</i> :Regímenes en aire perturbado (Considerando una velocidad del meteorioide $V= 70$ m/s) [22].	15
7.	Variación de la densidad con la altura de modelo isotérmico.	18
8.	Comparación de densidades moleculares (MSIS).	19
9.	Comparación de perfiles de densidad (MSIS).	19
10.	Comparación de perfil de temperatura (MSIS).	20
11.	Perfiles de densidad y temperatura (Modelo estándar 1976).	22
12.	Diagrama de bloques para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales.	32
13.	Altura vs Magnitud visual aparente.	34
14.	Estudio de la ablación y la deceleración según la velocidad.	37
15.	Altura vs Magnitud visual aparente	38
16.	Altura vs Masa.	39
17.	Altura vs Velocidad.	39
18.	Altura vs Magnitud visual aparente.	40
19.	Altura vs Masa (escala logarítmica).	41
20.	Altura vs Velocidad.	41
21.	Altura vs Magnitud visual aparente.	42
22.	Estudio de la ablación y la deceleración según el modelo atmosférico.	43
23.	Altura vs Magnitud visual aparente	44

1. Introducción

Para hablar de la temática de los meteoroides, primero hay que situarse en el espacio, en el cual encontraremos formaciones rocosas cuyas dimensiones varían desde las decenas de metros hasta varios kilómetros. Estas formaciones se denominan **asteroides**. La mayor parte de ellos proceden del cinturón de asteroides el cual, se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter [1].

Otros cuerpos a considerar son los **cometas**, cuerpos celestes cuya composición es en mayor parte roca y hielo. Las órbitas de estas formaciones son en general elípticas y bastante excéntricas. Al acercarse al Sol, estos objetos empiezan a desprender partículas que constituyen una nube de polvo y gas a su alrededor [2].

Dicha desintegración deja como resultado un conjunto de partículas flotantes en el espacio, que pueden medir desde unos pocos micrómetros hasta varios metros, los denominados **meteoroides**¹. Cuando algunas de estos objetos entra en la atmósfera terrestre, pueden ocurrir dos fenómenos:

- Que la partícula se desintegre por su interacción con la atmósfera, provocando que entre en combustión y por ello, emita un destello de luz. Esto es lo que se conoce como **meteoro** [2].
- Que la partícula no llegue a desintegrarse del todo y termine colisionando con la superficie terrestre. A esto se le llama **meteorito** [2].

Por ello, este tema es objeto de numerosos estudios, sobre todo en la dinámica de los meteoroides al entrar en la atmósfera terrestre o de otros planetas.

Las velocidades de dichos cuerpos al penetrar en la atmósfera de la Tierra oscilan entre los 11,2 km/s y los 72,8 km/s. Este factor va a ser importante a la hora de considerar el grado de supervivencia de los meteoroides, ya que la pérdida de masa se deberá principalmente a la colisión de las partículas del aire con la superficie del cuerpo [3].

¹Según la Unión Astronómica Internacional, se considerará meteoroides aquellas formaciones rocosas cuyo tamaño se encuentre entre los 30 micrómetros y 1 m.

El estudio de este comportamiento se llevará a cabo gracias a las ecuaciones de la física de meteoros, que se basan en simples principios físicos de intercambio de energía y conservación de momento. Por lo tanto, se pueden obtener una serie de ecuaciones diferenciales básicas, a veces también llamadas la **teoría de un solo cuerpo** [4].

A la hora de la observación de los meteoros, es importante considerar su estudio en el ámbito experimental, ya que dependiendo del tamaño, se pueden encontrar a través de detectores de polvo, emisión infrarroja o simplemente por observación óptica [5].

Estas investigaciones también tienen su importancia para considerar posibles peligros que pueden sufrir las naves espaciales, puesto que este tipo de objetos a velocidades muy altas pueden suponer un daño considerable para los satélites y otras naves. Además, es importante comprender la estructura de un meteoroides y evaluar el peligro dependiendo de si se trata de un objeto sólido y compacto o el de una partícula extendida y porosa, ya que el perjuicio causado podría variar [5].

Para poder determinar la naturaleza física y química de los meteoroides, es importante considerar su interacción con atmósfera. Por esa razón, el desarrollo de un modelo dinámico es el primer paso necesario para poder desentrañar la estructura de un meteoroides a través de observaciones de sus curvas de luz. Entonces, la forma más lógica de llevarlo a cabo es mediante la resolución de las ecuaciones de la teoría de un solo cuerpo [5].

Aunque dicha la teoría tiene sus limitaciones, proporciona una buena idea a la hora de analizar la declinación de la pérdida de masa y la radiación visible de los procesos meteóricos.

El modelo no solo tiene validez en la Tierra, sino que también es aplicable para otras atmósferas como las de Marte o Venus. Además, también tiene aplicación para estructuras artificiales como los desechos espaciales orbitales. Por ello, el estudio de los meteoroides en atmósferas planetarias son la llave que permitirá ampliar nuestra comprensión de los fenómenos meteóricos, ya que nos da la posibilidad de probar los modelos actuales de ablación en circunstancias completamente diferentes [6].

Por lo tanto, primero hacemos una breve revisión de los meteoroides, donde expondremos tanto los diferentes tipos según su tamaño y composición, así como las distintas fases que experimentan conforme van penetrando en la atmósfera.

El segundo paso es centrarnos en la descripción de los distintos modelos atmosféricos que estarán implicados y a su vez, mostrando gráficamente la variación de la temperatura y densidad según la altura a la que nos situemos.

A continuación, se realiza un análisis para describir la teoría de un solo cuerpo, donde se establecen las ecuaciones que se utilizarán en las simulaciones. Todo ello desde simples conceptos de la física que vamos desarrollando en detalle para darle una explicación a cada ecuación.

Por último, las simulaciones son llevadas a cabo, donde se representa el comportamiento de los distintos parámetros como la masa, velocidad y brillo según la variación de unos u otros. Una vez realizado este estudio, se procede con la comparación entre los distintos modelos atmosféricos considerados en este trabajo.

2. Revisión de meteoroides

2.1. Origen

Recordemos que los cometas son planetesimales, es decir, cuerpos celestes que fueron agregados de los materiales que dieron lugar a la formación de los planetas. Estas estructuras existen en los discos protoplanetarios, que son granos de polvo que se mueven alrededor del Sol [7].

Cuando la Tierra se cruza con esta nube de polvo, sus partículas ingresan en la atmósfera a velocidades muy altas (de varios kilómetros por segundo), de modo que pueden alcanzar temperaturas bastante elevadas durante el proceso de entrada (de 1800 a 2000 K), e incluso llegar a evaporarse por completo. Por ello, la atmósfera terrestre se considera como un detector natural de meteoroides [8].

Entonces, cuando los meteoroides son interceptados por la atmósfera de la Tierra y a la vez, sus tamaños son relativamente pequeños, producirán una curva de luz durante parte de la caída debido a la combustión generada por la colisión del cuerpo con las moléculas del aire. Este fenómeno se conoce tradicionalmente como meteoro o estrella fugaz. Pero si un meteoro sobrevive al paso a través de la atmósfera terrestre y llega a impactar en la superficie de la Tierra, adquiere el nombre de meteorito [1].

Si esta manifestación tiene lugar de manera anual, se denomina lluvia de meteoros. Un ejemplo de este tipo de fenómeno astronómico son las conocidas como Perseidas, aunque también existen las Gemínidas, las Cuadrántidas y las Leónidas, que son unas de las más interesantes y han mostrado una gran actividad aproximadamente cada 33 años en los últimos 100 años. Esta lluvia de meteoros ocurre cuando la trayectoria de la Tierra se cruza con el rastro de polvo del cometa padre, denominado sendero [8, 9, 10].

En cambio, cuando hablamos de meteoros sin lluvia, es decir, que ocurre de forma puntual, entonces se denominan **meteoros esporádicos** [8, 11].

Y de acuerdo con su masa, la entrada de meteoroides pueden subdividirse en cuatro fenómenos al penetrar en nuestra atmósfera.

Meteoros

A este término nos referimos al típico meteoroide que se puede observar durante una lluvia de meteoros, cuyo tamaño oscila entre 0,05 mm y 20 cm. Conforme entra en las capas en la que la atmósfera es más densa, su temperatura aumenta muy rápido hasta el punto en el que llega a evaporarse la superficie del meteorito (aproximadamente unos 2200 K). Este proceso generalmente ocurre entre los 80 km y 90 km de altura, rango en el que su velocidad se reduce drásticamente, aunque el proceso de ablación puede seguir activo hasta la pérdida total de su masa, por lo que esto le puede llevar hasta varios kilómetros [8, 12].

Bolas de fuegos y bólidos

Este tipo de fenómeno corresponde a aquellos meteoroides con un tamaño superior a los 20 cm. Sin embargo, no se producirá la extirpación total de la masa del cuerpo antes de que su velocidad se reduzca a los 3 km/s y por tanto, no se podrá mantener a una temperatura de 2200 K. Este objeto empezará a experimentar un enfriamiento en su superficie, lo que dará lugar a una cubierta de material solidificado a partir de su capa derretida.

Como hemos dicho antes, al no haber suficiente energía para emitir luz, el cuerpo entrará en un régimen de vuelo oscuro. En este trayecto, el cual puede durar varios minutos, la velocidad tiende a aproximarse gradualmente a la velocidad de caída libre en un medio resistente que varía con la densidad del aire. Esta es la velocidad límite a alcanzar después de una reducción de la misma a partir de velocidades más altas [8, 12].

Partículas de polvo meteórico

En este caso, el fenómeno luminoso no es observable debido al reducido tamaño del meteoroide que penetra la atmósfera, que es menor de varias centésimas de milímetro y que sufre una ralentización de la velocidad de pocos kilómetros por segundo en una atmósfera enrarecida. Entonces, no se llega a alcanzar el proceso de evaporación debido a la ausencia de vapores calientes.

Por lo tanto, no se genera ningún fenómeno meteórico para este tipo de partículas, sino que sedimentan lentamente a través de la atmósfera y llegan a la superficie terrestre [8, 12].

Impactos explosivos

Entre estos últimos tipos de fenómenos se encuentran aquellos meteoroides con un tamaño bastante grande (de varios metros). La probabilidad de encontrar un fenómeno así debido a sus dimensiones es baja, por lo que se considera como una manifestación rara. La desaceleración que experimenta es pequeña, y gran parte de la masa no llega a evaporarse durante la penetración atmosférica, lo que provoca que golpee la superficie de la Tierra a unas velocidades supersónicas.

Incluso hasta el contacto con la superficie terrestre, los vapores de los meteoritos siguen emitiendo luz. Una vez producido el impacto, se forma un cráter explosivo en el lugar del incidente [8, 12].

Este tipo de fenómeno es de los más peligrosos porque tiene la capacidad de provocar graves daños en los edificios y a las personas de los alrededores como consecuencia de la generación de la onda expansiva [13].

2.2. Dinámica de interacción

Ya hemos visto los tipos de meteoroides según su tamaño al penetrar en la atmósfera terrestre. En esta subsección veremos los procesos que experimenta el meteoroides, desde su entrada hasta su impacto, donde hay cinco regímenes de movimiento de meteoroides.

Movimiento orbital

Se denomina movimiento orbital del meteoroides a la trayectoria que experimenta por el espacio, y que está perturbado por las fuerzas gravitatorias del Sol y de otros planetas. Dicho movimiento también se ve afectados por la irradiación de los rayos cósmicos y colisiones con otros cuerpos [12, 13] .

Fase de calentamiento inicial

Se produce cuando el meteoroides ingresa en la atmósfera, y se debe principalmente al choque con las partículas constituyentes del aire. Este fenómeno tiene principalmente lugar entre los 100 km y los 300 km de altura. Es un proceso muy rápido (de varios segundos), y conlleva un incremento de la temperatura de la superficie del cuerpo, ya que la transferencia de energía es proporcional al cubo de la velocidad. Por lo tanto, para cuerpos grandes no hay tiempo su-

ficiente para que se caliente el interior del meteoroides, mientras que para cuerpos pequeños se puede considerar un calentamiento uniforme en su totalidad.

También tiene lugar un proceso conocido como espalación, en el que la tensión superficial del meteoroides supera la resistencia del material, lo que conlleva la expulsión de fragmentos. En este proyecto, se consideramos la simulación de meteoroides pequeños, en el que el gradiente térmico se puede despreciar debido sus reducidas dimensiones, por lo que hay una uniformidad en el calentamiento. Además, la fragmentación tampoco se tiene en cuenta, ya que es una manifestación típica de los meteoroides grandes [12, 13].

Ablación

Este proceso es el siguiente que experimentan los meteoroides en su trayecto por la atmósfera. Tiene lugar cuando se inicia la espalación, proceso en el que la temperatura sigue aumentando hasta derretir la superficie del meteoroides, y llega a la fase de evaporación del cuerpo y de sus fragmentos. La temperatura de evaporación suele estar entorno a los 2500 K, aunque depende en mayor medida del material que estemos considerando. A partir de este punto, gran parte de la energía cinética se consume en la ablación, lo que implica un mayor esfuerzo para aumentar la temperatura. Esta es la etapa en la que podemos observar los espectros de emisiones de las líneas atómicas de los gases metálicos calientes.

Para cuerpos grandes, la desaceleración y la ablación compiten en el consumo de energía cinética. Si la velocidad consigue reducirse por debajo de los 3 km/s con una masa significativa, el cuerpo continuará cayendo pero sin emitir luz en un régimen de vuelo oscuro debido a la insuficiente energía cinética para calentar la superficie [12, 13].

Vuelo oscuro

Esta es la etapa de la trayectoria del meteoroides en el que la ablación se detiene debido a la falta de energía cinética. Por lo tanto, tiene lugar un enfriamiento exponencial, donde se produce la solidificación de la superficie y la creación de una delgada corteza que recubre el cuerpo.

En ausencia de viento y con una desaceleración de cientos de metros por segundo, el meteoroides experimentará un movimiento de caída libre en el que la velocidad disminuye de manera proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del aire.

Este vuelo suele tener una duración de varios minutos, y los distintos perfiles de viento pueden suponer un factor importante a la hora de la trayectoria [12, 13]. Sin embargo, en nuestro

trabajo no consideramos dichos perfiles por simplicidad.

Impacto

Es la última etapa de la trayectoria del meteoróide (ahora denominado meteorito, ya que impacta sobre la superficie terrestre). En cuanto a las velocidades de impacto, oscilan entre los 10 m/s y 100 m/s para el rango de masas entre 10 g y 10 kg.

El impacto deja como resultado un hoyo un poco más grande que el tamaño del mismo meteorito. Aunque las dimensiones del agujero pueden darnos algo de información sobre su tamaño aproximado, no nos otorga aspectos importantes sobre el movimiento del meteoróide antes de ingresar en la atmósfera, ya que los perfiles del viento pueden alterar la trayectoria en la etapa del vuelo oscuro en los últimos kilómetros.

Si la ablación hubiera continuado hasta impactar contra la superficie terrestre, la energía liberada podría dejar como resultado un cráter mucho más grande [12, 13].

2.3. Más fenómenos

Llamarada de meteoro

La llamarada de un meteoro se asocia al aumento repentino en su brillo a su paso por la atmósfera terrestre. Este fenómeno puede ser causado por una explosión y desintegración en una gran cantidad de fragmentos pequeños. Además, esta manifestación es típica en los meteoros de altas velocidades. Dos posibles explicaciones para esto son [12]:

- Fragmentación grande o discreta [12].
- Cambios en las circunstancias físicas que dan lugar a los procesos de evaporación, excitación e ionización [12].

Estela de meteoro

Este término hace referencia a la radiación emitida justo detrás del meteoro. Suele tener una duración de varios segundos, y sus dimensiones van desde los cientos de metros hasta varios kilómetros [12].

2.4. Composición

Que estos cuerpos hayan sido formados por una gran variedad de procesos de objetos planetarios diferentes es la causa de las distintas propiedades físicas y químicas que poseen. En cuanto a su composición, los meteoroides se pueden clasificar en tres grupos principales.

Meteoroides de hierro

Su composición es principalmente níquel y hierro. Destacan por su carencia de porosidad y gran densidad. Gran parte de estos meteoroides proceden del núcleo derretido de asteroides formados en las edades tempranas del Sistema Solar. Debido a la contención de hierro y su gran densidad, un núcleo metálico se forma en su centro [14].

La costra o capa de fusión de estos objetos suele ser marrón y fina, dando lugar a capas concéntricas rodeadas por un manto y una corteza de silicato. Los meteoroides de hierro también presentan superficies onduladas o estriadas debido al efecto de la ablación cuando penetran en la atmósfera de la Tierra [14].

El interior de estos cuerpos es plateado a causa de la cristalización del hierro, generando un patrón conocido como patrón de Widmanstätten [14].

Estos meteoroides nos pueden dar información sobre la formación de los núcleos de los planetas rocosos, ya que Mercurio, Venus, Marte y la Tierra comparten un tipo de estructura rocosa parecida [14].



(a) Meteorito de hierro [14].



(b) Estructura cristalina de meteorito de hierro [15].

Figura 1: Meteorito tipo hierro

Meteoroides de hierro rocosos

Esta clase de meteoroides se caracterizan por su composición de hierro-níquel y silicatos, y en los que se pueden encontrar algunas piedras semipreciosas. Representan menos del 2 % de los meteoritos hallados en la superficie terrestre. A su vez, se pueden clasificar en dos tipos dentro de esta categoría [16]:

■ Palasitas:

Las palasitas son un aglomerado de grandes cristales verdes, amarillos o marrones, formada por silicatos de magnesio y hierro llamados *olivinos*. Estos cristales se encuentran incrustados en una aleación plateada brillante de metal [14, 16, 17].

Algunas hipótesis afirman que, de forma similar a la de los meteoroides de hierro, se formaron en asteroides derretidos y por ello, también poseen un núcleo de hierro denso. Otras opciones afirman que se originaron en la fusión de impacto de asteroides ricos en olivino del cinturón de asteroides.

También hay teorías sobre su origen proveniente del borde entre el núcleo metálico y el manto de la Tierra, el cual también es rico en olivino. Por ello, podrían revelar bastante información en cuanto a la formación de nuestro planeta y los demás planetas rocosos [14, 16, 17].



Figura 2: Meteorito tipo palasita[18].

■ Mesosideritas:

Las mesosideritas son un tipo de roca cuya composición son fragmentos de minerales de de silicato ígneo pero solidificado y clastos metálicos.²

²rocas formadas por rocas más antiguas

Se forman por el choque entre dos asteroides, en el que las rocas se mezclan con el metal fundido. Por lo tanto, pueden proporcionar aspectos sobre las condiciones para que los asteroides se fundan y den lugar a núcleos de hierro [14, 16, 17].



Figura 3: Meteorito tipo mesosiderita [19].

Meteoroides rocosos

Esta clase representan la mayor parte de los meteoritos encontrados. Se caracterizan por su composición principal de minerales de silicato. Hay dos tipos en esta subsección:

- **Condritas** Su composición principal son gotas de minerales de silicato, metales de hierro-níquel y pequeños granos de sulfuros [20]. Al considerarse como las rocas más primitivas del Sistema Solar, implican una pista importante a la hora de estudiar su formación [13, 14, 16, 17, 21].



Figura 4: Meteorito tipo condrita[21].

■ Acondritas

A diferencia de las condritas, estas se caracterizan por haber estado involucradas en los procesos de fusión y diferenciación en los asteroides de los cuales proceden.

Son rocas de tipo ígneo, por lo que en algún momento del pasado llegaron a fundirse en magma. En ellas, se crea una estructura de capas concéntricas después de que el magma se haya enfriado y cristalizado. Este proceso se denomina diferenciación ígnea.

Las acondritas también son capaces de aportarnos información sobre la formación de los planetas y sus estructuras internas [13, 14, 16, 17, 21].



Figura 5: Meteorito tipo acondrita [14].

3. Interacción de meteoros con la atmósfera

En esta sección veremos las características más interesantes a la hora de considerar la interacción del meteorito con la atmósfera en su trayectoria. Dicha influencia dependerá del flujo en el que se encuentre el meteorito, y estará indicado por el llamado **número de Knudsen**, el cual nos da una descripción del régimen en términos de parámetros adimensionales.

El número de Knudsen se define como $K_n = \frac{l}{R}$, y representa la relación entre el camino libre medio de la molécula l y un término adimensional característico del cuerpo R , que en el caso de una esfera es su radio [5, 22].

3.1. Regímenes de interacción

Cuando el número de Knudsen es alto y mayor que 10 ($K_n > 10$), se considera que el meteorito se encuentra en el llamado **régimen molecular libre**, por el cual una partícula interactúa con átomos individuales atmosféricos pero sin interacciones secundarias entre los átomos ablatados, ya que la superficie del meteorito no está protegida por una capa de vapor [5, 22].

Este régimen se aplica a los meteoritos débiles, es decir, cuando es lo suficientemente pequeño o su altitud de vuelo es lo suficientemente alta. En este flujo, los choques entre las partículas son insignificantes, pero conforme la densidad atmosférica aumenta, el camino libre medio tiende a disminuir, y en el que primeramente hay una formación de una capa viscosa y después una onda de choque [22].

Esta es la razón por la que a medida que avanza el meteorito, se llega a una región de transición frente al meteorito, que modifica la interacción entre este y la atmósfera, caracterizado por números de Knudsen entre 10 y 0.01. Este régimen se denomina **flujo de transición**. Actualmente no existe una forma analítica para calcular la dinámica de un meteorito en estas condiciones [5, 22].

Siguiendo en el avance de trayectoria, llegamos finalmente al último régimen que puede experimentar el meteorito, denominado **régimen de flujo continuo**. Viene indicado por un número de Knudsen inferior a 0.01 ($K_n < 0.01$) y tiene lugar una onda de choque frente al objeto.

Este régimen se utiliza para la modelización del proceso de ablación en grandes meteoroides mediante el uso de modelos hidrodinámicos [22].

Para meteoroides de menos de un centímetro de tamaño por encima de los 100 km de altura, se puede considerar la interacción dentro de un régimen de flujo molecular libre [5, 22].

Como el estudio de la interacción de las partículas de aire con el meteoroides no es suficiente, ya que las moléculas reflejadas y evaporadas supondrá un efecto importante, en 1983, Bronshten introdujo una modificación en la fórmula para tener en cuenta la concentración de moléculas evaporadas y reflejadas, así como el número de partículas entrantes debido a la diferencia entre la velocidad de reflejada y la velocidad del meteoroides [22]. La expresión que explica este aspecto esta dado por la ecuación:

$$K_{nr} = \frac{v_r}{v} K_n \quad (1)$$

donde v es la velocidad del meteoroides y v_r es la velocidad de las moléculas reflejadas y evaporadas [22].

En la figura 6 se muestra los distintos regímenes y el número de Knudsen para cada uno.

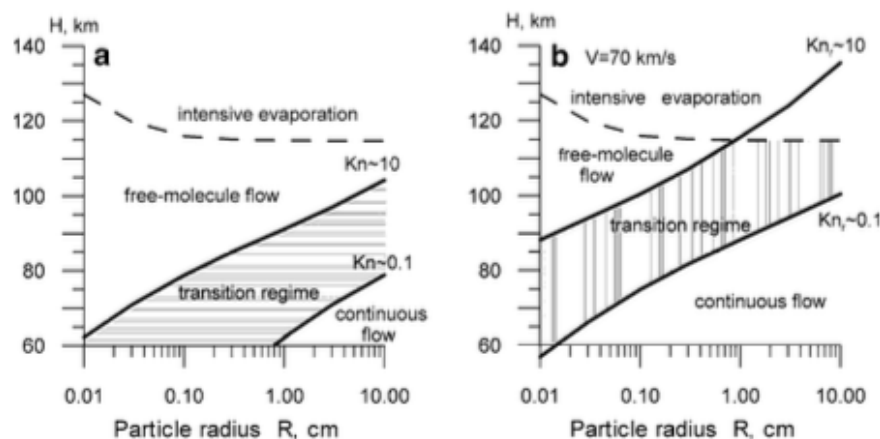


Figura 6: Gráfica *a*: Regímenes en aire no perturbado. Gráfica *b*: Regímenes en aire perturbado (Considerando una velocidad del meteoroides $V = 70$ m/s) [22].

Se puede apreciar que la fórmula modificada de Knudsen implica un desplazamiento del límite del flujo molecular libre a mayores altitudes. Esto se debe a que a mayor altura, la densidad es baja y la velocidad de evaporación es mucho mayor. También hay que tener en cuenta que la tasa de evaporación contribuye a un aumento de densidad alrededor del meteoroides, de modo que el camino libre medio disminuye. Por lo tanto, a mayor camino libre medio, más grande es

el número de Knudsen.

La velocidad del meteoróide también contribuye al desplazamiento de los límites de los regímenes a mayores alturas [22].

3.2. Modelos atmosféricos

Elegir un modelo atmosférico es muy importante, ya que en la trayectoria del meteoróide, tanto la ablación como la fuerza de arrastre dependerán de cual se elija. En este trabajo realizamos las comparaciones de los efectos que tiene sobre el meteoróide en su interacción con la atmósfera. También tendremos en cuenta que la densidad atmosférica puede variar según la altitud, la ubicación geográfica, la estación del año y hora del día, aunque este último es aún más significativo si se trata de un planeta u otro [3, 6].

Atmósfera isotérmica

Se usará este perfil para ilustrar de forma básica la naturaleza la ablación de los meteoroides. Por ello, dentro de este modelo entra en juego una expresión exponencial [23]. Para obtener la expresión de la densidad sabemos que, debido al peso del gas, la presión debe de descender con altura según la ecuación general de la hidrostática:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -z\rho(z)g \quad (2)$$

donde $P(z)$ indica la presión a una determinada altura z , $\rho(z)$ es la densidad a dicha altura y g es la aceleración de la gravedad ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). De acuerdo con la ecuación de estado del gas ideal, la presión está relacionada con la densidad como:

$$PV = nRT \rightarrow P = \frac{nRT}{V} \rightarrow P = \frac{mRT}{MV} \rightarrow P = \frac{\rho RT}{M} \quad (3)$$

donde V el volumen, R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura, n es el número de moles y M es la masa molecular del aire ($M = 0.0289644 \text{ kg/mol}$).

Despejando ρ de la expresión anterior, obtenemos:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (4)$$

y sustituyendo en (2) nos queda:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\frac{PMg}{RT} \rightarrow \frac{dP(z)}{P} = -\frac{Mg}{RT} dz \quad (5)$$

Para $T \neq T(z)$, es decir, para el caso de atmósfera isotérmica y cuyo valor es la temperatura promedio en la troposfera $T_{pr} = 288$ K:

$$\frac{dP(z)}{P} = -\frac{Mg}{RT_{pr}} dz, \quad \text{donde} \quad H = \frac{RT_{pr}}{Mg} \quad (6)$$

Si integramos la expresión anterior, obtenemos:

$$P = P_0 \exp^{-z/H} \quad (7)$$

y sustituyendo por la ecuación de los gases ideales, obtenemos la expresión final:

$$\rho = \rho_0 \exp^{-z/H} \quad (8)$$

donde z es la altura a considerar, $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ hace referencia a la densidad atmosférica a nivel del mar ($z = 0$) y H es una constante, la cual se denomina **escala de altura**³ [24]. Para el caso de la Tierra, ese valor es de 8.5 km [23].

Esta ecuación es bastante adecuada para simular el comportamiento más básico de interacción de meteoroides en una atmósfera isotérmica y homogénea, es decir, cuya composición no cambia con la altitud [23].

Por tanto, la primera simulación se llevó a cabo con este modelo simple de perfil atmosférico, aunque en este caso, es un modelo limitado y muy básico. Sin embargo, es muy útil a la hora de estudiar la variación de los distintos parámetros que influyen en el proceso de ablación.

³La escala de altura es la altura a la que hay que elevarse en una atmósfera para que la presión atmosférica disminuya en un factor $e = 2,718182$.

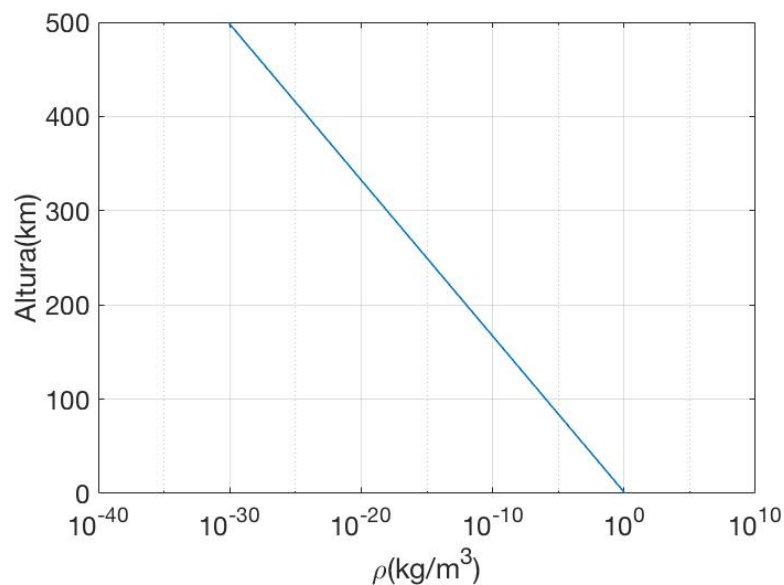


Figura 7: Variación de la densidad con la altura de modelo isotérmico.

Modelos NRLMSISE-00 y MSIS-E-90

En esa subsección se presenta dos modelos empíricos para modelizar la atmósfera terrestre. Dichos modelos son de clase MSIS, es decir, datos procedentes de espectrómetros de masas ⁴ de varios satélites y radares de dispersión [25]. Los más utilizados por la comunidad científica son:

- **Modelo MSIS-E-90**

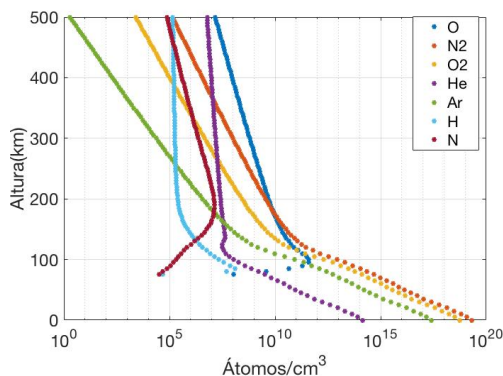
Presentamos brevemente el modelo atmosférico MSIS-E-90. Dicho modelo nos permite el cálculo de parámetros atmosféricos como la densidad de masa, las densidades de los componentes principales y los perfiles de temperatura [25, 13, 28, 26].

- **NRLMSISE-00**

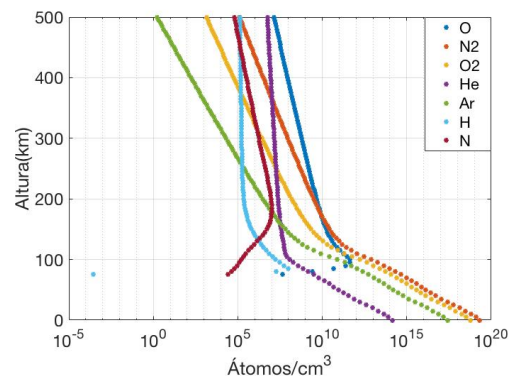
Este modelo fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación Naval de EE. UU, y es una mejora del modelo MSIS-E-90. Al igual que el modelo anterior, este nos permite también obtener la densidad del aire, las densidades moleculares y la temperatura desde la superficie terrestre hasta el espacio. Su utilidad reside a la hora de la investigación espacial internacional, especialmente en los cálculos de desintegración de satélites de órbita baja [29, 27, 30, 31].

⁴Método de análisis para obtener la distribución de las moléculas de una sustancia en función de su masa

En las gráficas de la figura 8, se representa la distribución de las densidades moleculares de los distintos elementos según la altura.



(a) Densidad molecular MSIS-E-90.

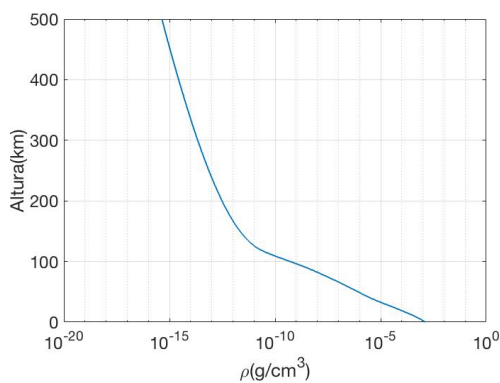


(b) Densidad molecular NRLMSISE-00.

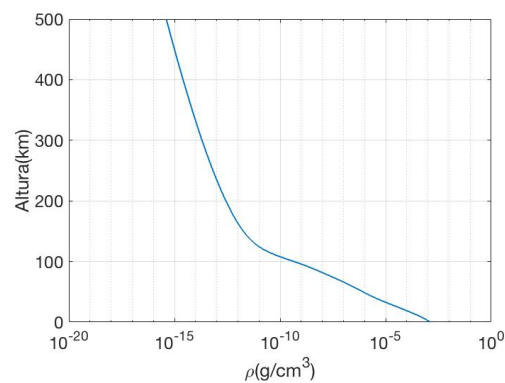
Figura 8: Comparación de densidades moleculares (MSIS).

Como puede apreciarse, en cuanto a la composición de los distintos elementos presentes en la atmósfera, ambos modelos comparten bastantes similitudes.

Para el caso de la temperatura y densidad, en la misma gráfica establecemos la comparación de dichas magnitudes.



(a) Densidad modelo MSIS-E-90.



(b) Densidad modelo NRLMSISE-00.

Figura 9: Comparación de perfiles de densidad (MSIS).

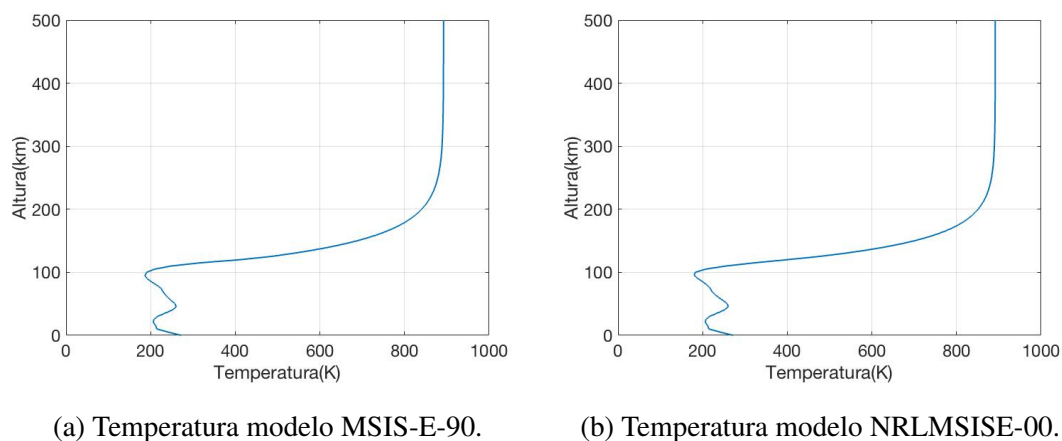


Figura 10: Comparación de perfil de temperatura (MSIS).

Por ello, elegimos los dos perfiles para estudiar la interacción del meteoróide en su trayecto a través de la atmósfera. Lo que interesa en este estudio es que el perfil de la atmósfera se ajuste lo más posible a un modelo real, de modo que encontremos una percepción más realista del comportamiento de la dinámica de los meteoroides.

Modelo Atmósfera Estándar de 1976

El Modelo de Atmósfera Estándar de 1976 es una aproximación idealizada para la descripción del perfil atmosférico terrestre, en el cual se establece la variación de la presión, temperatura, viscosidad y densidad en función de la altura [32].

Aunque se publicó en 1958, surgieron posteriores versiones en 1962, 1966 y 1976. Toda la información del modelo viene recogida en un libro publicado por la NOAA⁵, NASA⁶ y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Dichos parámetros y ecuaciones utilizadas están documentados en el libro oficial *US Standard Atmosphere, 1976* [32].

La descripción de la temperatura en función de la altura está dada por la siguiente expresión (temperatura en K) [33]:

⁵National Oceanic and Atmospheric Administration

⁶National Aeronautics and Space Administration

$$T(z) = \begin{cases} 288.15K - 6.5(K \cdot km^{-1}) \cdot z & si \quad z \leq 11km \\ 216.65K & si \quad 11km < z < 20km \\ 216.65K + 1(K \cdot km^{-1}) \cdot (z - 20km) & si \quad 20km < z < 32km \\ 228.65K + 2.8(K \cdot km^{-1})(z - 32km) & si \quad 32km < z < 47km \\ 270.65K & si \quad 47km < z < 51km \end{cases} \quad (9)$$

En cambio, para la presión (en kPa) tenemos las siguientes ecuaciones [33]:

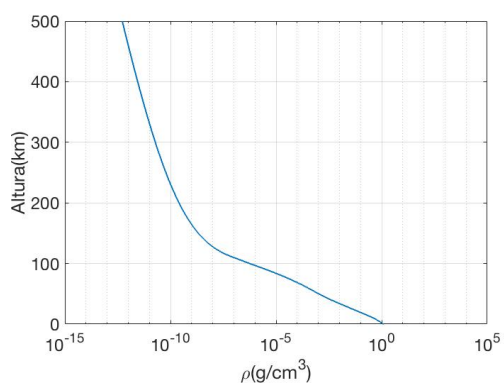
$$P(z, T) = \begin{cases} 101.325 \cdot (288.15/T)^{-5.255877} & si \quad z \leq 11km \\ 22.632 \cdot e^{-0.1577 \cdot (z-11km)} & si \quad 11km < z < 20km \\ 5.4749 \cdot (216.65/T)^{34.16319} & si \quad 20km < z < 32km \\ 0.868 \cdot (228.65/T)^{12.2011} & si \quad 32km < z < 47km \\ 0.1109e^{-0.1262(z-47km)} & si \quad 47km < z < 51km \end{cases} \quad (10)$$

Considerando aire seco, es decir, aire formado por una mezcla de varios gases pero excluyendo el vapor de agua, la ley de los gases ideales es:

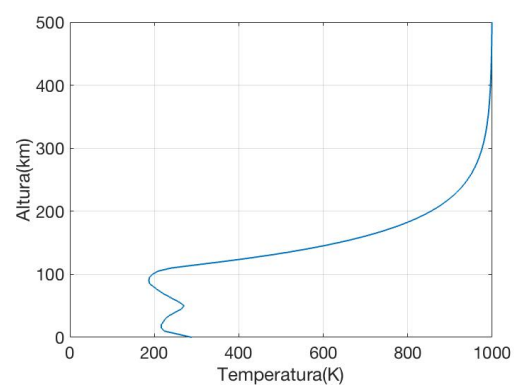
$$P = R \cdot \rho \cdot T \rightarrow \rho = \frac{P}{RT} \quad (11)$$

En nuestro caso, las variables que más nos interesan son la presión y la temperatura, que aplicando la ley de los gases ideales, se puede obtener la expresión para la densidad ρ en cada intervalo de altura.

Sin embargo, aunque en las ecuaciones nos limitan hasta una altura de 51 km, los datos de este perfil atmosférico que usamos en nuestra simulación provienen de [34], donde la altura se puede ampliar incluso hasta los 500 km.



(a) Densidad de modelo estándar 1976.



(b) Variación temperatura de modelo estándar 1976.

Figura 11: Perfiles de densidad y temperatura (Modelo estándar 1976).

4. Física de la dinámica de meteoroides

En esta sección trataremos los aspectos físicos de la interacción de la dinámica de meteoroides desde un punto de vista teórico mediante sus ecuaciones e interpretaciones. Primero mostraremos los fenómenos térmicos mediante el balance energético, ya que se llevará a cabo la aplicación de simple termodinámica. En segundo lugar, explicaremos las ecuaciones de la dinámica de los meteoroides, donde se mostrará las ecuaciones de la teoría de un solo cuerpo, y que conectarán con las ecuaciones de balance energético para poder formar en su conjunto una correcta modelización .

4.1. Balance energético

Conceptos termodinámicos

Por la primera ley de la termodinámica, la energía total de un sistema se conserva, y que la única manera en la que esa cantidad de energía pueda variar es a través de intercambios energéticos .

Esta primera ley también se puede aplicar a un volumen de control, es decir, una región del espacio que está limitada por una superficie a través la cual puede pasar la masa.

Por tanto, una aclaración de la primera ley para el análisis en la transferencia de calor es:

El aumento en la cantidad de energía térmica y mecánica almacenada en el volumen de control debe ser igual a la cantidad de energía térmica y mecánica que ingresa al volumen de control, menos la cantidad de energía térmica y mecánica que sale del volumen de control, más la cantidad de energía térmica que se genera dentro del volumen de control [35].

También se puede plantear la ley sobre la base de una tasa en la que se aplica a un intervalo de tiempo dt . Por lo tanto, las medidas deben ser en W .

En otras palabras, este concepto se expresa como :

La tasa de aumento de la energía térmica y mecánica almacenada en el volumen de control debe ser igual a la tasa a la que la energía térmica y mecánica ingresa al volumen de control,

menos la tasa a la que la energía térmica y mecánica sale del volumen de control, más la tasa a la que la energía térmica se genera dentro del volumen de control [35].

Ahora definimos E_{st} , que representa la energía térmica y mecánica almacenada en el volumen de control, y que está dado por:

$$\Delta E_{st} = E_{in} - E_{out} + E_g \quad (12)$$

Y que en términos de tasa, se expresa como :

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g \quad (13)$$

donde:

- E_g = Generación de energía térmica [35].
- E_{in} y E_{out} = La entrada y salida de energía térmica y mecánica a través de las superficies de control [35].

Sabemos que la energía mecánica se define como la suma de energía cinética y potencial. En cuanto a la energía interna, consta de tres contribuciones: **componente sensible** (movimiento de traslación, rotación y vibración de los átomos y moléculas de la materia), **componente latente** (cambio de fase entre los estados sólido, líquido y vapor), **componente químico** (referencia a la energía almacenada en los enlaces químicos entre átomos) y un **componente nuclear** (relacionada con la fuerzas de unión en el núcleo) [35].

Nos queda el término de generación de energía E_g , que está relacionada con la conversión de otras formas de energía interna (química, eléctrica, electromagnética o nuclear) a energía térmica [35].

Esta ley nos permitiría determinar una temperatura desconocida. Por lo tanto, en nuestro problema del balance energético del meteorode hay que considerar distintas fuentes y sumideros o pérdidas de energía, la cual se traducirá en una ecuación diferencial.

Ecuación de balance energético

Para poder calcular la temperatura del meteorode, hay que recurrir a principios de la conservación de energía. Por simplificación, suponemos un modelo aplicado a meteoroides pequeños, de tal forma que se calienten de manera uniforme en todo el cuerpo y despreciando la existencia de gradientes térmicos [5, 10, 22, 36].

El cambio de la energía almacenada se debe al cambio de temperatura dT en un tiempo dt , el cual se puede calcular a partir del cambio de energía dE en dicho intervalo de tiempo.

$$\frac{dE_{almacenada}}{dt} = \frac{mcdT}{dt} \quad (14)$$

donde m es la masa del meteoróide afectada por el calentamiento y c es el calor específico del material.

En cuanto a la energía de entrada, se deberá en principal medida a la energía cinética de los choques inelásticos que sufre el meteoróide con las partículas de aire de la atmósfera. Es decir, si nos situamos en el sistema de referencia del meteoróide, la energía cinética de las moléculas de la atmósfera es $\frac{1}{2} m_a v^2$, donde v es la velocidad del meteoróide y m_a es la masa total de los átomos atmosféricos [5, 10, 22, 36, 37].

La masa de moléculas que se encuentra el meteoróide de densidad ρ_m con sección transversal S y velocidad v en un intervalo de tiempo dt es :

$$vS\rho_a dt = vA \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_a dt \quad (15)$$

donde ρ_m es la densidad de masa atmosférica y $S = A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3}$, con A el factor de forma del objeto, que para cuerpos esféricos, su valor es 1.22 [5].

Por tanto, la energía de entrada en este problema es la energía cinética aportada por esta cantidad de masa encontrada por unidad de tiempo:

$$\frac{dE_{cinetica}}{dt} = \frac{\Lambda}{2} v^3 A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_a \quad (16)$$

donde Λ es el coeficiente de transferencia de calor. Este coeficiente expresa la fracción de energía cinética que se transfiere al meteoróide en el proceso de calentamiento. Es de tipo adimensional y su valor oscila entre 0 y 1 [5, 10, 22, 36].

En cuanto a la generación de energía térmica, podemos no considerarla, ya que solo tendremos en cuenta la energía almacenada y las fuentes y pérdidas de energía .

Por último, respecto a los sumideros de energía, haremos énfasis en dos contribuciones.

La primera será la pérdida de energía por radiación de un cuerpo de superficie S_a , la cual está dada por la **Ley de Stefan-Boltzmann** [38, 39].

Sabemos que su ecuación es $P = S_a \epsilon \sigma T^4$, donde P es la energía por unidad de tiempo, ϵ es la emisividad del objeto y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$) [38, 39].

Para el caso de emisión de radiación de energía hacia un entorno mas frío con temperatura T_a , entonces se escribe como [38] :

$$P = S_a \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (17)$$

Por tanto, en nuestro problema se asumirá que T_a será la temperatura de la atmósfera, la cual irá variando según el modelo de perfil atmosférico considerado.

Así que el primer sumidero de energía (por enfriamiento) por unidad de tiempo está dado por:

$$\frac{dE_{\text{enfriamiento}}}{dt} = S_a \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (18)$$

La segunda contribución a los sumideros de energía está representado por la pérdida de energía debido a la evaporación del material del meteorode.

Para la ablación de una cantida de masa dm se requiere una cantidad de energía que está dado por la ecuación del **calor latente**⁷ [40].

En nuestro caso, el diferencial de energía dE para lograr esto estará dado por :

$$dE = L dm \quad (19)$$

donde L hace referencia al calor latente del material para el cambio de estado [40]. En nuestro caso, como queremos que pase de sólido a gaseoso, estará representado por la suma del calor latente de fusión y el de vaporización [5, 10, 22, 36].

$$L = L_f + L_{vap} \quad (20)$$

Entonces, el meteoro perderá energía a una razón de $\frac{dE}{dt}$, que es lo mismo que $\frac{L dm}{dt}$. La perdida de energía por unidad de tiempo asociada a este sumidero de energía (evaporización) será:

$$\frac{dE_{\text{evap}}}{dt} = \frac{L dm}{dt} \quad (21)$$

⁷Energía o calor necesario que debe recibir un cuerpo para que cambie de estado

Aplicando la ordenación de la ecuación (9), la cual indicaba la relación entre la energía de almacenamiento, la generación de energía térmica y las fuentes y sumideros de energía, nos queda la siguiente expresión [5]:

$$\underbrace{mc \frac{dT}{dt}}_1 = \underbrace{\frac{\Lambda}{2} v^3 A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_m}_2 - \underbrace{S_a \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4)}_3 - \underbrace{L \frac{dm}{dt}}_4 \quad (22)$$

donde:

- 1 : Cambio de energía almacenada por unidad de tiempo (calentamiento).
- 2 : Cambio de energía de entrada debido a la energía cinética transmitida por las partículas de la atmósfera por unidad de tiempo .
- 3 : Cambio de energía de salida por enfriamiento radiativo por unidad de tiempo.
- 4 : Cambio de energía de salida mediante la consumición de energía en los cambios de fases por unidad de tiempo.

Si despejamos la derivada temporal de la temperatura de (21), nos queda la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} \left[\frac{\Lambda}{2} v^3 A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_m - S_a \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) - L \frac{dm}{dt} \right] \quad (23)$$

Esta ecuación diferencial de primer orden se resolverá en conjunción con las siguientes ecuaciones diferenciales de la teoría de un solo cuerpo de la siguiente subsección.

4.2. Teoría de un solo cuerpo

A continuación se dará el conjunto de ecuaciones diferenciales que se usarán para describir la variación de parámetros del meteoróide con el tiempo. En estas ecuaciones entran en juego la ablación, la deceleración y cambio de altitud de movimiento de un cuerpo no fragmentable, donde se asume una trayectoria lineal y fuerza gravitatoria despreciable [4, 36].

Ecuación de ablación

Trataremos la pérdida de masa del meteoróide debida a la interacción con las partículas de la atmósfera. Por ello, introducimos el concepto de ablación como al proceso físico en el que

el meteorioide pierde masa de la superficie a causa de energía cinética recibida a medida que atraviesa la atmósfera hacia altitudes más bajas [3, 10].

La teoría clásica de ablación nos dice que la pérdida de masa tiene una relación directamente proporcional a la energía cinética del meteorioide, donde esta tasa de variación de la masa está dada por [5]:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{A\Lambda}{2L} \left(\frac{m}{\rho_m}\right)^{2/3} \rho_a v^3 \quad (24)$$

El signo negativo significa que la masa va disminuyendo conforme pasa el tiempo, es decir, el meteorioide se hace cada vez más pequeño.

Ecuación de deceleración

En dinámica de fluidos, se utiliza la ecuación de arrastre para obtener la fuerza que experimenta un cuerpo en oposición al movimiento a través de un fluido y que viene dado por [41, 42]:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2 \quad (25)$$

donde ρ_a es la densidad del fluido, C_d es el **coeficiente de arrastre aerodinámico**⁸, v es la velocidad del objeto y S el área de sección transversal [41].

Según la 2ª Ley de Newton, en la que $F = ma$, y que la aceleración de caída es $\frac{F}{m}$, donde a su vez se expresa como $\frac{dv}{dt}$, entonces tenemos :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \quad (26)$$

En un principio, habría que considerar las dos fuerzas que experimenta el meteoro: la gravitatoria y la de arrastre. Por tanto, en nuestro caso :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_d}{m} - \frac{F_g}{m} \quad (27)$$

Como $F_g = mg$, nos queda :

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{C_d \rho_a v^2}{2m} S + g \cos \theta \quad (28)$$

⁸Coeficiente adimensional que depende de la geometría del objeto

donde el signo menos indica que la fuerza de arrastre tiende a frenar el cuerpo. La variable θ hace referencia al ángulo cenital⁹. Como se tratará con velocidades muy altas, el término gravitatorio se puede despreciar [5, 42, 43].

El coeficiente de arrastre aerodinámica se puede expresar también como $C_d = 2\Gamma$, donde Γ es la fracción del impulso del flujo de aire que se convierte en desaceleración del meteoróide [10].

A su vez, $S = A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3}$, por lo que nos queda finalmente la ecuación de deceleración [5]:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\Gamma \rho_a v^2}{m} A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \quad (29)$$

Ecuación de altura

La expresión del cambio de altura z del meteoróide respecto al tiempo viene dado por:

$$\frac{dz}{dt} = -v \cos(\theta) \quad (30)$$

Esta es la última de las ecuaciones necesarias para poder resolver en conjunto con las ecuaciones de deceleración, energía y ablación, aunque tiene más importancia a la hora de obtener la densidad del aire en cualquier punto de la trayectoria del meteoróide [5]. Por ello, según la altura a la que nos encontremos, pues dicha densidad tendrá un valor según el modelo atmosférico considerado.

4.3. Magnitudes absolutas y aparentes

Para el cálculo de la luminosidad de las estrellas y de los objetos que emiten luz en el cielo, mediremos una intensidad u otra. A esta luminosidad se le llamará **magnitud** o **magnitud visual** [44, 45].

En Astronomía se usan muchos los conceptos de **Magnitud absoluta** y **Magnitud aparente**. Por tanto, para la magnitud visual tendremos dos categorías: Magnitud visual absoluta y magnitud visual aparente [44, 45].

■ Magnitud visual absoluta

Hace referencia al brillo que tendría el objeto si nos situamos a una distancia concreta de él. Para el caso de las estrellas, esta distancia es de 10 pc (32 años luz), es decir, sería la luminosidad que mediríamos si nos encontráramos a una distancia de 32 años luz. Para

⁹Ángulo que se mide desde la vertical en el lugar que nos situamos

cometas y asteroides del Sistema Solar, en vez de ser 10 pc como distancia de referencia, serán 1 UA¹⁰. En nuestro caso, como estamos hablando de meteoros en nuestro espacio aéreo, esa distancia de referencia la tomaremos como $h_o = 100 \text{ km}$ [6, 44].

■ Magnitud visual aparente

Es la luminosidad o brillo que percibiríamos de un objeto en el cielo sin tener en cuenta su distancia a la Tierra, su temperatura o tamaño. Por convenio, cuanto más brillante sea el objeto, menor será el valor de la magnitud aparente (puede tomar un valor positivo o negativo) [44].

Para el caso de meteoros, la fórmula que nos indica la magnitud visual aparente estará dada por [6]:

$$m_v = 6,8 - \log_{10} \left(I \frac{h_o^2}{h^2} \right) \quad (31)$$

donde I es la intensidad luminosa o poder visual irradiado y viene tiene como expresión :

$$I = \tau \frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} \quad (32)$$

con τ como la eficiencia luminosa. Además, si $h = h_o$, se obtiene la magnitud visual absoluta M_v [6, 44, 45].

Esto nos servirá para comprobar su brillo según su valor de magnitud. Por ejemplo, para que sea visible al ojo humano, se tiene que cumplir que $m_v \leq +5$ [47].

¹⁰Unidad Astronómica. Distancia media entre el Sol y la Tierra cuyo valor es de 150 millones de kilómetros.

5. Modelización

Las ecuaciones diferenciales mencionadas en los apartados anteriores se resolverán mediante **Simulink**, una interfaz de Matlab que utiliza bloques gráficos de operaciones matemáticas para los cálculos.

El problema a resolver es un sistema de ecuaciones diferenciales con las ecuaciones de balance energético, ablación, deceleración, densidad y altura:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{1}{mc} \left[\frac{\Lambda}{2} v^3 A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_m - S_a \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) - L \frac{dm}{dt} \right] \\ \frac{dm}{dt} &= -\frac{A\Lambda}{2L} \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_a v^3 \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{\Gamma \rho_a v^2}{m} A \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \\ \frac{dz}{dt} &= -v \cos(\theta) \\ \rho_a &= \rho_a(z) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

donde $\rho_a(z)$ cambiará según el modelo atmosférico a considerar.

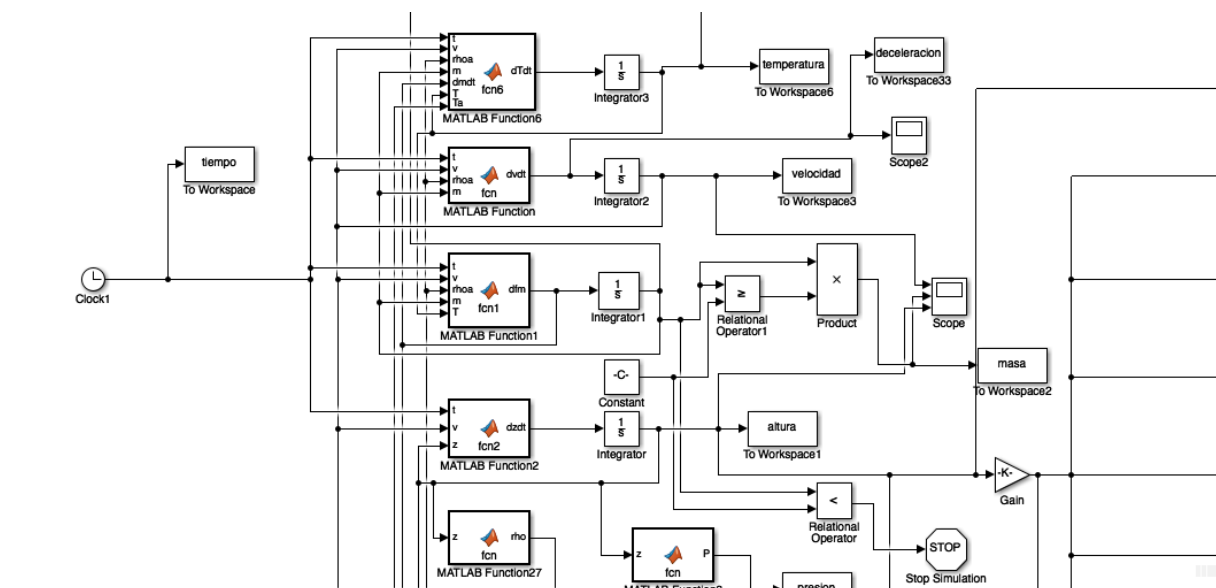


Figura 12: Diagrama de bloques para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales.

En Simulink, cada bloque contiene líneas de código que constituyen una función. En nuestro caso, serán la serie de comandos que definen cada ecuación diferencial. A estos bloques los llamamos bloques de función.

A la salida de cada bloque de función, se coloca un bloque integrador, el cual integrará la función presente en el bloque función conectado. Además, las condiciones iniciales se pueden establecer en los bloques integradores y en nuestro caso, serán las condiciones iniciales de masa, velocidad, temperatura y altura.

Todos los bloques de funciones tienen en común la variable temporal, la cual está representada por un bloque de reloj, y que será el encargado de iniciar el tiempo para la integración. La tolerancia de tiempo establecida es $dt = 1 \cdot 10^{-8}$ s, pero de paso variable.

Por último, quedan los bloques de almacenamiento, que están conectados con los bloques integradores, y donde quedarán guardadas todas las variables que hemos considerado. Para el caso del bloque integrador de la masa, hemos establecido una serie de bloques de condición lógica de forma que, si la masa se reduce por debajo de un cierto valor, entonces ejecutará un bloque especial, denominado bloque STOP, el cual pondrá fin a la simulación. Por ello, cuando la masa del meteoróide llega a $m = 10^{-12}$ kg, se considerará que se ha desintegrado totalmente y el bloque STOP será activado.

En la simulación con los modelos atmosféricos que implican bases de datos (MSIS-E-90, NRLMSISE-00 y el modelo atmosférico de 1976), las densidades a cada altura determinada serán introducidas en los bloques de funciones donde la densidad atmosférica sea una variable dentro de la función. Dicho valor de densidad será calculado por interpolación, es decir, según la altura a la que se encuentre el meteoróide, el programa elegirá el valor de densidad atmosférica entre la base de datos correspondiente para esa altura.

El método de integración numérica que utiliza por defecto esta interfaz es **Runge-Kutta**¹¹. En Matlab hay una amplia gama de subrutinas de ecuaciones diferenciales : **ode45**, **ode23**, **ode11s**, **ode15s**, **ode23s**, **ode23t**, **ode23tb** y **ode15i** [49].

En nuestro caso elegimos **ode45**, ya que es la más usada por los estudiantes. Aparte de ser una buena subrutina de integración, se caracteriza por su buena precisión.

¹¹Método iterativo para la resolución de EDO (Ecuaciones Diferenciales Ordinarias)

5.1. Verificación de funcionalidad del código

Demostraremos el correcto funcionamiento de nuestro código para la resolución de un problema de dinámica de meteoros planteado por *Australian Space Academy* [6]. En dicha página web, llevan a cabo la simulación mediante QBASIC para un meteoróide de masa 10^{-3} g, con una densidad de 500 kg/m^3 y rango de velocidades $[15,65] \text{ km/s}$ en una atmósfera isotérmica.

La tabla 1 enumera los valores iniciales usados para los parámetros que se utilizan en la implementación informática del modelo.

Símbolo	Descripción	Valor numérico
Γ	Coeficiente de arrastre	0.5 - 1.0
A	Factor de forma	1.22
τ	Eficiencia luminosa	0.001
θ	Ángulo cenital	45°
L	Calor de ablación	3000000 J/kg

Tabla 1: Constantes implicadas en las ecuaciones diferenciales de la dinámica de meteoroides.

Representamos las curvas de luz con nuestro código implementado para Simulink y comparamos con los resultados de [6].

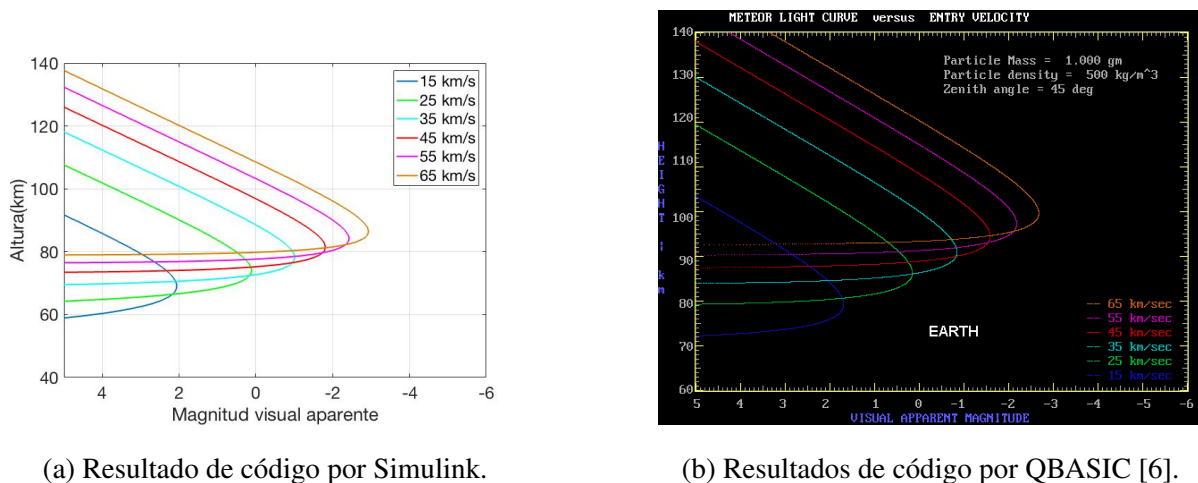


Figura 13: Altura vs Magnitud visual aparente.

Se puede observar que los máximos de curvas de luz coinciden en el valor de la magnitud visual aparente. Sin embargo, hay ligeras diferencias en cuanto a la altitud a la que tiene lugar dicho fenómeno. Esta inexactitud se debería en parte a que en [6], el método usado para la si-

mulación se basa en resolución de ecuaciones diferenciales por diferencias finitas, mientras que en nuestro código de Simulink, el método aplicado es Runge-Kutta, con mucha más precisión.

A pesar de estas pequeñas diferencias, se puede asumir que el algoritmo implementado en este proyecto tiene una correcta validez y, por tanto, se pueden llevar a cabo distintos estudios de los efectos en la dinámica de meteoroides en la siguiente sección.

6. Resultados y discusiones

En esta última sección, llevamos a cabo un análisis y estudio para entender mucho mejor cómo afectan el cambio de unos parámetros mientras que otros se mantienen constantes. Por ello, elegimos el modelo isotérmico debido a su sencilla complejidad. Otra razón para elegir este modelo es que, en física siempre es más fácil estudiar los fenómenos en un modelo idealizado y después, extrapolarlo a modelos o situaciones más complejas.

En nuestro caso, esas situaciones complejas están representadas por la situación de la dinámica de meteoros en atmósferas con características más realistas y adaptadas a una atmósfera real.

En la tabla 2, establecemos los valores numéricos de los distintos parámetros y constantes en común que entrarán en juego en la simulación para los tres tipos de meteoroides a considerar.

Parámetro	Descripción	Roca helada	Piedra cóndrita	hierro
ρ_m	Densidad	1000 kg/m ³	3.4·10 ³ kg/m ³	7800 kg/m ³
c	Calor específico	4.2·10 ³ J/kgK	9.6·10 ² J/kgK	450 J/kg·K
L	Calor ablación	2.6·10 ⁶ J/kg	6.7·10 ⁶ J/kg	6.5·10 ³ J/kg

Tabla 2: Valores de ρ , c y L para los distintos tipos de meteoroides [10]

Recordando las secciones anteriores, en el modelo isotérmico consideramos un modelo de atmósfera simple, cuya temperatura promedio es la presente en la troposfera ($T = 288$ K), y con una densidad que disminuye exponencialmente con la altura.

6.1. Efecto de la velocidad

Se procede al análisis de ablación de un meteoroide de piedra condrita para el rango de velocidades $[11, 70]$ km/s para una masa de $m = 10^{-5}$ kg. De esta manera, estudiaremos cómo afecta el cambio de velocidades en la dinámica del meteoroide en cuanto a la ablación, deceleración y brillo.

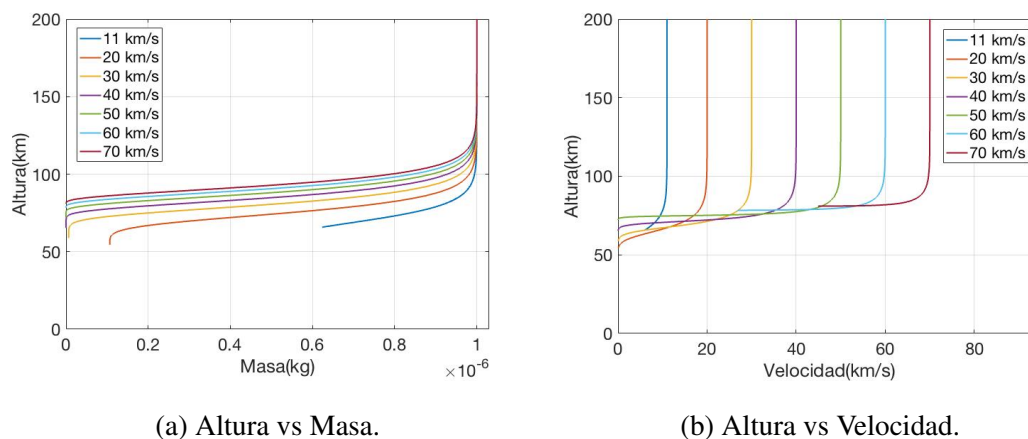


Figura 14: Estudio de la ablación y la deceleración según la velocidad.

Se puede observar en la figura 14a, que los meteoroides con mayor velocidad de entrada tienen lugar una eliminación de masa mucho más temprana. Esto se debe a que el aumento de la velocidad conlleva un incremento de la tasa de ablación por la dependencia cúbica de la energía de entrada con respecto a la velocidad, según la ecuación (24). También se aprecia en la figura 14b que, a pesar de establecer una comparación de un meteoroide a distintas velocidades, la deceleración drástica tiene lugar sobre el mismo rango de alturas (entre los 80 km y 90 km). La causa de esto es que el meteoroide se encuentra con las capas más densas de la atmósfera, lo que influye de manera muy significativa en el proceso de ablación.

Por tanto, observando ambas gráficas, se puede afirmar que proceso de ablación consume masa antes que velocidad, por lo que, cuando dos tercios de la masa se han desintegrado, la velocidad realmente comienza a reducirse significativamente.

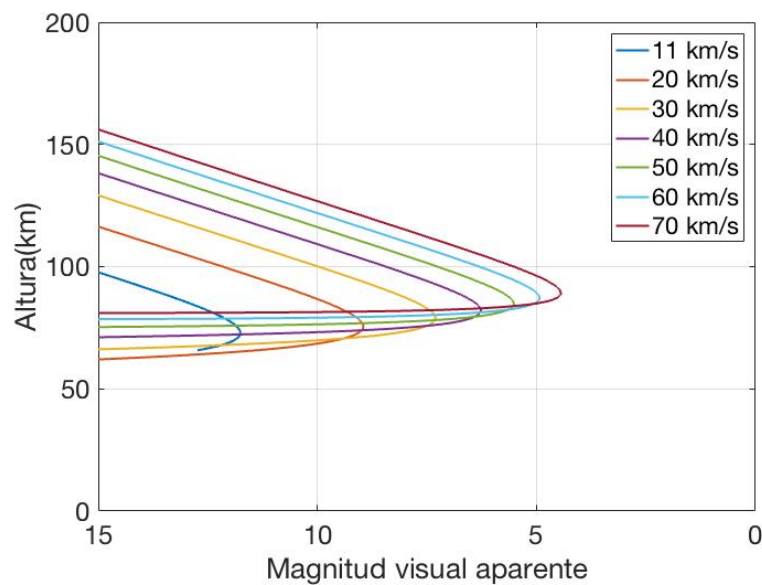


Figura 15: Altura vs Magnitud visual aparente

Para el caso de la magnitud visual aparente, se puede observar que, a excepción de los meteoroides de velocidad de entrada de 60 km/s y 70 km/s, los demás presentan curvas de luz por debajo del umbral permitido para que sean visibles a simple vista.

También se puede apreciar que, a una mayor velocidad de entrada, menor será la altura a la que aparecerá su punto de brillo máximo. Sin embargo, la velocidad no afecta de manera muy significativa a esta magnitud ya que, en la gráfica 15, un aumento de la misma supone un desplazamiento vertical de este pico máximo pero de forma débil. Esto se muestra reflejado en la diferencia de altura entre el pico máximo del meteoroide más rápido y el más lento, que es de apenas unos 20 km.

Otro factor interesante es el desplazamiento horizontal del pico máximo según la velocidad considerada, que conforme aumenta este valor, esta distancia entre picos se hace más corta. Esto también queda en evidencia en la misma gráfica 15, donde la diferencia del brillo máximo entre el meteoroide de 11 km/s y 20 km/s es de aproximadamente +3, mientras que la diferencia entre el meteoroide de 60 km/s y 70 km/s es de apenas +0.5.

6.2. Efecto del tipo de material

Para este análisis, también se estudiará cómo es afectada la ablación, la deceleración y brillo si esta vez, el parámetro que modificamos es la densidad del meteoroide.

Por tanto, analizaremos el caso para tres tipos de material: roca helada, condrita y hierro con

una masa y velocidad única ($m=1 \cdot 10^{-5}$ kg y $v=40$ km/s). Para este tipos de materiales, hay que tener en cuenta que cada uno tiene sus propios valores de calor específico y calor de ablación.

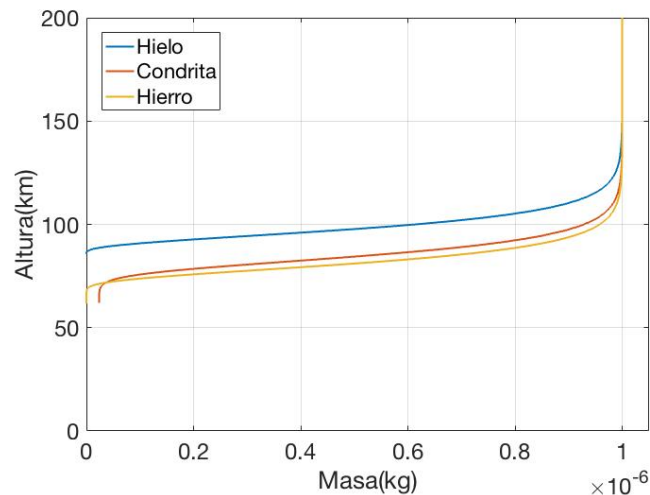


Figura 16: Altura vs Masa.

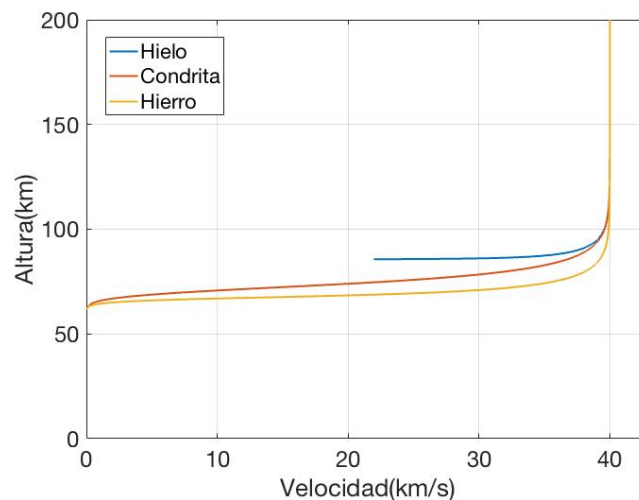


Figura 17: Altura vs Velocidad.

Podemos observar que un meteoroides de tipo hielo cuya capacidad calorífica, calor de ablación y densidad son más bajos que los otros dos materiales, la ablación tiene lugar mucho antes en su trayecto a través de la atmósfera.

Esto se traduce en que los meteoroides con densidades mayores son objetos más compactos y, por lo tanto, implican una mayor distancia recorrida a través de la atmósfera debido a una alta consistencia y resistencia a la ablación.

En cuanto al análisis de la velocidad, el de tipo hielo empieza a experimentar la deceleración mucho antes que la condrita y el hierro. La razón reside en el hecho de que el meteoróide de roca helada perderá masa mucho antes debido a sus propiedades, por lo que los 2/3 de la masa inicial serán ablacionados a mayor altura y, por ende, la presente deceleración drástica tendrá lugar a mayores altitudes.

Sin embargo, a pesar de tratar con materiales distintos, se puede observar que la gran deceleración sigue ocurriendo cerca de los 100 km de altura para los tres tipos de materiales.

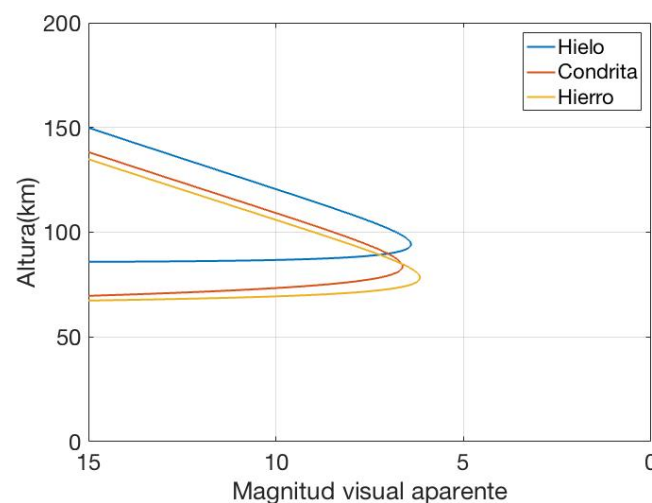


Figura 18: Altura vs Magnitud visual aparente.

En cuanto a la magnitud visual, no tiene lugar la condición de visibilidad debido a que ningún pico está por debajo de +5. Se puede apreciar que los cambios en el material meteoróide también afectan al brillo máximo. Para la partícula de hierro y condrita, este pico se da a alturas más bajas que la de roca helada, la cual es la menos densa de todos.

Por lo tanto, se puede llegar a la conclusión que, una mayor densidad del material implica una menor altura a la que tiene lugar el máximo de esta magnitud.

Otra conclusión que podemos obtener es que, para objetos más compactos, el brillo aumenta, pero ligeramente. Una explicación a este fenómeno es la capacidad de viajar más distancia durante la ablación, lo que da lugar a mayor energía recibida por parte de las colisiones con las moléculas del aire, debido a un acercamiento a capas más densas de la atmósfera.

Por ello, a pesar de haber grandes diferencias en propiedades como la densidad, el calor específico y calor de ablación, los cambios de densidad afectan de manera débil a la magnitud visual aparente, ya que la gráfica demuestra que la diferencia de altura entre máximos es relativamente baja, de apenas unos 10 km entre cada pico. Además, la diferencia de magnitud entre

estos picos, es decir, la diferencia en el desplazamiento horizontal es aún más baja, de apenas +0.5.

6.3. Efecto de la masa

En este apartado queremos ver el comportamiento de las mismas variables que hemos estudiado en los análisis anteriores, pero tomando la masa como el parámetro a controlar. Consideraremos un mismo tipo de meteoróide condrita, con velocidad de entrada de 40 km/s.

Este análisis tendrá lugar para cinco masas diferentes: 10^{-3} kg, 10^{-4} kg, 10^{-5} kg, 10^{-6} kg y 10^{-7} kg.

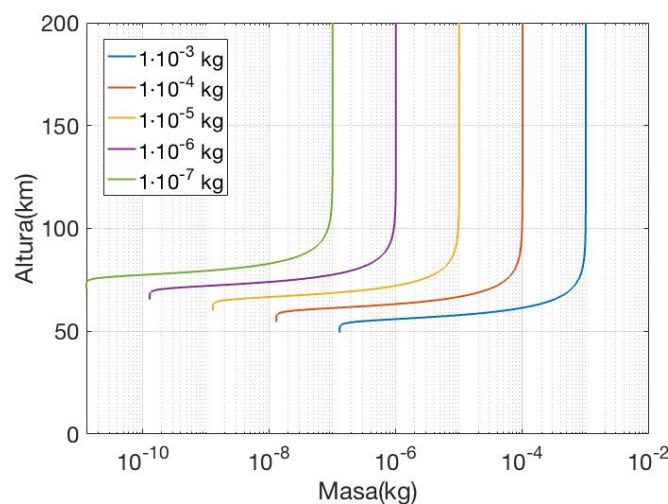


Figura 19: Altura vs Masa (escala logarítmica).

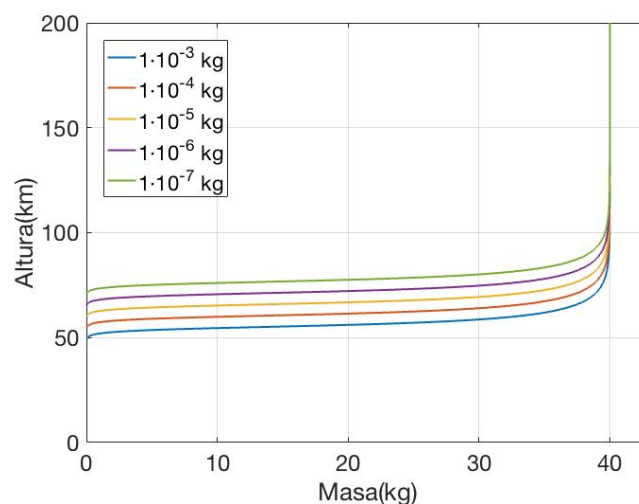


Figura 20: Altura vs Velocidad.

Según la figura 19, los cuerpos con mayor masa resistirán mayor tiempo en el proceso de ablación que los más ligeros. Esto se debe a que, al estar en las mismas condiciones de densidad y velocidad, solamente aquellos meteoroides más masivos recorrerán mayor distancia a través de la atmósfera, debido a que requerirán más tiempo para la extirpación de su masa, la cual es más significativa a bajas altitudes, especialmente por debajo de los 100 km.

En cuanto a la velocidad, vemos que para el meteoroides de menor masa ($1 \cdot 10^{-7}$ kg), la reducción drástica de la velocidad tiene lugar mucho antes que para los de mayor masa. La razón de esto es principalmente que, en la fórmula de la deceleración, el término de la masa de (28) influye mucho más en la pérdida de velocidad y por ello, los cuerpos menos masivos perderán velocidad a mayor altura. También es observable que dicha reducción drástica de la velocidad tiene lugar entre los 70 km y 90 km de altitud.

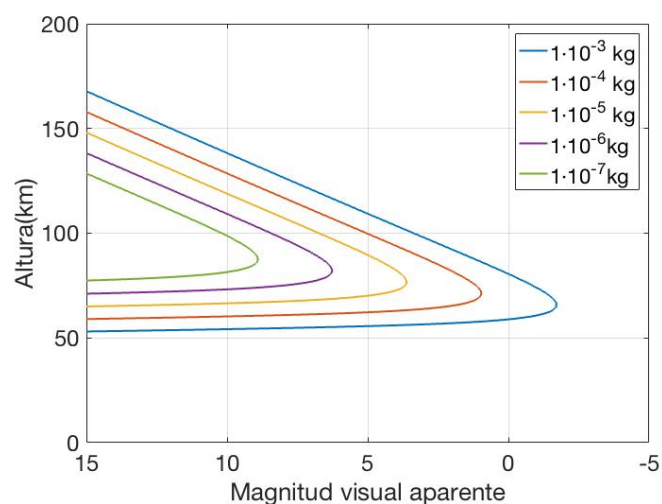


Figura 21: Altura vs Magnitud visual aparente.

Por último, las masas de 10^{-3} kg, 10^{-4} kg y 10^{-5} kg serán visibles para el ojo humano, ya que son las únicas que traspasan el valor de la magnitud visual aparente por debajo de +5. Por ejemplo, para el meteoroides de masa 10^{-3} kg, su curva de luz será visible entre los 55 km y 110 km de altura. A su vez, el meteoroides de masa 10^{-4} kg es visible entre los 60 km y 100 km, mientras que el de 10^{-5} kg sólo será visible durante un periodo más breve, aproximadamente entre los 70 km y 90 km de altura.

En cuanto a los meteoroides de 10^{-7} kg y 10^{-6} kg, sus curvas de luz siguen sin ser visibles. Por lo tanto, se puede apreciar que la masa influye de manera muy significativa en la magnitud visual aparente, ya que tiene un efecto predominante a la hora de calcular los picos máximos de brillo. En la gráfica 21 queda demostrado que, para meteoroides más pesados, las curvas de luz

serán más brillantes.

En nuestro caso, podemos decir que para meteoroides de masa menores del orden de 10^{-5} kg en estas condiciones, sus curvas de luz podrían no ser visibles al ojo humano. También nos damos cuenta que, a mayor masa del meteoroide, la altura de brillo máximo tiende a altitudes más bajas. Además, la distancia horizontal entre los máximos de brillo para cada masa mantienen una diferencia de +2.5.

6.4. Comparación entre modelos atmosféricos

Una vez entendidas las propiedades básicas con el modelo anterior, procederemos a simular la dinámica de un meteoroide bajo la influencia de cuatro modelos atmosféricos: isotérmico, modelo estándar de 1976, el modelo NRLMSISE-00 y el modelo MSIS-E-90.

El programa se ejecutará para un meteoroide de piedra condrita de masa $m = 10^{-6}$ kg con velocidad de entrada de 40 km/s para realizar la simulación en igualdad de condiciones, y estudiar cómo influye cada tipo de modelo atmosférico con la dinámica de los meteoros.

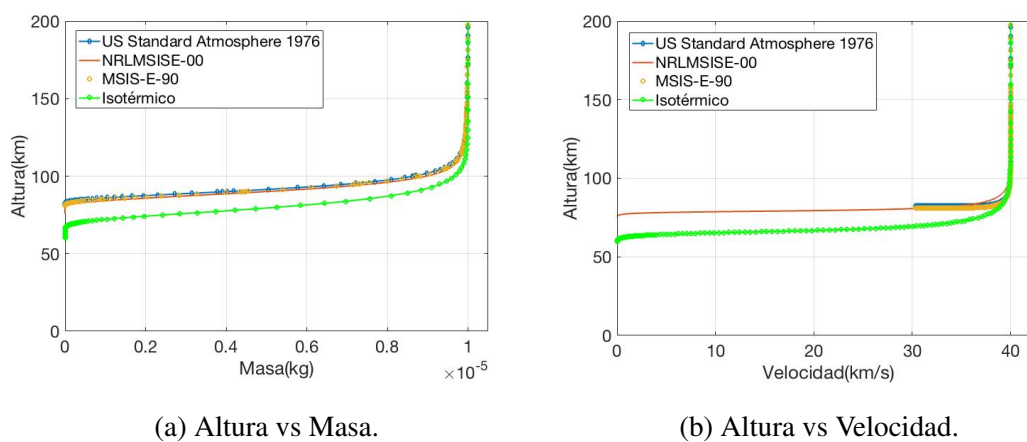


Figura 22: Estudio de la ablación y la deceleración según el modelo atmosférico.

Se puede observar en la gráfica 22a que, para el modelo de atmósfera estándar de 1976 y los dos modelos tipo MSIS, los resultados en cuanto a la ablación son bastante similares. Aunque hay una diferencia con esta pérdida de masa respecto al modelo isotérmico, el rango de alturas a la que se produce mayor parte de este fenómeno sigue oscilando entre los 80 km y 90 km.

Para el caso de la velocidad, hay también una similitud con los tres modelos empíricos, donde la tendencia de la deceleración drástica es prácticamente la misma. Sin embargo, el meteoroide simulado en atmósfera isotérmica sufre esta repentina deceleración a menos altura que

en los otros casos.

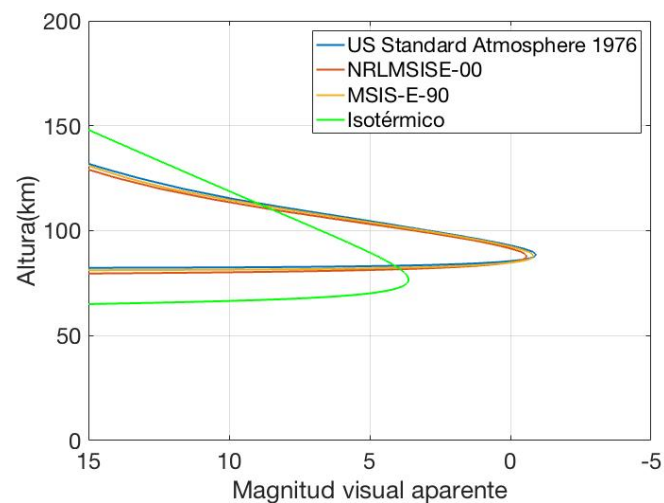


Figura 23: Altura vs Magnitud visual aparente

Por último, si estudiamos el brillo de las curvas de luz del meteoróide en los cuatro perfiles atmosféricos, podemos apreciar que el meteoróide en la atmósfera isotérmica presenta su máximo brillo a la menor altura de todas. El modelo de 1976 y los modelos MSIS muestran su pico máximo aproximadamente a la misma altura de 80 km.

En cuanto al desplazamiento horizontal del pico máximo, hay una diferencia significativa de +4.5 entre el modelo isotérmico y los otros modelos empíricos. Además, el brillo máximo del modelo NRLMSISE-00 es ligeramente menor que los de MSIS-E-90 y el de 1976, con una diferencia de +0.2 pero sigue habiendo un mayor brillo en la curva de luz para los modelos empíricos en comparación con el modelo isotérmico.

7. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo, hemos tratado de estudiar los fundamentos de la física de meteoros sobre la ablación, deceleración y brillo mediante simulación numérica.

Aplicando las ecuaciones de un solo cuerpo, hemos procedido a simular el comportamiento de variables como la masa, la velocidad y densidad, en las que, variando una de ellas y manteniendo constantes las demás, se puede apreciar la tendencia del comportamiento de los distintos procesos de su dinámica.

En primer lugar, una conclusión clave de nuestro estudio es que, cuanto más velocidad de entrada posea el meteoroides, antes tiene lugar la ablación. Considerando el rango típico de velocidades de meteoroides [11,70] km/s, los meteoroides más rápidos se desintegrarán mucho antes que los más lentos. Sin embargo, serán más brillantes en el firmamento y más probables de ser observados a simple vista.

Además de la velocidad, el tipo de material también es un factor clave en esta dinámica, donde se concluye que para meteoroides de tipo metálicos u otros pero de gran gran densidad, su tasa de pérdida de masa será menor que los meteoroides de tipo roca helada, cuya densidad es más baja. No obstante, para la ablación, deceleración y brillo, la densidad establece diferencias ligeras en dichos análisis.

Por último, un cambio en la masa inicial del meteoroides, tiene mayor repercusión en la magnitud visual aparente, donde destaca la importancia de que a mayor masa, mayor poder visual irradiado. Esto significa que, desde un punto de vista experimental, la masa inicial es la variable más influyente a la hora de la observación de los meteoros en el cielo. En este trabajo, establecemos un umbral aproximado de 10^{-5} kg para el cual, con una velocidad promedio (40 km/s), el típico meteoroides de condrita será visible para el ojo humano.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones, también damos a entender que la densidad atmosférica es un factor clave en la dinámica de estos cuerpos, ya que el modelo isotérmico no tiene en cuenta las variaciones de densidad y temperaturas atípicas que los otros modelos empíricos sí consideran. Además, el modelo isotérmico deja de ser efectivo a alturas mayores que los 150 km, donde encontramos una atmósfera muy enrarecida y, por ello, este afectamiento significativo en la tasa de ablación y deceleración, el cual se ve reflejado en las ecuaciones.

En definitiva, en este proyecto se ha llevado a cabo el objetivo de la dinámica de los meteoroides en la atmósfera de nuestro planeta. Sin embargo, este estudio es también tratable para atmósfera de otros planetas, donde la llave más importante para llevarlo a cabo es un perfil atmosférico, ya sea de forma analítica o mediante base de datos recogidos por satélite.

Un gran proyecto de interés es una ampliación de estos conceptos a meteoroides más grandes, donde la complejidad es mucho mayor ya que se tendrán en cuenta factores como la fragmentación, en el que aparte de una aplicación de la teoría de este trabajo, hay que usar conceptos estadísticos en las distribuciones del número de fragmentos y sus tamaños respectivos.

Desde un punto de visto termodinámico, también se puede hacer una ampliación de conceptos, como por ejemplo los gradientes térmicos, por el cual, la ecuación de balance energético tiene que combinarse con la ecuación del calor debido a que, en ese caso, la temperatura del centro del meteoroides puede diferir significativamente respecto a la de la superficie.

Otra ampliación interesante es la realizada en muchos artículos, en la que la pérdida de masa se debe también a la vaporización controlada por la presión de vapor.

Y un último aspecto de cara a futuros proyectos, es la inclusión de calores de ablación no constantes, donde se tendrá en cuenta sus distintos valores según la zona del meteoroides que se esté ablacionando.

Referencias

- [1] Diferencia entre meteoritos, meteoroides y meteoros (2018).
<https://astroaficion.com/2018/08/10/diferencia-entre-meteoritos-meteoroides-y-meteoros/>
- [2] TEMA 8: Cuerpos menores del sistema solar (2021).
<http://www.astronomia.edu.uy/depto/planetologia/materiales/JAFCapitulo8.pdf>
- [3] Rogers, L.A., Hill, K.A. y Hawkes, R.L. (2004). Mass Loss Due to Sputtering and Thermal Processes in Meteoroid Ablation. *Planetary and Space Science*, 53:1341-1354.
- [4] Ceplecha, Z y REVELLE, D. O. (2005). Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere. *Meteoritics & Planetary Science*, 40:35–54.
- [5] Campbell-Brown, M.D. y Koschny, D. (2004). Model of the ablation of faint meteors. *Astronomy Astrophysics*, 418:751–758.
- [6] Australian Space Academy. METEOR FLIGHT THROUGH THE ATMOSPHERE.
<https://www.spaceacademy.net.au/watch/debris/metflite.htm>
- [7] Wikipedia (2020). Planetesimal. <https://es.wikipedia.org/wiki/Planetesimal>.
- [8] Abe, S. (2009). Meteoroids and Meteors – Observations and Connection to Parent Bodies. *Lecture Notes in Physics*, 758:129–166.
- [9] Wikipedia (2021). Leonids. <https://en.wikipedia.org/wiki/Leonids>.
- [10] McAuliffe, J.P. y Christou, A. (2005). Modelling meteor ablation in the venusian atmosphere. *Icarus*, 180:8-22.
- [11] Hamilton, C.J. (1997-2000). Meteoroides y Meteoritos.
<https://solarviews.com/span/meteor.htm>
- [12] Ceplecha, Z., Borovicka, J., Graham Elford, W., Revelle, D.O., Hawkes, R.L., Porubcan, V. y Simek, M. (1998). METEOR PHENOMENA AND BODIES. *Space Science Reviews*, 84:327–471.
- [13] Cayón Domingo, O. (2020). *Study: Numerical model of the trajectory of meteoroids*. Final Degree Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

[14] Lotzof, K. Types of meteorites.

<https://www.nhm.ac.uk/discover/types-of-meteorites.html>

[15] NASA Science Solar System Exploration Skip Navigation. Iron meteorite (2009).

<https://solarsystem.nasa.gov/resources/438/iron-meteorite/>

[16] Kring, D.A. (1998). The Structure and Composition of Meteorites.

https://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/meteorites/structure/

[17] Stony-Iron Meteorites.

<https://www.meteorites-for-sale.com/stony-iron-meteorites.html>

[18] Technical University Munich (2020).

<https://archaeologynewsnetwork.blogspot.com/2020/07/how-stony-iron-meteorites-form.html>

[19] David Darling. mesosiderite. <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/mesosiderite.html>

[20] Wikipedia (2021). Condrita.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Condrita>.

[21] Wikipedia (2021). Acondrita.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Acondrita>.

[22] Popova, O. (2004). METEOROID ABLATION MODELS. *Earth, Moon, and Planets* , 95: 303–319.

[23] Trabajo Práctico Especial. http://users.df.uba.ar/gsolovey/fisica2/tp_especiales/Atmosfera%20isotermica

[24] Wikipedia (2020). Atmósfera terrestre.

https://es.wikipedia.org/wiki/Atmósfera_terrestre.

[25] MSISE-90 (Mass Spectrometer - Incoherent Scatter) Model of the Upper Atmosphere (2020). <https://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/msise90.html>

[26] Community Coordinated Modeling Center. MSIS-E-90 Atmosphere Model.

https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php

- [27] Soo Kim, J. (2020). *BRIDGING METHOD FOR THE JB2006 AND NRLMSISE-00 THERMOSPHERIC DENSITY MODELS IN THE ALTITUDE RANGE OF 140 KM THROUGH 200 KM*. Final Degree Thesis, The Pennsylvania State University.
- [28] Jiang, H. y Huang, C. (2001). MSISE90 atmospheric density model and its application to the GPS radio. *Yunnan Observatory*, 86, No.2:26-30
- [29] Wikipedia (2021). NRLMSISE-00. <https://en.wikipedia.org/wiki/NRLMSISE-00>.
- [30] Picone, J.M., Hedin, A.E. y Drob, D.P. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(A12).
- [31] Community Coordinated Modeling Center. NRLMSISE-00 Atmosphere Model.
<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
- [32] U.S. Standard Atmosphere 1976.
https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/us_standard.html
- [33] Stull, R. (2017). *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. Capítulo 1, Sundog Publishing LLC.
- [34] Carmichael, R. (2021). Properties Of The U.S. Standard Atmosphere 1976.
<https://www.pdas.com/atmos.html>
- [35] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. y Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Capítulo 1.3, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- [36] Carrillo Sánchez, J.D. 2017). *METEORIC ABLATION IN PLANETARY ATMOSPHERES*. Final Master, Thesis University of Leeds.
- [37] Flynn, G.J (1989). Atmospheric Entry Heat of Micrometeorites. *Lunar and Planetary Institute*, 673-682.
- [38] Wikipedia (2021). Ley de Stefan-Boltzmann.
https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann.

[39] Ley de Stefan-Boltzmann.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/stefan.html>

[40] Nucleo visual. Calor latente: Qué es, fórmula y ejercicios.

<https://nucleovisual.com/calor-latente-que-es-formula-y-ejercicios/>

[41] Wikipedia (2021). Drag equation. https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation.

[42] Holterman, H.J. (2003). Kinetics and evaporation of water drops in air. *IMAG*, 67

[43] Aula fácil (2020). Ángulo cenital y la elevación solar.

<https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-termica-1/angulo-cenital-y-la-elevacion-solar-l37810>.

[44] Herrera, D. La magnitud de las estrellas.

<https://astroaficion.com/2017/01/19/magnitud/>

[45] Magnitud visual. https://astronomia.fandom.com/wiki/Magnitud_visual.

[46] Tanesifunes. A4. estrellas, parte 2 (2018).

<https://www.slideshare.net/TanesiFunes/a4-estrellas-parte-2-107249846>.

[47] Wikipedia (2020). Magnitud aparente.

https://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_aparente.

[48] Tropea, A (2015). Una de espías astronómicos: en busca de la conexión Magnitud absoluta - Luminosidad.

<http://lacienciaconhumor.blogspot.com/2015/10/una-de-espias-astronomicos-en-busca-de.html>

[49] Choose an ODE Solver.

<https://es.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html>

A. Elementos de código utilizados en Simulink



Clock

Bloque de reloj: Genera el tiempo de simulación



Constant

Bloque de constantes: Establece un valor de salida de valor constante.



MATLAB Function

Bloque función: Almacena los comandos de las funciones a considerar.



**Relational
Operator**

Bloque comparador. Establece relación lógica entre los valores de entrada



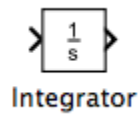
Gain

BLoque de ganancia: Multiplica el valor de entrada por una ganancia establecida.



From File

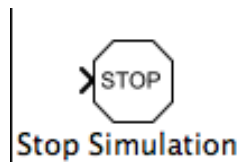
Lector de datos: Carga los datos del espacio de trabajo.



Bloque integrador: Integra la variable de la entrada del bloque.



Almacenador de datos: Guarda los datos obtenidos de la simulación



Bloque STOP: Finaliza la simulación al recibir una orden lógica.

B. Diagramas y comandos utilizados en la simulación

Ecuación balance energético

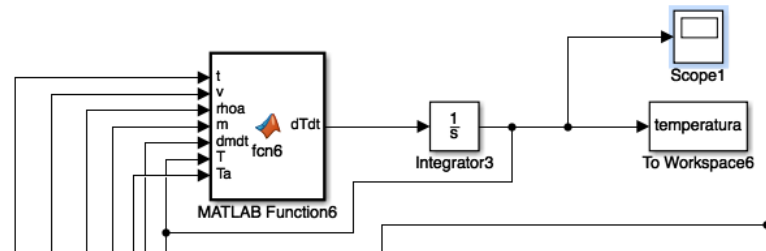


Diagrama en Simulink.

```

1 function dTdt = fcn6(t,v,rhoa,m,dmdt,T,Ta)
2
3 c=9600;
4 A=1.2;
5 L=6700000;
6 rhom=3400;
7 e=0.9;
8 q=5.67e-8;
9 Htc=1.0;
10
11 dTdt= 1/(c*m)*(0.5*Htc*rhoa*v^3*(m/rhom)^(2/3)*A - ...
12 4*e*q*(T^4-Ta^4)*(m/rhom)^(2/3)*A - L*dmdt);

```

Comandos en Matlab.

Ecuación de deceleración

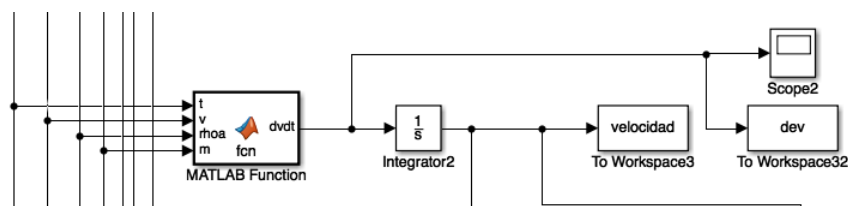


Diagrama en Simulink.

```

1 function dvdt = fcn(t,v,rhoa,m)
2 Dc=1.0;
3 A=1.2;
4 rhom=3400;
5
6
7 dvdt=-(1/m)*Dc*rhoa*v^2*A*(m/rhom)^(2/3)
8
9

```

Comandos en Matlab.

Ecuación de ablación

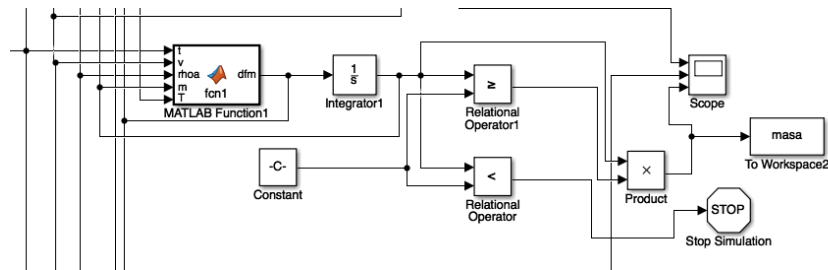


Diagrama en Simulink.

```

1  function dfm = fcn1(t,v,rhoa,m,T)
2  Ha=6700000;
3  Htc=1.0;
4  rhom=3400;
5  A=1.2;
6
7      dmdt=-(1/(2*Ha))*A*Htc*rhoa*v^3*(m/rhom)^(2/3);
8
9
10
11
12  dfm=dmdt;

```

Comandos en Matlab.

Ecuación de pérdida de altura

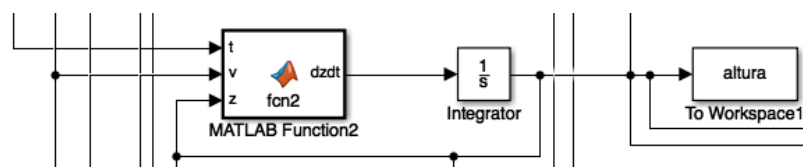


Diagrama en Simulink.

```

1  function dzdt= fcn2(t,v,z)
2
3
4  theta=45;
5  dr=pi/180;
6
7
8  dzdt=-v*cos(dr*theta);
9
10
11

```

Comandos en Matlab.

Ecuación de densidad (atmósfera isotérmica)

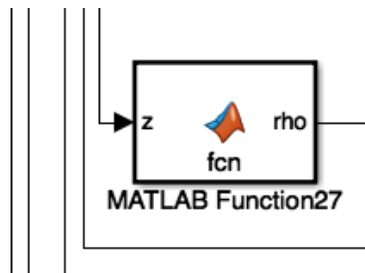


Diagrama en Simulink.

```
1 function rho = fcn(z)
2
3
4 rho= 1.2255*exp(-z/8500);
5
6
```

Comandos en Matlab.

Ecuación poder visual irradiado

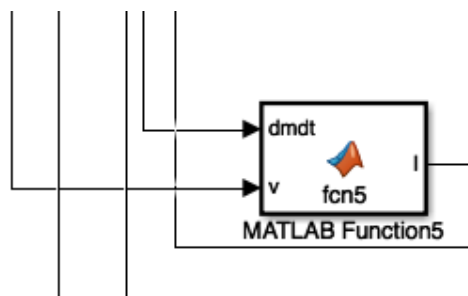


Diagrama en Simulink.

```
1 function I = fcn5(dmdt,v)
2 Le=0.001
3
4
5
6
7 I=-0.5*Le*dmdt*v^2;
8
9
10
```

Comandos en Matlab.

Ecuación magnitud visual aparente

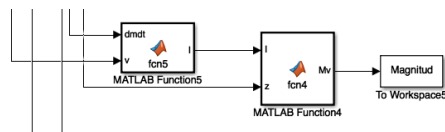


Diagrama en Simulink.

```

1 function Mv = fcn4(I,z)
2
3     ho=100000;
4
5
6
7     Mv=6.8-2.5*log(I*(ho/z)^2);
8
9

```

Comandos en Matlab.

Interpolación de densidad (modelos MSIS y modelo estándar de 1976)

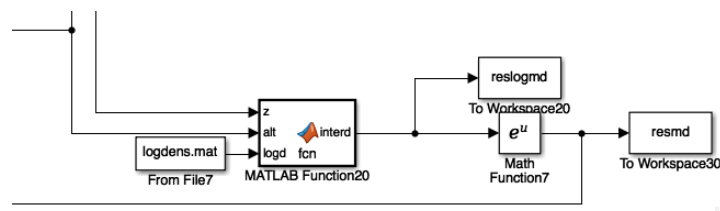


Diagrama en Simulink.

```

1 function interd = fcn(z,alt,logd)
2
3
4
5
6     interd =interp1(alt,logd,z./1000);
7
8
9
10
11
12

```

Comandos en Matlab.

Interpolación de temperatura (modelos MSIS y modelo estándar de 1976)

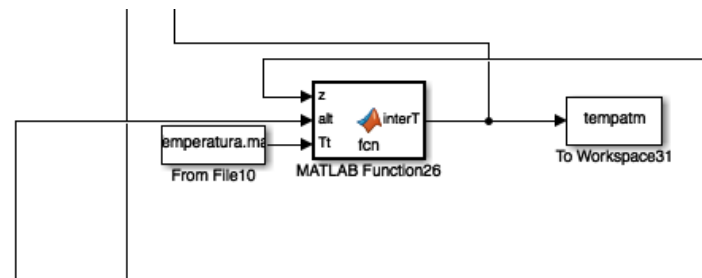


Diagrama en Simulink.

```
1 function interT = fcn(z,alt,Tt)
2
3
4
5
6
7
8 -   interT =interp1(alt,Tt,z./1000);
9
10
11
12
```

Comandos en Matlab.