

Dos Problemas de Mecánica (10 points)

Por favor asegúrate de leer las instrucciones generales dentro del sobre adjunto antes de comenzar a resolver este problema.

Parte A. El Disco Escondido (3.5 puntos)

Consideremos un cilindro sólido de madera de radio r_1 y grosor h_1 . En algún lugar dentro del cilindro se tiene insertado un disco de metal de radio r_2 y grosor h_2 . El disco de metal está ubicado de tal forma que su eje de simetría B se ubica paralelo al eje de simetría S del cilindro de madera. El disco de metal se coloca a la misma distancia de la caras superior e inferior del cilindro. Denotamos a la distancia entre S y B como d . La densidad de la madera es ρ_1 , mientras que de la del metal es $\rho_2 > \rho_1$. La masa total del cilindro de madera con el disco dentro es M .

Se coloca el cilindro sobre una base horizontal de tal forma que pueda rodar libremente hacia la izquierda y la derecha. Vea la Figura 1 para una vista lateral y superior del sistema.

El objetivo de este problema es determinar el tamaño y la posición del disco de metal.

En lo que sigue, cuando se te pida expresar un resultado en términos de cantidades conocidas, considera que las cantidades conocidas son:

$$r_1, h_1, \rho_1, \rho_2, M. \quad (1)$$

El objetivo de este problema es determinar r_2, h_2 y d , a través de mediciones indirectas.

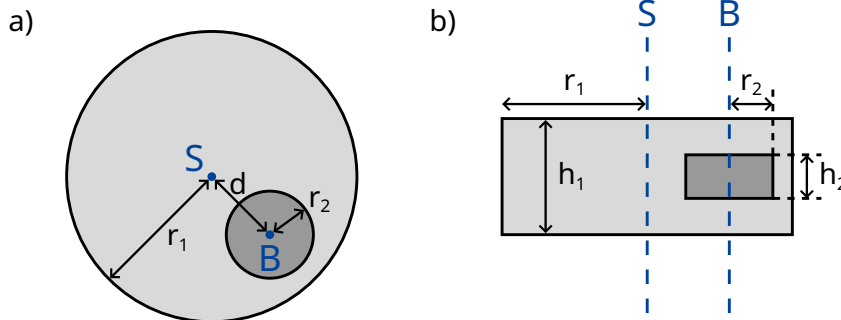


Figura 1: a) vista de frente y b) vista lateral, del cilindro

Llama b a la distancia entre el centro de masa C de todo el sistema y el eje de simetría S del cilindro. Para determinar esta distancia, se diseña el siguiente experimento: colocamos el cilindro sobre una base horizontal de manera que se halle en equilibrio estable. Ahora inclinamos la base lentamente hasta formar un ángulo Θ con la horizontal (ver Fig. 2). Como resultado de la fricción estática, el cilindro puede rodar libremente sin deslizar. Este va a rodar un poco hacia abajo, pero se observa que se detiene hasta alcanzar un equilibrio estable a un ángulo ϕ que es posible medir.

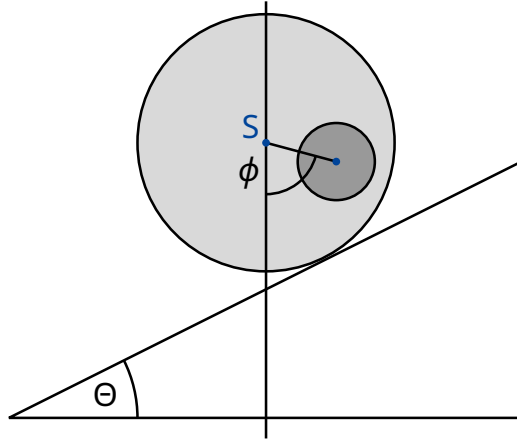


Figura 2: Cilindro sobre un plano inclinado.

- A.1** Encuentra una expresión para b como función de cantidades conocidas (1), del ángulo ϕ y del ángulo de inclinación de la base Θ . 0.8pt

De ahora en adelante, podemos considerar que el valor de b está determinado.

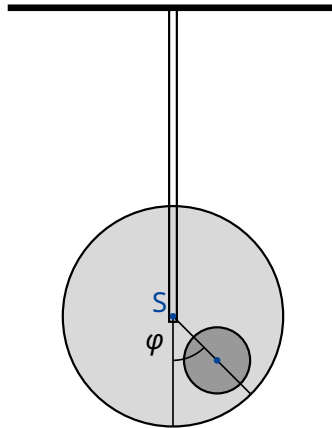


Figura 3: Cilindro suspendido

A continuación queremos medir el momento de inercia I_S del cilindro con respecto al eje de simetría S . Con este objetivo se suspende el cilindro, por medio de barras rígidas, tal que puede girar libremente alrededor de su eje de simetría S . Luego se hace girar un pequeño ángulo φ respecto de su posición de equilibrio y se suelta. Vea la figura 3 del montaje. Encontramos que φ describe un movimiento periódico con período T .

- A.2** Encuentra la ecuación de movimiento para φ . Expresa el momento de inercia I_S del cilindro alrededor de su eje de simetría S en términos de T , b y las cantidades conocidas (1). Puedes suponer que sólo se perturba al cilindro ligeramente de la posición de equilibrio, de tal forma que φ siempre es pequeño. 0.5pt

A partir de las mediciones de las preguntas **A.1** y **A.2**, queremos determinar la geometría y la posición del disco de metal dentro del cilindro.

- A.3** Encuentra una expresión para la distancia d como función de b y las cantidades conocidas (1). También puedes incluir r_2 y h_2 como variables en tu expresión, ya que van a ser calculadas en **A.5**. 0.4pt

- A.4** Encuentra una expresión para el momento de inercia I_S en términos de b y las cantidades conocidas (1). También puedes incluir r_2 y h_2 como variables en tu expresión, ya que van a ser calculadas en **A.5**. 0.7pt

- A.5** Usando todos los resultados anteriores, escribe una expresión para h_2 y r_2 en términos de b , T y las cantidades conocidas (1). Debes expresar también h_2 como una función de r_2 . 1.1pt

Parte B. Estación espacial en rotación (6.5 puntos)

Alice es una astronauta que vive en una estación espacial. La estación espacial es una rueda gigante de radio R rotando alrededor de su eje de tal forma que provee gravedad artificial a los astronautas. Los astronautas viven en el lado interior de la rueda. La atracción gravitacional de la estación espacial y la curvatura del suelo pueden ser ignorados.

- B.1** ¿Con qué frecuencia angular ω_{ss} debe rotar la estación espacial para que los astronautas experimenten la misma aceleración gravitacional g_E que en la superficie de la tierra? 0.5pt

Alice y su amigo astronauta Bob tienen un desacuerdo. Bob no cree que en realidad estén viviendo en una estación espacial sino en la Tierra. Alice quiere probarle a Bob, usando física, que en realidad viven en una estación espacial rotando. Con este objetivo, Alice sujeta una masa m a un resorte de constante elástica k y la deja oscilar de manera vertical al suelo y que no se puede mover en la dirección horizontal.

- B.2** Suponiendo que la aceleración gravitacional sobre la tierra tiene un valor constante g_E , ¿cuál sería la frecuencia de oscilación ω_E del resorte que una persona mediría en la Tierra? 0.2pt

- B.3** ¿Qué frecuencia de oscilación ω del resorte medirá Alice sobre la estación espacial? 0.6pt

Alice está convencida de que su experimento comprueba que se encuentran en una estación espacial rotando. Bob permanece escéptico. Él asegura que al tomar en cuenta el cambio de la gravedad por encima de la superficie de la tierra, uno encuentra un efecto similar. En la siguiente pregunta investigaremos si Bob tiene razón.

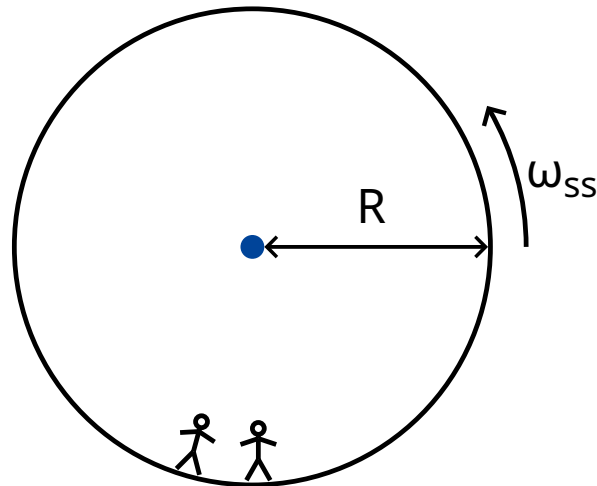


Figure 4: Estación espacial.

- B.4** Deduce una expresión para la gravedad $g_E(h)$ para pequeñas altitudes h sobre la superficie de la tierra y calcula la frecuencia de oscilación del resorte $\tilde{\omega}_E$ (una aproximación lineal es suficiente). Denota al radio de la tierra como R_E . Desprecia la rotación de la Tierra. 0.8pt

En efecto, para la estación espacial, Alice encuentra que el resorte oscila con la frecuencia que Bob predijo.

- B.5** ¿Para qué radio R de la estación espacial coincidirá ω con la frecuencia de oscilación $\tilde{\omega}_E$ sobre la superficie de la tierra? Expresa tu respuesta en términos de R_E . 0.3pt

Exasperada con la terquedad de Bob, Alice logra encontrar un experimento que pruebe su afirmación. Para esto, sube a una torre de altura H con respecto al suelo de la estación espacial y suelta una masa. Este experimento puede ser entendido tanto en el sistema de referencia rotando, como en un sistema de referencia inercial.

En el sistema de referencia rotando de manera uniforme, los astronautas registran una fuerza ficticia \vec{F}_C llamada fuerza de Coriolis. La fuerza \vec{F}_C actuando sobre un objeto de masa m que se mueve con velocidad \vec{v} en el marco de referencia rotando con frecuencia angular constante $\vec{\omega}_{ss}$ está dada por:

$$\vec{F}_C = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}_{ss} . \quad (2)$$

En términos de cantidades escalares se puede usar:

$$F_C = 2mv\omega_{ss} \sin \phi , \quad (3)$$

donde ϕ es el ángulo entre la velocidad y el eje de rotación. La fuerza es perpendicular tanto a la velocidad v como al eje de rotación. El signo de la fuerza se puede determinar por medio de la regla de la mano derecha, pero en lo que sigue puedes escoger el signo como te convenga.

- B.6** Calcula la velocidad horizontal v_x y el desplazamiento horizontal d_x (relativo a la base de la torre y en la dirección perpendicular a la torre) de la masa cuando golpea el suelo. Puedes suponer que la altura H de la torre es pequeña, de tal manera que la gravedad medida por los astronautas es constante durante la caída. También puedes suponer que $d_x \ll H$. 1.1pt

Para obtener un buen resultado, Alice decide llevar acabo el experimento en una torre mucho más alta que la anterior. Para su sorpresa, la masa golpea el suelo justo en la base de la torre, es decir en $d_x = 0$.

- B.7** Encuentra una cota mínima de la altura para la cual sucede que $d_x = 0$. 1.3pt

Alice quiere intentar convencer a Bob una última vez. Ella quiere usar su oscilador con resorte para mostrar el efecto de la fuerza de Coriolis. Para esto, ella cambia el experimento original: ella cuelga el resorte de un anillo que puede deslizarse libremente sobre una vara horizontal en la dirección x sin fricción. El resorte como tal oscila en la dirección y . La vara se encuentra paralela al suelo y perpendicular al eje de rotación de la estación espacial. El plano xy es por lo tanto perpendicular al eje de rotación, con la dirección y apuntando hacia el centro de rotación de la estación.

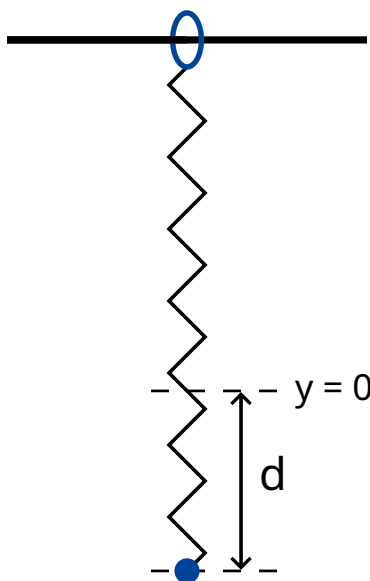


Figura 5: Montaje del experimento.

- B.8** Alice jala la masa una distancia d hacia abajo con respecto al punto de equilibrio $x = 0, y = 0$, y luego la suelta (ver figura 5). 1.7pt
- Encuentre una expresión algebraica para $x(t)$ y $y(t)$. Puedes suponer que $\omega_{ss}d$ es una cantidad pequeña y despreciar la fuerza de Coriolis para el movimiento a lo largo del eje y .
 - Dibuje la trayectoria $(x(t), y(t))$, marcando todas las características importantes tales como la amplitud.

Alice y Bob continúan discutiendo.

Dinámica No Lineal en Circuitos Eléctricos (10 puntos)

Lee las instrucciones generales dentro del sobre adjunto antes de comenzar a resolver este problema.

Introducción

Los elementos semiconductores bi-estables no lineales (p. ej. tiristores) son comúnmente usados en dispositivos electrónicos tales como interruptores y generadores de oscilaciones electromagnéticas. El campo principal de aplicación de los tiristores corresponde al control de corrientes alternas en electrónica de potencia como por ejemplo, en la rectificación de corrientes AC a DC a escala de megawatts. Los elementos bi-estables también se utilizan en modelos de sistemas de auto organización, tanto en la física (ver parte B del problema), como en la biología (ver parte C del problema) y otros campos de la ciencia no lineal moderna.

Objetivos

Estudiar inestabilidades y dinámica no lineal de circuitos con elementos de características $I - V$ no lineales.

Descubrir posibles aplicaciones de tales circuitos en el campo de la ingeniería, así como en el modelado de sistemas biológicos.

Parte A. Estados estacionarios e inestabilidades (3 puntos)

La Fig 1. muestra la denominada curva característica $I - V$, de **forma S**, de un elemento electrónico no lineal X . En el intervalo de voltaje entre $U_h = 4V$ (voltaje de reposo) y $U_{th} = 10.0 V$ (voltaje umbral), las características $I - V$ son multi-valuadas. Para simplificar, la Fig. 1 muestra una función lineal por partes (cada rama de la "curva" es una línea recta). Esta aproximación da lugar a una descripción adecuada de tiristores reales.

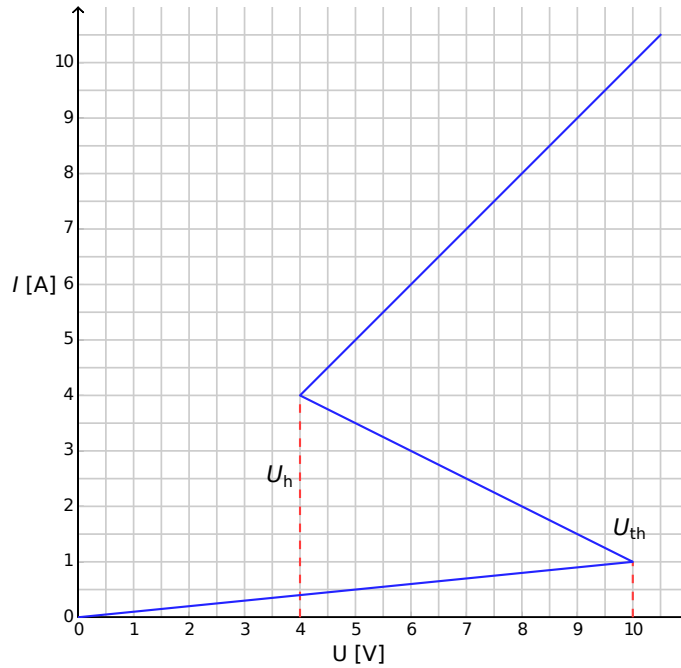


Figura 1: Características $I - V$ del elemento no lineal X .

- A.1** Utilizando la gráfica, determina tanto la resistencia del elemento X en la rama superior de la curva $I - V$, y llámala R_{on} , así como también la resistencia de la rama inferior, y llámala R_{off} . La rama intermedia está descrita por la ecuación: 0.4pt

$$I = I_0 - \frac{U}{R_{int}}. \quad (1)$$

Encuentre el valor de los parámetros I_0 y R_{int} .

El elemento X se conecta en serie con una resistencia R , con un inductor L y con una fuente de voltaje ideal \mathcal{E} (Fig. 2). Se dice que el circuito alcanza un estado estacionario cuando la corriente tiene un valor constante en el tiempo, $I(t) = \text{const.}$

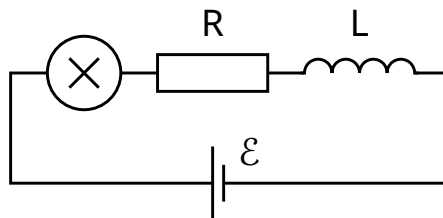


Figura 2: Circuito con elemento X , resistencia R , inductor L y fuente de voltaje \mathcal{E} .

A.2 ¿Cuál es el número de estados estacionarios posibles para el circuito de la Fig. 2 dado un valor fijo de \mathcal{E} con $R = 3.00\Omega$? ¿Cómo cambia la respuesta si $R = 1.00\Omega$? 1pt

A.3 Sea $R = 3.00\Omega$, $L = 1.00\mu H$ y $\mathcal{E} = 15.0V$ referidos al circuito ilustrado en la fig. 2. Determina los valores de la corriente $I_{\text{stationary}}$ y el voltaje $V_{\text{stationary}}$ en el elemento no lineal X en el estado estacionario. 0.6pt

El circuito de la Fig. 2 está en su estado estacionario con $I(t) = I_{\text{stationary}}$. Se dice que este estado estacionario es estable si después de un pequeño desplazamiento (incremento o decremento en la corriente), la corriente regresa al estado estacionario. Si por el contrario, la corriente no regresa al estado estacionario y se aleja de este, se dice que es inestable.

A.4 Use los valores numéricos de la pregunta **A.3** para estudiar la estabilidad del estado estacionario con $I(t) = I_{\text{stationary}}$. ¿El estado estacionario es estable o inestable? 1pt

Parte B. Elementos bi-estables no lineales en la física: el radiotransmisor (5 puntos)

Ahora investigamos una nueva configuración del circuito (ver Fig. 3). Esta vez, el elemento no lineal X está conectado en paralelo a un capacitor con capacitancia $C = 1.00\mu F$. A su vez, este bloque está conectado en serie a una resistencia $R = 3.00\Omega$ y a una fuente de voltaje ideal de $\mathcal{E} = 15.0V$. Se observa que este circuito exhibe oscilaciones con el elemento no lineal X saltando de una rama a otra de la curva $I - V$, en el transcurso de un ciclo.

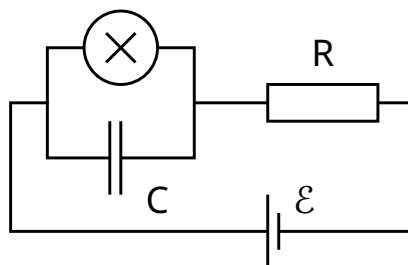


Figura 3: Circuito con elemento X , capacitor C , resistencia R y fuente de voltaje \mathcal{E} .

B.1 Dibuja el ciclo de oscilación sobre la gráfica $I - V$, incluyendo su dirección (en la dirección de las manecillas del reloj o en la contraria). Justifica tu respuesta con ecuaciones y diagramas. 1.8pt

B.2 Encuentra expresiones para los intervalos de tiempo t_1 y t_2 que el sistema permanece dentro de cada rama de la curva $I - V$ durante un ciclo de oscilación. Determina sus valores numéricos. Encuentra el valor numérico del período de oscilación T suponiendo que el tiempo necesario para los saltos entre ramas de la curva $I - V$ es despreciable. 1.9pt

- B.3** Estima la potencia promedio P disipada por el elemento no lineal durante el transcurso de una oscilación. Una estimación del orden de magnitud es suficiente. 0.7pt

El circuito de la Fig. 3 es usado para construir un radio transmisor. Para esto, el elemento X se conecta a un extremo de una antena lineal (un cable recto largo) de longitud s . El otro extremo se deja libre. En la antena se establece una onda electromagnética estacionaria que viaja a lo largo de la antena con la misma velocidad que en el vacío. El transmisor funciona con el armónico principal del sistema dado por el periodo T de la pregunta **B.2**.

- B.4** ¿Cuál es el valor óptimo de s , considerando que no puede exceder 1 km? 0.6pt

Parte C. Elementos bi-estables no lineales en la biología: el neuristor (2 puntos)

Ahora consideramos una aplicación de los elementos bi-estables no lineales en el modelado de procesos biológicos. Una neurona en el cerebro humano tiene la siguiente propiedad: cuando se le excita con una señal externa, ésta responde con una sola oscilación y luego regresa a su estado inicial. Esto se denomina excitabilidad. Debido a esta propiedad, los pulsos pueden propagarse dentro de la red de neuronas acopladas que constituyen el sistema nervioso. Un chip semiconductor diseñado para imitar la excitabilidad y la propagación del pulso se denomina *neuristor* (una mezcla de los términos "neurona" y "transistor").

Intentaremos modelar un neuristor simple usando un circuito que incluya el elemento no lineal X que hemos investigado previamente. Para esto, se ajusta el voltaje \mathcal{E} en el circuito de la Fig. 3 a un valor menor $\mathcal{E}' = 12.0V$. Como consecuencia, las oscilaciones se detienen y el sistema alcanza su estado estacionario. A continuación, el voltaje se incrementa rápidamente hasta el valor original $\mathcal{E} = 15.0V$ y después de un período de tiempo τ (con $\tau < T$), el voltaje vuelve al valor \mathcal{E}' (ver Fig. 4). Resulta que existe cierto valor crítico τ_{crit} , y que el sistema muestra un comportamiento cualitativamente diferente para $\tau < \tau_{\text{crit}}$ y $\tau > \tau_{\text{crit}}$.

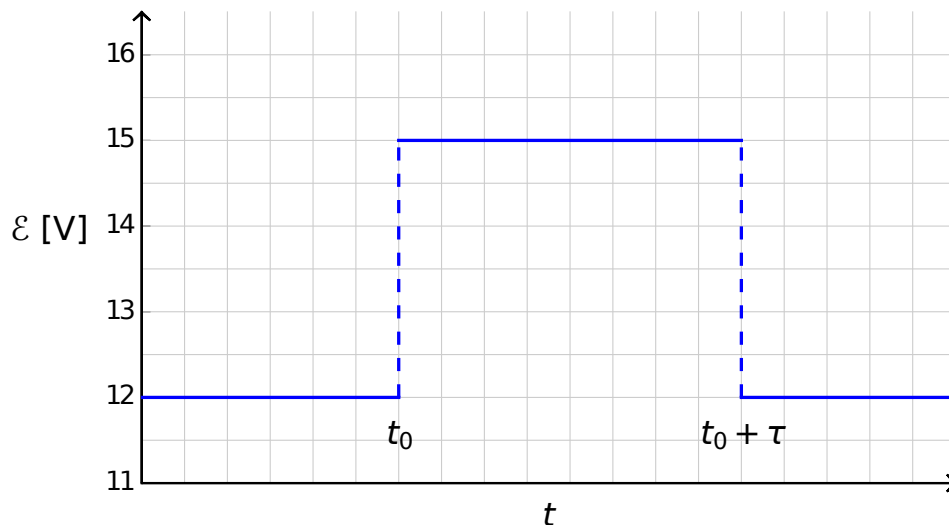


Figura 4: Voltaje de la fuente de voltaje como función del tiempo.

C.1 Esboza gráficas de la corriente dependiente en el tiempo $I_X(t)$ en el elemento no lineal X para $\tau < \tau_{\text{crit}}$ y $\tau > \tau_{\text{crit}}$. 1.2pt

C.2 Encuentre la expresión y el valor numérico del tiempo crítico τ_{crit} para el cual se tiene un cambio de comportamiento. 0.6pt

C.3 ¿El circuito con $\tau = 1.00 \times 10^{-6}$ es un neuristor? 0.2pt

El Gran Colisionador de Hadrones (Large Hadron Collider) (10 puntos)

Asegúrate de leer las instrucciones generales dentro del sobre adjunto antes de comenzar a resolver este problema.

En esta tarea discutiremos la física del acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) del CERN. El CERN es el laboratorio de física de partículas más grande del mundo. Su objetivo principal es indagar sobre las leyes fundamentales de la naturaleza. Dos haces de protones son acelerados hasta altas energías, guiadas dentro de un anillo acelerador por medio de un campo magnético intenso, para luego provocar la colisión de dichos haces. Los protones en los haces no están distribuidos uniformemente a lo largo de la circunferencia del acelerador, sino que están distribuidos en paquetes separados. La colisión de los protones genera una multitud de otras partículas que, a su vez, son observadas en grandes detectores. En la tabla 1 se encuentran algunos parámetros del LHC.

Anillo del LHC	
Circunferencia del anillo	26659 m
Número de paquetes por haz de protones	2808
Número de protones por paquete	1.15×10^{11}
Haces de protones	
Energía nominal de los protones	7.00 TeV
Energía del centro de masas (colisión)	14.0 TeV

Tabla 1: Valores numéricos típicos de los parámetros relevantes del LHC.

Los físicos de partículas usan unidades adecuadas de energía, momento y masa: la energía se mide en electronvolt [eV]. Por definición, 1 eV es la cantidad de energía ganada por una partícula de carga elemental e , al cruzar una diferencia de potencial de un volt (1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ kg m²/s²)

El momento se mide en unidades de eV/ c y la masa en unidades de eV/ c^2 , donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Ya que 1 eV es una unidad de energía muy pequeña, los físicos de partículas usualmente usan MeV (1 MeV = 10^6 eV), GeV (1 GeV = 10^9 eV) o TeV (1 TeV = 10^{12} eV).

La parte A trata de la aceleración de protones o electrones. La parte B se concentra en la identificación de las partículas producidas en las colisiones en el CERN.

Parte A. El acelerador LHC (6 puntos)

Aceleración I:

Consideremos que los protones han sido acelerados por un voltaje V tal que su velocidad es muy cercana a la de la luz e ignoremos cualquier pérdida de energía debido a radiación o colisión con otras partículas.

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Encuentre una expresión exacta para la velocidad final v de los protones, como función del voltaje de aceleración V y de constantes fundamentales. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

En un experimento futuro en el CERN se planea usar los protones del LHC para generar colisiones con electrones tales que estos adquieran una energía de 60.0 GeV.

- A.2** Para partículas con alta energía y baja masa en reposo, la desviación relativa $\Delta = (c - v)/c$ de la velocidad final v con respecto a la velocidad de la luz, es muy pequeña. Encuentra, a primer orden, una aproximación apropiada para Δ y evalúala para electrones con una energía de 60.0 GeV, usando el voltaje de aceleración V y constantes físicas. 0.8pt

Regresemos a los protones en el LHC. Considera que el tubo del acelerador es de forma circular.

- A.3** Deduce una expresión para el campo magnético B , cuyo flujo a través del anillo es uniforme, necesario para mantener un haz de protones en una trayectoria circular. La expresión solo debe incluir la energía cinética de los protones E , la circunferencia L del anillo, constantes fundamentales y números. Puedes utilizar aproximaciones adecuadas si el error debido a esto, es menor que la precisión dada por el menor número de dígitos significativos. Calcula el campo magnético B para una energía cinética de los protones de $E = 7.00$ TeV, despreciando la interacción entre los protones del haz. 1.0pt

Potencia radiada

Una partícula cargada que se acelera, irradia energía en forma de ondas electromagnéticas. La potencia radiada P_{rad} de una partícula acelerada depende sólo de su aceleración a , de su carga q , de la velocidad de la luz c y de la permitividad del vacío ϵ_0 .

- A.4** Usando análisis dimensional encuentra una expresión para la potencia radiada P_{rad} . 1.0pt

La formula real de la potencia radiada de una partícula que circula con una velocidad angular constante, incluye un factor adicional de $1/(6\pi)$. Por otro lado, una deducción relativista introduce aún otro factor adicional dado por γ^4 , con $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calcula la potencia total radiada P_{tot} del LHC, para un protón con energía cinética $E = 7.00$ TeV (Ver tabla 1). Utiliza aproximaciones adecuadas. 1.0pt

Aceleración lineal:

En el colisionador del LHC, los protones en reposo son acelerados a través de un acelerador lineal de longitud $d = 30.0$ m cuya diferencia de potencial es de $V = 500$ MV. Considera que el campo eléctrico es homogéneo. Un acelerador lineal consiste de dos placas, separadas una distancia d , como se muestra en la Figura 1.

- A.6** Encuentra el tiempo T que requieren los protones para cruzar este campo. 1.5pt

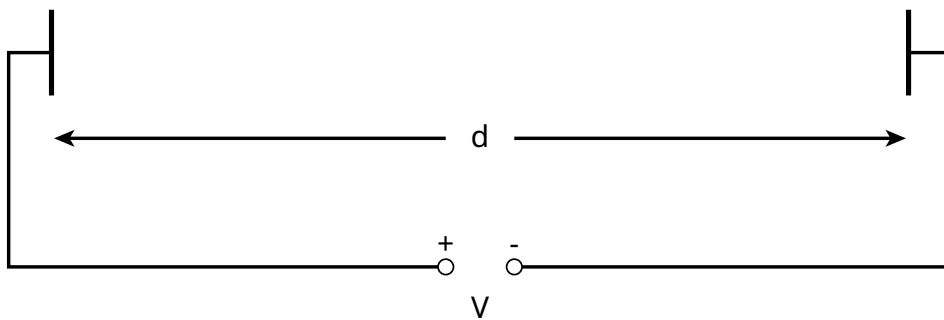


Figura 1: Diagrama de un módulo de acelerador lineal.

Parte B. Identificación de las partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Para interpretar el proceso de interacción, es importante identificar las partículas de alta energía que se generan en la colisión. Un método sencillo consiste en medir el tiempo t que requiere una partícula con momento conocido para viajar una longitud l en un detector denominado de "tiempo de vuelo" (ToF por sus siglas en inglés). En la tabla 2 se listan partículas típicas, y sus masas, identificadas con este detector.

Partícula	Masa [MeV/c ²]
Deuterón	1876
Protón	938
Kaón cargado	494
Pión cargado	140
Electrón	0.511

Tabla 2: Partículas y sus masas.

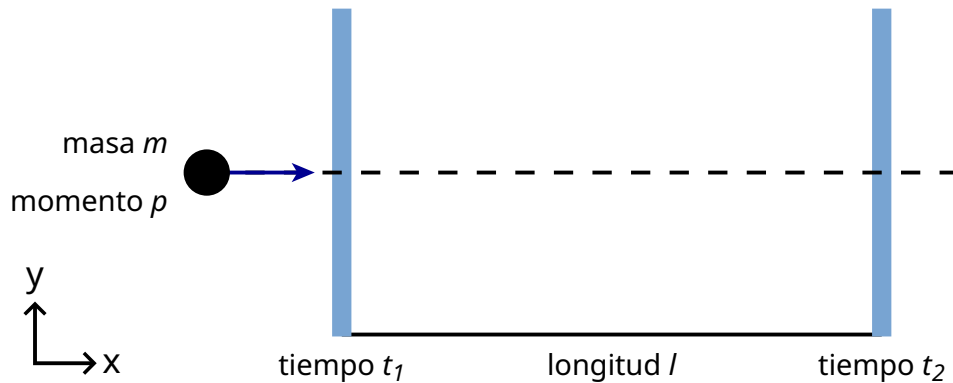
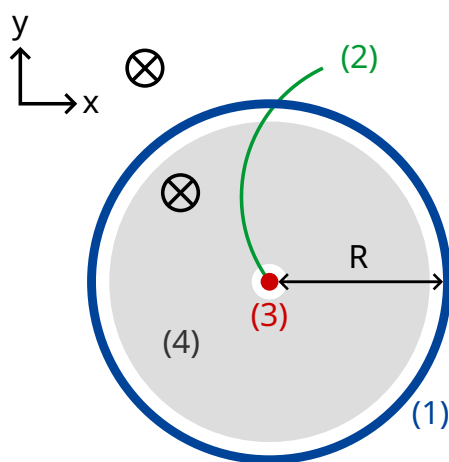


Figure 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

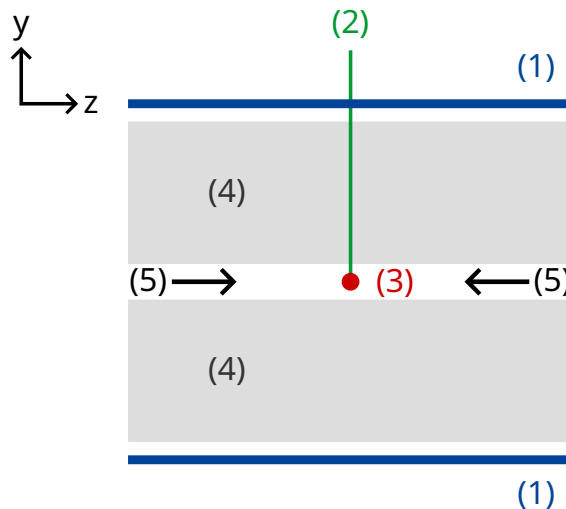
- B.1** Expresa la masa en reposo m de la partícula como función del momento p , de la longitud de vuelo l y del tiempo de vuelo t , suponiendo que las partículas tienen carga elemental e y que viajan a gran velocidad siguiendo trayectorias rectas en el detector ToF. Considera también que las partículas viajan en dirección ortogonal a los dos planos de detección (ver la figura 2). 0.8pt

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.2 | Calcula la longitud mínima l de un detector ToF que permita distinguir claramente entre un pión cargado y un kaón cargado, cuyos momentos medidos para ambos es de $1.00 \text{ GeV}/c$. Para considerarse una buena discriminación entre las dos partículas, se requiere que la diferencia en tiempo de vuelo sea al menos tres veces mayor que la resolución temporal del detector. La resolución típica de un detector ToF es de 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). | 0.7pt |
|------------|--|-------|

En adelante, las partículas producidas en el LHC son registradas por un sensor de dos etapas constituido por un detector o cámara de traza y un detector ToF. La Figura 3 muestra el montaje en los planos transversal y longitudinal a los haces de protones. Ambos detectores están compuestos por tubos que rodean la zona de interacción, con lo hace viajando a lo largo del eje de los tubos. El detector de traza registra la trayectoria de una partícula cargada que atraviesa un campo magnético cuya dirección es paralela a los haces de protones. El radio r de la trayectoria permite determinar el momento transversal p_T de la partícula. Debido a que se conoce el instante de la colisión, el detector ToF sólo necesita un tubo para medir el tiempo de vuelo (es decir, el tiempo entre la colisión y la detección en el detector ToF con forma de tubo). Este tubo ToF está situado justo después de la cámara de traza. Para esta tarea puedes suponer que las partículas creadas en la colisión sólo viajan en el plano perpendicular a los haces de protones. Esto significa que las partículas creadas no tienen momento a lo largo de la dirección de los haces.



plano transversal



sección transversal de la
vista longitudinal
a lo largo de la línea de los haces

- (1) - tubo ToF
- (2) - trayectoria o traza
- (3) - punto de colisión
- (4) - detector o cámara de traza
- (5) - haces de protones
- ⊗ - magnetic field

Figura 3 : Arreglo experimental para la identificación de partículas por medio de una cámara de traza y un detector ToF. Ambos detectores son tubos que rodean el punto de colisión situado en el centro. Izquierda: vista transversal perpendicular a la línea de los haces. Derecha: vista longitudinal paralela a la línea de los haces. Las partículas generadas viajan perpendicular a la línea de los haces.

B.3 Expresa la masa de una partícula creada como función del campo magnético B , del radio R del tubo ToF, de constantes fundamentales y de las cantidades medidas: radio de la trayectoria r y tiempo de vuelo t . 1.7pt

Se han detectado cuatro partículas diferentes y queremos identificarlas. El campo magnético dentro del detector de traza fue de $B = 0.500$ T. El radio R del tubo ToF fue de 3.70 m. A continuación se dan las mediciones realizadas ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partícula	Radio r [m]	Tiempo de vuelo t [ns]
A	5.10	20
B	2.91	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4	Identifica las cuatro partículas calculando sus masas.
------------	--

0.8pt
