



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Una nueva demostración de la ausencia de la fuerza de empuje

en la caída libre

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física

por

Enrique Josué Noé Soto Santos

Asesorado por

Josip Slisko Ignjatov

Puebla Pue.

Diciembre de 2022



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Una nueva demostración de la ausencia de la fuerza de empuje

en la caída libre

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física

por

Enrique Josué Noé Soto Santos

Asesorado por

Josip Slisko Ignjatov

Puebla Pue.

Diciembre de 2022

Título: Una nueva demostración de la ausencia de la fuerza de empuje en
la caída libre

Estudiante: Enrique Josué Noé Soto Santos

COMITÉ

Honorina Ruiz Estrada
Presidente

Adrián Corona Cruz
Secretario

Raúl Cuellar del Águila
Vocal

Cupatitzio Ramírez Romero
Vocal

Josip Slisko Ignjatov
Asesor

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a Dios. Le agradezco a mis padres Leonel Soto Hernández y Guadalupe Santos Barojas la paciencia que han tenido, la oportunidad de dejarme estudiar lo que me apasiona y el apoyo incondicional. Le agradezco a tantos de los profesores y profesoras de la facultad por su forma de enseñar y amor a la ciencia que transmiten. Le agradezco a amigos y compañeros de la facultad con quienes llegue a resolver tareas o problemas. Finalmente le agradezco al Dr. Josip Slisko Ignjatov por su paciencia, apoyo y dirección en el desarrollo de este trabajo y de sus enseñanzas en el aula, sin las cuales no tendría claro cuál es el camino profesional que deseo seguir.

A todos ustedes, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 2.....	6
FUERZA DE EMPUJE	6
CAPÍTULO 3.....	9
PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA Y EL ESTADO DE INGRAVIDEZ	9
3.1 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA	9
3.2 ESTADO DE INGRAVIDEZ	11
3.3 CONSECUENCIA PARA LA FUERZA DE EMPUJE.....	12
CAPÍTULO 4.....	13
ALGUNAS DEMOSTRACIONES DE INGRAVIDEZ	13
4.1 PESA Y REACCIÓN INERCIAL	13
4.2 FUERZA ELÁSTICA DESEQUILIBRADA Y EL JUGUETE DE EINSTEIN.....	14
4.3 CORRIENTES DE CONVECCIÓN	15
4.4 FLUJO POR UN ORIFICIO	16
CAPÍTULO 5.....	17
ALGUNAS DEMOSTRACIONES DE LA AUSENCIA DE LA FUERZA DE EMPUJE EN LA CAÍDA LIBRE.....	17
5.1 PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES.....	17
5.2 FUERZA ELÁSTICA Y FUERZA DE EMPUJE	17
5.3 EL BUZO CARTESIANO Y LOS PRINCIPIOS DE ARQUÍMEDES Y DE PASCAL.....	20
CAPÍTULO 6.....	22
UNA DEMOSTRACIÓN DE LA AUSENCIA DE LA FUERZA DE EMPUJE POR LOS ESTUDIANTES	22
CAPÍTULO 7.....	24
UNA NUEVA DEMOSTRACIÓN DE LA AUSENCIA DE FUERZA DE EMPUJE EN LA CAÍDA LIBRE	24
SECUENCIA 1.	26
SECUENCIA 2.	28
SECUENCIA 3.	29
SECUENCIA 4.	30
SECUENCIA 5.	32
CAPÍTULO 8.....	33
CONCLUSIÓN.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	35

Resumen

El presente trabajo pretende demostrar, a través de un nuevo experimento, que durante la caída libre se puede apreciar la ausencia de la fuerza de empuje.

Para este nuevo experimento se usan materiales sencillos y de uso común, los cuales son: una botella con tapa, un popote metálico, unas ligas, un globo, y agua.

El dispositivo experimental se construye llenando la botella con agua, se perfora la tapa de la botella y se atraviesa el popote metálico por este orificio, en la parte del popote que queda en el exterior de la botella se asegura el globo con la liga, se infla el globo y se impide que se desinfle presionando la punta del popote que queda dentro del globo.

El experimento consiste en dejar caer el dispositivo experimental y observar lo que ocurre durante la caída libre. Esto en comparación a cuando el dispositivo experimental se deja sobre una mesa.

Cuando el sistema está sobre una mesa, en cuanto se deja de presionar la punta del popote que está dentro del globo, se introduce aire al interior de la botella, este aire forma pequeñas burbujas que suben a la superficie en cuanto son creadas (esto debido a la fuerza de empuje).

Cuando el sistema se deja en caída libre, en el instante en que se suelta el sistema, como se deja de presionar la punta superior del popote, el globo se comienza a desinflar e introduce aire al interior de la botella, formando una burbuja en la punta del popote que está dentro de la botella.

La burbuja crece conforme sigue cayendo el sistema, pues el globo continúa desinflándose.

Mientras el sistema se encuentra en caída libre la burbuja no se mueve con respecto a su posición relativa a la botella.

Si se manifestara la fuerza de empuje la burbuja debería subir con respecto a su posición relativa a la botella.

Al no hacerlo, la conclusión es que durante la caída libre no se manifiesta la fuerza de empuje.

Capítulo 1

Introducción

El propósito de esta tesis es demostrar de forma experimental que la fuerza de empuje no se manifiesta en la caída libre. Esto se hará gracias a un nuevo experimento fácilmente replicable.

Para este nuevo experimento se usa una botella con tapa, un popote metálico, unas ligas, un globo, y agua.

El dispositivo experimental (que de ahora en adelante se conocerá como “sistema”) se construye de la siguiente manera: se llena la botella con agua, se perfora la tapa de la botella y se atraviesa el popote metálico por este orificio, en la parte del popote que queda en el exterior de la botella se asegura el globo con la liga, se infla el globo y se impide que se desinfe presionando con los dedos la punta del popote que queda dentro del globo. Se enrosca la tapa a la botella manteniendo presionada la punta del popote con los dedos. El experimentador solo tiene interacción con el dispositivo al estar impidiendo el paso del aire.

El experimento consiste en dejar caer el sistema (al dejar de presionar la punta del popote con los dedos el sistema comienza a caer) y observar lo que ocurre durante la caída libre. Esto en comparación a cuando el sistema se deja sobre una mesa (si el sistema está sobre una mesa, cuando se deje de presionar la punta del popote con los dedos el sistema no cae, solo se permite el paso del aire del globo hacia el interior de la botella).

El diseño de este nuevo experimento es una respuesta al experimento realizado en el artículo *A bubble-based demonstration of free-fall weightlessness* ^[1], en donde su experimento depende de que el experimentador sople una burbuja (con un popote) al interior de una botella llena de agua mientras la botella se encuentra en caída libre. El experimento que en ese artículo se muestra no es fácilmente replicable, esto debido a la interacción que tiene el experimentador con el sistema (inflar la burbuja mientras el sistema está en caída libre).

El nuevo experimento que en esta tesis se presenta y se desarrolla a fondo en el capítulo 7, se diferencia del experimento del artículo antes mencionado, al evitar interacciones del experimentador con el sistema mientras el dispositivo experimental se encuentre en caída libre. En vez de intentar soplar la burbuja mientras la botella está en caída libre, el globo se encarga de suministrar el aire al interior de la botella, volviéndose así más fácilmente replicable.

La pregunta de investigación es:

¿Qué ocurrirá cuando el sistema esté en caída libre?

La hipótesis que en esta tesis se presenta es: a partir del momento en que se deja de presionar la punta del popote que está dentro del globo (el sistema cae pues ya no hay nada que lo detenga), el globo comenzará a desinflarse (debido a la fuerza elástica) pasando aire a través del popote hacia el interior de la botella, el aire que entra a la botella va formando una burbuja de aire en el interior de la botella. La burbuja no se moverá con respecto a su posición relativa a la botella mientras el sistema siga en caída libre.

Este es un efecto contraintuitivo, pues la fuerza de empuje hace que los objetos o sustancias menos densas que el agua floten.

Si nosotros a un vaso de agua le introducimos aire en el fondo, con la ayuda de un popote, podemos observar que se forman burbujas de aire. Tales burbujas de aire se elevan rápidamente a la superficie del líquido, esto ocurre debido a la fuerza de empuje.

Pero en la caída libre esto cambia. Mientras el sistema esté en caída libre se encuentra en un estado de ingravidez, esto debido al principio de equivalencia (hablaré más de esto en el capítulo 3). En el sistema en caída libre desaparecen los efectos del campo gravitacional.

Como la fuerza de empuje existe cuando el agua está en un campo gravitacional, la fuerza de empuje deja de estar presente en el sistema en la caída libre. De la misma manera, dejan de manifestarse la fuerza de peso y la fuerza de fricción.

A diferencia de la fuerza de empuje y otras fuerzas mencionadas, hay otras fuerzas que no dependen de la gravedad y, que aun en caída libre, seguirán manifestándose de la misma manera (por ejemplo: fuerza electrostática, fuerza magnetostática y fuerza de tensión superficial).

Como nos importa para la construcción del nuevo experimento que en esta tesis se presenta, se debe mencionar la fuerza elástica (de ligas, globos o resortes), que no es influenciada por la gravedad o ausencia de gravedad.

El plan de este trabajo de tesis es el siguiente:

En el capítulo 2 se presenta la fuerza de empuje.

En el capítulo 3 se introducen conceptos relevantes acerca del principio de equivalencia y el estado de ingravidez.

En el capítulo 4 se habla de algunas demostraciones de ingravidez, algunas de las que se presentan son recuperadas de los artículos de Haym Kruglak ^{[2][3]}.

En el capítulo 5 se presentan 3 demostraciones de ingravidez en las que se ve involucrada la fuerza de empuje. La primera demostración (5.1) es de la colección de Kruglak ^{[2][3]}, la segunda (5.2) es de J. Sliško y G. Planinšič ^[4], y la tercera (5.3) es de J. Sliško ^[5].

El capítulo 6 se trata del artículo *A bubble-based demonstration of free-fall weightlessness* ^[11] donde se presenta una demostración hecha por los estudiantes, en la cual a una botella con agua se le introduce una sola burbuja de aire mientras la botella está en caída libre.

En el capítulo 7 se desarrolla la nueva demostración de ingravidez.

El capítulo 8 es la conclusión.

Capítulo 2

Fuerza de empuje

La fuerza de empuje (también llamada fuerza de flotación o fuerza boyante) es la fuerza con la que reacciona un fluido a la presencia de un cuerpo, fue descubierta y caracterizada por Arquímedes en el siglo III a.C.

El libro de Arquímedes “On Floating Bodies—Book I” contiene proposiciones y pruebas para el problema de la fuerza ejercida por un líquido a un cuerpo total o parcialmente sumergido. Considera tres casos separados; objetos con una densidad igual a la del fluido, objetos más ligeros (menos densos) que el fluido, y objetos más pesados (más densos) que el fluido. Arquímedes prueba las siguientes proposiciones ^[6]:

Proposición 3. De los sólidos, aquellos que, tamaño por tamaño, tienen el mismo peso que un fluido, si se dejan en el fluido, se sumergirán de modo que no sobresalgan de la superficie pero no se hundan más.

Proposición 4. Un sólido más ligero que un fluido, si se sumerge en el fluido, no se sumergirá por completo, sino que parte de él se proyectará sobre la superficie.

Proposición 5. Cualquier sólido más liviano que un fluido, si se coloca en el fluido, se sumergirá tanto que el peso del sólido será igual al peso del fluido desalojado.

Proposición 6. Si se sumerge a la fuerza un sólido más ligero que un fluido, el sólido será impulsado hacia arriba por una fuerza igual a la diferencia entre su peso y el peso del fluido desplazado.

Proposición 7. Un sólido más pesado que un fluido, si se coloca en él, descenderá al fondo del fluido, y el sólido, cuando se pese en el fluido, será más liviano que su verdadero peso por el peso del fluido desalojado.

En los textos modernos sus proposiciones son reducidas a una sola declaración, conocida como el **principio de Arquímedes**, y expresa que: «un cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido es empujado en una dirección contraria a la gravedad con una fuerza igual al peso del fluido desplazado» ^[6].

Se suele derivar el principio de Arquímedes para el caso especial de un cilindro circular o un sólido rectangular (con sus caras planas paralelas a la superficie), por simetría las fuerzas horizontales ejercidas por el líquido se cancelan y la fuerza de empuje será solo la diferencia de la fuerza de la presión hidrostática en la cara superior y la cara inferior del sólido ^[7].

Aunque esta prueba es para cuerpos simétricos sumergidos en un fluido incompresible (homogéneo), se puede derivar matemáticamente para cuerpos de forma arbitraria, parcial o totalmente sumergidos, en fluidos compresibles (homogéneos) o incompresibles ^[15]. Para esto se utiliza la validez de la ecuación hidrostática y el teorema del gradiente. Primero se define la fuerza de empuje como «la fuerza neta ejercida por un fluido sobre la porción de la superficie del cuerpo que es presionada por el fluido» ^[7], entonces la fuerza de empuje se vuelve una integral de superficie de la presión ejercida por el fluido, que se puede evaluar fácilmente cuando el objeto está completamente rodeado por el fluido, en ese caso el teorema del gradiente permite convertir la integral de superficie en una integral de volumen que se reduce a una fuerza hacia arriba con magnitud igual al peso del fluido desplazado, siempre que la densidad del fluido sea una función continua de la profundidad.

El principio de Arquímedes al decir que un cuerpo siente una fuerza hacia arriba igual peso del fluido desplazado falla en unos casos específicos, en particular, cuando el objeto está en contacto con las paredes del contenedor en el que se encuentra el fluido.

Pensemos en un recipiente y un cuerpo rectangular, si el cuerpo está en contacto con una de sus caras laterales con el recipiente, las fuerzas horizontales no se cancelan y la fuerza resultante no podrá ser hacia arriba, tendrá alguna inclinación.

Otro caso excepcional es cuando el cuerpo está en el fondo del contenedor, si hay un contacto perfecto (es decir, nada de fluido en la parte inferior del cuerpo) entonces la fuerza que ejerce el fluido sobre el cuerpo tendrá una dirección hacia abajo; hay evidencia experimental que muestra que la magnitud de esta fuerza incrementa linealmente con la profundidad ^[8], en contraste con la fuerza que predice el principio de Arquímedes que es constante y en dirección hacia arriba. Para este caso la definición que convierte la fuerza de empuje en una integral de superficie provee una fórmula para esta fuerza hacia abajo sin importar la forma del cuerpo, que involucra el área de contacto.

¿Qué provoca la fuerza de empuje?

Hay varias perspectivas, a continuación mencionaré algunas:

La mayoría de los autores mencionan que el origen se encuentra en el aumento de la presión del fluido con la profundidad ^{[7][9]}.

Desde el punto de vista **molecular**:

En un fluido sin perturbar la presión es ejercida por las colisiones de las moléculas.

Cuando el fluido es desplazado por un objeto sólido, las moléculas en el fluido colisionan con el cuerpo, ejerciendo la misma presión tal como lo hacían antes de que el objeto fuera colocado. Para un cuerpo completamente sumergido, la presión será menor en la parte superior en comparación a la que tiene en la parte inferior, las moléculas golpean con mayor fuerza en la parte inferior ^[10].

Desde el punto de vista de la **energía**:

La fuerza de empuje es simplemente una consecuencia del principio de mínima energía potencial ^[11].

Si un objeto es más ligero que el fluido que lo rodea, y presionamos hacia abajo el objeto, el sistema objeto-fluido pierde energía potencial, está se convierte en energía cinética cuando se suelta el objeto, haciendo que el objeto suba sin ninguna fuerza externa. Se puede hacer algo similar para cuando el objeto es más pesado que el fluido ^[12].

Desde el punto de vista de la **tercera ley de Newton**:

La fuerza de empuje surge como fuerza de reacción al peso.

Un objeto sobre una mesa produce una fuerza de reacción al peso del objeto (llamada fuerza normal), en este caso la mesa se deforma ligeramente por la presencia del objeto (imperceptible a la vista, requiriendo de un experimento con espejos para verlo), entre más pesado es el objeto más se deforma la mesa para igualar la fuerza de peso; de la misma manera el fluido se deforma por la presencia del objeto, y entre más pesado el objeto más se sumerge en el fluido, es decir, más se deforma la estructura del fluido para igualar la fuerza de peso.

Capítulo 3

Principio de equivalencia y el estado de ingravidez

3.1 Principio de equivalencia

Bajo el nombre de principio de equivalencia suele agruparse cierta variedad de observaciones acerca del comportamiento de la materia en presencia de gravedad y/o movimientos acelerados.

Formalmente suelen presentarse tres tipos de principio de equivalencia para formular las leyes del movimiento de los cuerpos:

- Principio de equivalencia débil o principio de equivalencia de Galileo
- Principio de equivalencia de Einstein
- Principio de equivalencia fuerte

El ***principio de equivalencia débil***, también llamado ***principio de equivalencia de Galileo*** se puede enunciar de la siguiente manera: «En un campo gravitacional dado, todas las partículas de prueba, que tengan la misma velocidad inicial, caen con la misma aceleración»^[13].

Este principio se remonta al libro de Galileo Galilei “Diálogos sobre las dos nuevas ciencias”, en el cual Galileo narra un experimento mental:

Supongamos que dos cuerpos de pesos distintos se dejan caer desde cierta altura. Si el cuerpo más pesado cayera con mayor rapidez que el ligero, tendría que llegar primero al suelo. Pero supongamos que los dos cuerpos están amarrados con una cuerda. En este caso, el cuerpo más ligero retrasaría la caída del más pesado y, por lo tanto, los dos caerían más lentamente que si se tratara de un solo cuerpo con la masa de los dos; así, se llegaría a la conclusión absurda de que un cuerpo cae más rápidamente que sus partes. La contradicción, según Galileo, sólo se evitaría aceptando que todos los cuerpos caen de la misma forma, sin importar su peso^[14].

Una manera alternativa de formular el principio de equivalencia débil es: «La masa gravitacional de cualquier sistema es igual a su masa inercial»^[13].

Esto se puede ver de la siguiente manera, de la segunda ley del movimiento de Isaac Newton:

$$\mathbf{F} = m_{in}\mathbf{a},$$

donde la masa inercial (m_{in}) es la resistencia de un cuerpo a ser acelerado (\mathbf{a} : aceleración). A mayor masa inercial, menor aceleración producida por una misma fuerza, y viceversa.

Por otro lado, la masa gravitacional (m_{gr}) se toma de la ley de gravitación universal de Newton, donde se cumple que:

$$\mathbf{F} = m_{gr} \left(\frac{GM}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \right) = m_{gr}\mathbf{g}.$$

Para un objeto en caída libre, es decir, sin más fuerzas actuando en él, se tiene la igualdad de ambas fórmulas:

$$m_{in}\mathbf{a} = m_{gr}\mathbf{g},$$

por lo que el principio de equivalencia en forma débil especifica la igualdad entre las masas inercial y gravitacional, volviéndolas indistinguibles.

Esta formulación ha sido probada a gran precisión desde los experimentos de Eötvös ^{[15][16]} y es uno de los principios más probados de la física.

El **principio de equivalencia de Einstein** se obtiene al incorporar la relatividad especial al principio de equivalencia de Galileo. Einstein enunciaba la hipótesis de que «un campo gravitatorio uniforme es físicamente indistinguible de una aceleración uniforme del sistema de referencia» ^[17].

Formalmente engloba tres afirmaciones ^[17]:

- a) El principio de equivalencia débil (la caída libre de una partícula de prueba, neutra, en un campo gravitatorio, desde una posición dada y con una velocidad inicial dada, es independiente de su estructura interna y composición).
- b) El principio de invariancia Lorentz local (el resultado de cualquier experimento no gravitacional con partículas de prueba, de modo que sean ignorables las fuerzas de marea y las autoenergías gravitacionales, es independiente de la velocidad del inercial local).
- c) El principio de invariancia posicional local (el resultado de cualquier experimento prueba no gravitacional es independiente del lugar e instante en que se realice).

Hay infinidad de teorías de la gravitación compatibles con el principio de equivalencia de Einstein. Son las llamadas “teorías métricas de la gravitación” entre las cuales se encuentra la Teoría General de la Relatividad de Einstein ^[17].

El **principio de equivalencia fuerte** es el resultado de enriquecer el principio de equivalencia de Einstein con partículas con alto contenido de autoenergía gravitatoria y experimentos gravitacionales. Se puede formular de las siguientes maneras:

«En todos los laboratorios en caída libre que no roten los resultados de cualquier experimento local son los mismos, independientemente del campo gravitacional que rodea el laboratorio»^[13].

«En cada punto del espacio-tiempo es posible encontrar una transformación de coordenadas tal que las variables del campo gravitacional puedan ser eliminadas de las ecuaciones de campo de la materia»^[13].

Es decir, en un marco de referencia en caída libre, y en una vecindad lo suficientemente pequeña del espacio-tiempo, todas las leyes de la física obedecen las leyes de relatividad especial. En esta definición el término «local» debe entenderse como experimento que sólo involucra a una partícula puntual (para cuerpos o campos extensos aparecen fuerzas de marea que permitirían distinguir ambos casos).

El principio de equivalencia fuerte sugiere que la gravedad es de naturaleza puramente geométrica (esto es, la métrica determina los efectos de la gravedad) y no contiene ningún campo adicional asociado con ella.

3.2 Estado de ingravidez

La fuerza de gravedad (también llamada gravitatoria o gravitación) es la fuerza con la cual se atraen entre sí todos los cuerpos que tienen masa, es una fuerza de no-contacto, es decir que no requiere que los cuerpos estén en contacto para existir.

Se define como ingravidez al estado en el que un cuerpo que tiene un cierto peso se contrarresta con otra fuerza o se mantiene en caída libre sin sentir los efectos de la fuerza gravitatoria.

La ingravidez se experimenta (en personas, objetos y sistemas) durante la caída libre, el movimiento parabólico, durante el vuelo de la aeronave de gravedad reducida, en naves espaciales, o en general cuando se remueven todas las fuerzas de contacto.

Los términos “gravedad cero” o “nula gravedad” también se usan como sinónimos de “ingravidez”.

3.3 Consecuencia para la fuerza de empuje

Como resultado del principio de equivalencia de Einstein tenemos que un sistema en caída libre es indistinguible de un sistema en el cual no hay gravedad (lo mismo a una aceleración constante del sistema de referencia igual a cero).

Si tomamos en cuenta que el origen de la fuerza de empuje proviene de la gravedad, ya sea que sea vea desde el punto de vista de la presión hidrostática o de la energía potencial o considerándola una fuerza reacción al peso o del principio de Arquímedes, en un estado de ingravidez debe desaparecer.

Al pensar que el origen de la fuerza de empuje proviene del aumento de la presión con la profundidad, estamos considerando el peso del fluido para el cálculo de la presión en un punto, en un estado de ingravidez el fluido “pierde” su peso, y dejaría de percibirse la presión hidrostática en todos los puntos del fluido, esto resultaría en que la fuerza de empuje desaparece.

Si pensamos en el punto de vista de la energía, para el cálculo de la energía potencial se utiliza el peso del fluido y del objeto, pero en el estado de ingravidez tanto el fluido como el objeto “pierden” su peso, y el cálculo de la energía potencial nos daría como resultado que el sistema (fluido-objeto) ya está en su mínimo potencial de energía sin importar la configuración del sistema, por lo tanto desaparece la fuerza de empuje.

Si consideramos que la fuerza de empuje es una reacción a la fuerza de peso del objeto, en el estado de ingravidez al “perder” el objeto su peso, ya no se generaría la fuerza de reacción, es decir desaparece la fuerza de empuje.

Por último, el principio de Arquímedes menciona que la fuerza que ejerce el fluido sobre el objeto es igual al peso del fluido desplazado, pero en el estado de ingravidez el fluido tiene un peso nulo, es decir la fuerza de empuje es nula.

Otra forma de analizar lo que ocurre en el estado de ingravidez, es pensar en el problema de alguien que tiene una pesa sobre él, mientras el sujeto está sobre el suelo la pesa genera una presión sobre el sujeto, pero si ahora el sujeto y la pesa caen, el sujeto deja de sentir la presión de la pesa, esto se debe a el principio de equivalencia de Galileo, que nos dice que todos los objetos caen con la misma velocidad, si el sujeto sintiera en ese momento presión causada por la pesa, significaría que la pesa está cayendo más rápido, pero no es así. De la misma manera, en la caída libre el objeto y el fluido caen con la misma velocidad, es decir, el fluido ya no siente la presión del objeto y viceversa.

Para demostrar que la fuerza de empuje desaparece en la caída libre se mostrarán demostraciones experimentales en los capítulos 5, 6 y 7.

Capítulo 4

Algunas demostraciones de ingravidez

A modo de antología, en este capítulo se hablará de varias demostraciones pedagógicas de la ingravidez. Algunas son recuperadas de los artículos de Haym Kruglak ^{[2][3]} (quien a su vez no es el autor el original, sino que, al igual que yo aquí, hizo una recolección de experimentos con la temática de ingravidez, en su tiempo motivado por el interés en la física espacial ^[2]). Algunas de las demostraciones tomadas de Kruglak sirven solo de base, pues se hacen cambios a ciertas ideas y se complementa con otras.

4.1 Pesa y reacción inercial

- a. Una pesa de laboratorio es atada al gancho de una balanza de resorte con medidor grande. Cuando la balanza es sostenida, la posición del indicador en la balanza es interpretado como el “peso” del objeto. Cuando en realidad, la lectura de la balanza es la fuerza de reacción a la atracción gravitacional de la Tierra hacia el objeto. La pesa y la balanza son soltados de una altura de 8 a 12 pies hacia una colchoneta en el suelo. Durante la caída libre el medidor en la balanza regresa rápidamente a marcar cero. La balanza y el objeto están cayendo con la misma aceleración, y el resorte de la balanza jala la pesa de modo que el resorte ya no este extendido por la tensión. Esta demostración de Kruglak ^{[2][3]} es un caso especial del experimento M-103 de Sutton ^[18].
- b. Una variante es, en vez de usar una balanza, utilizar una banda de goma y un segundo objeto que sostenga la banda (como un soporte de laboratorio con una agarradera). Cuando el sistema es sujetado, colocamos la pesa en la parte inferior de la banda de goma, la atracción gravitacional sobre la pesa elonga la banda hasta que la atracción gravitacional es igualada por la fuerza elástica de la banda de goma estirada. Cuando se suelta el sistema y está en caída libre, la fuerza elástica de la banda de goma acerca a los objetos el uno hacia el otro. Para alguien que este cayendo con el sistema, la única fuerza aparente es la producida por la banda de goma estirada.

4.2 Fuerza elástica desequilibrada y el juguete de Einstein

- a. El “juguete de Einstein” (Figura 1) fue un regalo que Eric Rogers obsequio a Albert Einstein en su cumpleaños 76.

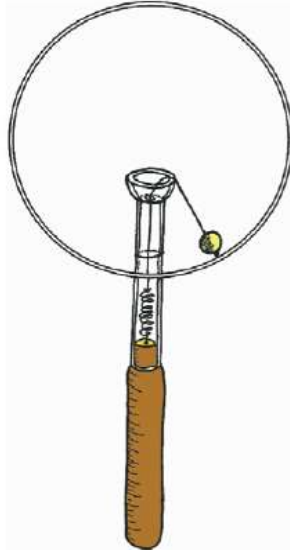


Figura 1. Juguete de Einstein.

Consistía en una bola de metal atada a un hilo y todo dentro de un globo transparente, en el centro del globo había una copa, también transparente, en la cual debería depositarse la bola de metal. Inicialmente, la bola estaba fuera de la copa y el hilo se pasaba por ella, y luego por un tubo central transparente. Debajo del globo, el hilo se ataba a un resorte, largo y débil, protegido por otro tubo transparente que terminaba en un trozo de madera cilíndrico. El problema consistía en que, si la bola cuelga fuera de la copa, se debe conseguir meterla en ella con un método absolutamente seguro en contraste con el resultado que se tendría agitando el trozo de madera al azar. Esta es la solución al problema dada por Einstein: “Ahora lo dejaré caer y de acuerdo con el principio de equivalencia no habrá fuerza gravitacional. El resorte será lo suficientemente fuerte para llevar a la bolita dentro del tubo de plástico”

- b. Una versión simplificada del “juguete de Einstein” consiste en una banda de goma o un resorte que es pegado al fondo de un contenedor abierto. La banda de goma es estirada sobre el borde de la parte abierta y contra balanceada con un objeto pequeño. Cuando al sistema se le permite caer libremente, el objeto y el contenedor tienen la misma aceleración hacia abajo, el objeto “pierde su peso” y es jalado hacia dentro del contenedor por la fuerza elástica desequilibrada.

4.3 Corrientes de convección

Una vela es fijada a la parte interna de un corcho que tapa una botella de capacidad de un galón. La vela es encendida y el corcho es puesto firmemente en el cuello de la botella invertida. Cuando la botella se suelta, la flama de la vela deja de fluir hacia arriba, ya que cuando no hay gravedad no hay un sentido de arriba o abajo, y en vez la flama toma una forma esférica. La ventaja de este arreglo es que la vela está completamente aislada, en comparación a cuando se deja caer solo la vela ^[18], pues el aire a su alrededor generaría resistencia y cambiaría la forma de la flama.

Además de caída libre, la falta de corrientes de convección puede ser mostrada al arrojar la botella hacia arriba o lanzarla de manera parabólica a un receptor. Si se quiere repetir la demostración varias veces, los gases de combustión pueden ser sacados rápidamente de la botella con aire comprimido. El oxígeno en un contenedor de un galón permite a la vela arder por un minuto aproximadamente.

En esta demostración hago corrección a una idea de Kruglak y R. M. Sutton ^[18], quienes afirmaban que la vela se apagaría ^[3]. La justificación de Kruglak yace en la idea de que, al no haber corrientes de convección, no se moverían los productos de la combustión y a su vez el oxígeno no se acercaría a la mecha de la vela. Esto ha sido desmentido con experimentos donde se deja caer una caja con el sistema y una cámara dentro (Figura 2).



Figura 2. Cambio en la forma de la flama de una vela cuando está en caída libre. (Imagen proporcionada por el profesor Adrián Corona).

4.4 Flujo por un orificio

Se taladra o perfora un pequeño agujero cerca del fondo de una lata o de una botella. Se pone un tapón en el agujero y se llena el recipiente con agua. Se sostiene el recipiente algunos metros sobre un cuenco. Se quita el tapón y el agua comienza a fluir, saliendo por el agujero y cayendo al cuenco. Se suelta el recipiente de forma que alguien lo cache antes de llegar al cuenco. Durante la caída libre el flujo del agua cesa. El agua y el contenedor están cayendo juntos y el agua no deja al contenedor.

Capítulo 5

Algunas demostraciones de la ausencia de la fuerza de empuje en la caída libre

A continuación, se presentan demostraciones pedagógicas de la ausencia de la fuerza de empuje en la caída libre. La primera demostración (5.1) es de la colección de Kruglak ^{[2][3]}, la segunda (5.2) es de J. Sliško y G. Planinšič ^[4], y la tercera (5.3) es de J. Sliško ^[5].

5.1 Principio de Arquímedes

Un corcho o bola de madera, o cualquier objeto pequeño que flote es colocado en un vaso alto o cilindro de plástico transparente. El vaso es llenado con agua y sellado. El cilindro es volteado de cabeza para mostrar que el objeto subirá a lo más alto del cilindro. El cilindro es volteado una vez más, pero cuando el objeto haya subido aproximadamente a la mitad, el cilindro es soltado o arrojado hacia arriba, o lanzado en trayectoria parabólica hacia un receptor. El objeto se verá en reposo relativo al tubo: ya que el peso específico del objeto y el agua se vuelven cero, la fuerza de empuje desaparece. La misma demostración puede repetirse con un objeto pequeño que se hunda.

Plexiglás o algún otro tubo de plástico transparente puede usarse para hacer cilindros de demostración permanentemente sellados; unas dimensiones convenientes son: largo del tubo de 18 a 20 pulgadas, diámetro de una pulgada y media.

5.2 Fuerza elástica y fuerza de empuje

Una pesa es enganchada a una punta de un resorte o banda de goma, en la otra punta se sujeta un corcho grande. Se coloca el sistema dentro de un cilindro alto, de modo que la pesa este en el fondo. Se llena el cilindro con agua. Se escoge un resorte tal que la tensión permita que una parte del corcho esté sobre la superficie del agua. El cilindro se suelta hacia un receptor. Durante la caída libre la fuerza de empuje se vuelve cero, pero la fuerza elástica del resorte no, de tal forma que ésta jala al corcho por debajo de la superficie del agua.

Otra demostración donde se puede ver este efecto en caída libre, donde la fuerza de empuje desaparece, pero se mantiene la fuerza elástica, es el siguiente:

Se utiliza una botella grande de refresco (preferentemente lisa y de al menos 2 litros), un botón u otra pieza de plástico plana, un resorte débil, una manguera delgada, unos globos y una pistola de silicón.



Figura 3. Ensamblaje del experimento de la demostración.

Se engancha un extremo del resorte al botón (Figura 3(a)) y se pega a la tapa de la botella usando la silicona caliente (Figura 3(b)). Se introduce el globo, dejando la parte abierta del globo afuera de la botella. Si se intenta inflar el globo en este momento, se dará cuenta de que es imposible, sin importar que tan fuerte se sople, la solución es usar una manguera delgada, esto asegura que la presión dentro de la botella se mantiene igual a la presión ambiental mientras se infla el globo (Figura 3(c)). No debe inflarse mucho el globo. Un globo más grande es más visible, pero experimenta una mayor fuerza de arrastre durante el movimiento en el agua, esto se traduce en un mayor tiempo de reacción.

Una vez que el globo está inflado, se cierra y se ata a la otra punta del resorte (Figura 3(d)). Se llena la botella de agua, se cierra la botella con la tapa y se voltea la botella (Figura 3(e)). El sistema está listo para experimentar. Se puede subir a una silla para que sea más tiempo el que dure la caída y sea más visible el efecto, se suelta la botella desde lo alto y se le deja caer a una caja con bolitas de poliestireno que amortigüen su caída y prevengan que se rompa el sistema. Se puede ver que en cuanto se suelta la botella, el globo comienza a moverse hacia la tapa de la botella (Figura 4).

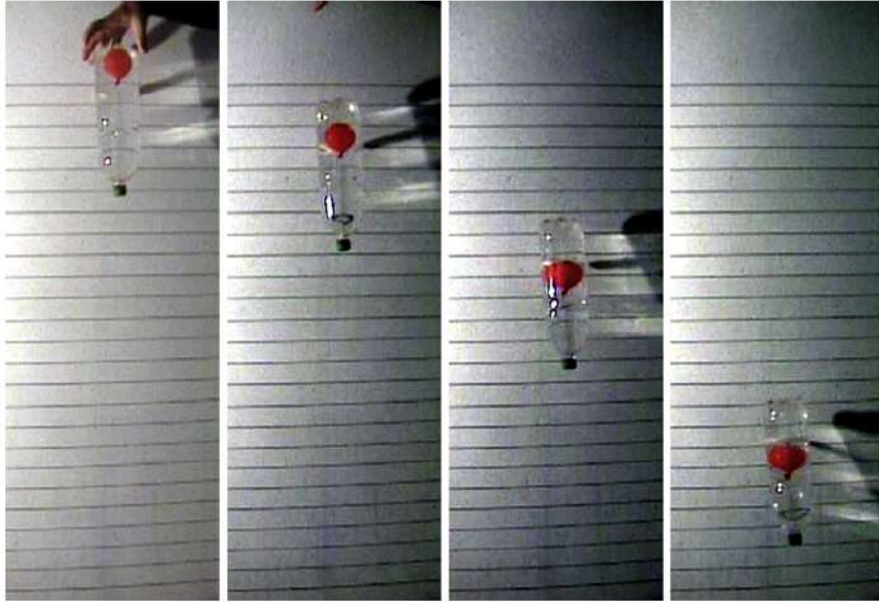


Figura 4. Botella con globo y resorte en caída libre.

Cuando la botella está en reposo (Figura 3(e)), la fuerza de empuje es mayor a la fuerza elástica del resorte. En la botella cuando está siendo acelerada por la gravedad, la fuerza de empuje desaparece, pero la fuerza elástica del resorte se mantiene sin cambios, y así puede jalar el globo.

Un segundo experimento que se puede hacer con el mismo sistema es lanzar la botella verticalmente hacia arriba y después cazarla. Se ve que en cuanto la botella deja de estar en contacto con las manos del experimentador, el globo comienza a descender al fondo de la botella (Figura 5).

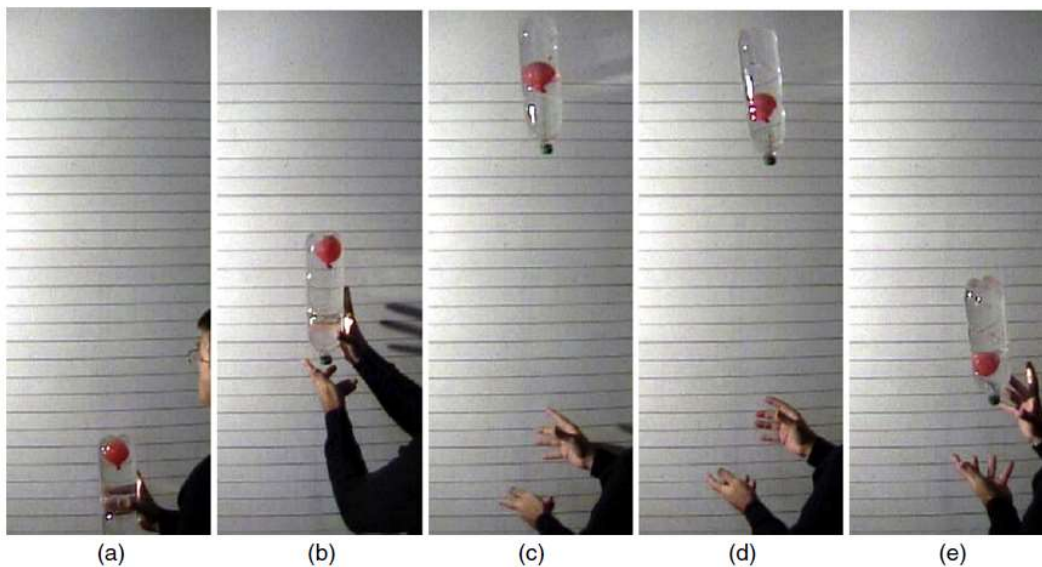


Figura 5. Botella con globo y resorte lanzada verticalmente hacia arriba.

Esto se debe a que la botella que se mueve libremente hacia arriba también está siendo acelerada hacia abajo por la gravedad y así, la fuerza de empuje desaparece en este caso también.

Tomando en cuenta que para lanzar la botella hacia arriba se acelera el sistema con las manos, se podría tener un razonamiento analógico de una experiencia cinestésica: “cuando una persona está en un elevador que se mueve hacia arriba desde el reposo, la persona se siente más pesada. Consecuentemente, cuando el globo es “más pesado” debería bajar”. Pero cuando se analiza el video del experimento, se puede apreciar que el globo no se mueve hacia abajo durante la aceleración vertical provocada por las manos del experimentador (Figura 5(a) y (b)). De hecho, la fuerza de empuje se vuelve aún más grande durante este periodo que cuando está en reposo. El globo solo comienza a bajar durante el movimiento desacelerado de la botella (es decir, cuando deja de estar en contacto con las manos del experimentador, Figura 5(c)-(e)), esto es consistente con la explicación dada.

5.3 El buzo cartesiano y los principios de Arquímedes y de Pascal

El sistema llamado “buzo cartesiano” consiste en un buzo (por ejemplo, un gotero), con un poco de aire dentro, que se inserta en una botella de plástico cerrada y llena de agua.

El buzo cartesiano muestra que al incrementar la presión externa se inducen cambios en su densidad y la fuerza de empuje actuando en él. Si no se aumenta la presión externa (es decir, en reposo), el gotero que se ajustó para que tuviera una densidad menor que la del agua (aumentando la cantidad de aire que tiene dentro), flota en la superficie (principio de Arquímedes). En esta situación la fuerza de empuje es igual al peso del buzo.

Cuando aumentamos la presión externa (aplastando la botella), debido al principio de Pascal, el volumen del aire dentro del gotero se encoje, la densidad general del gotero se vuelve mayor a la del agua, y el gotero se hunde al fondo (Figura 6).



Figura 6. Al aumentar la presión externa el buzo se hunde.

El movimiento hacia abajo es debido a que la fuerza de empuje se vuelve menor al peso del gotero.

Al dejar de presionar la botella, la presión externa regresa a la normalidad, el aire dentro del gotero se expande y el gotero sube a la superficie. Esto se debe a que la fuerza de empuje vuelve a ser mayor que el peso del gotero.

Si se deja de presionar la botella y simultáneamente se deja que la botella caiga libremente, entonces el buzo se mantiene en el fondo de la botella (Figura 7).



Figura 7. Botella con buzo cartesiano en caída libre.

Este comportamiento del buzo se debe a que durante la caída libre el interior de la botella puede pensarse como un espacio de gravedad cero. En ese espacio todas las fuerzas relacionadas a la gravedad desaparecen, y consecuentemente, el agua no ejerce fuerza de empuje.

Capítulo 6

Una demostración de la ausencia de la fuerza de empuje por los estudiantes

En este capítulo, presento el artículo de J. Slisko, y R. del Rosal ^[1]. La demostración que aquí se presenta sirvió en parte de inspiración para la nueva demostración de ausencia de fuerza de empuje en la caída libre, de la cual se hablará en el capítulo 7.

De acuerdo con el principio de equivalencia, no hay un campo gravitacional local dentro de un sistema que cae libremente. Consecuentemente, todas las fuerzas relacionadas con la gravedad desaparecen. Entre ellas está la fuerza de empuje.

Hace algunos años, una nueva demostración de la ausencia de fuerza de empuje fue propuesta por un grupo de tres estudiantes del Dr. Josip Slisko. Los estudiantes predijeron que una burbuja de aire, formada con la ayuda de un popote de plástico en una botella llena de agua, no debería subir a la superficie si la botella cae libremente. Esto no ocurre si la botella está en reposo, donde, debido a la presencia de la fuerza de empuje, la burbuja debe subir rápidamente a la superficie del agua.

Los estudiantes llevaron a cabo con bastante facilidad el experimento que demostró que su predicción era correcta. Para obtener confirmación visual, el experimento fue repetido y grabado (Figura 8). Nótese que el volumen de la burbuja aumenta a medida que sube. La forma de la burbuja también cambia.



Figura 8. Comportamiento de la burbuja cuando el sistema está en reposo.

Como ya se dijo, para el sistema en caída libre, debido a la ausencia de fuerza de empuje, una burbuja formada en el agua debe mantenerse en su lugar, y mantener su forma esférica. Desafortunadamente, los estudiantes no fueron capaces de demostrar el comportamiento del agua que habían predicho, pues les era difícil formar la burbuja en el preciso momento en que soltaban la botella. Recientemente, después de muchos intentos, Ricardo del Rosal Garduño logró llevar a cabo una demostración exitosa del comportamiento de la burbuja predicho (Figura 9).

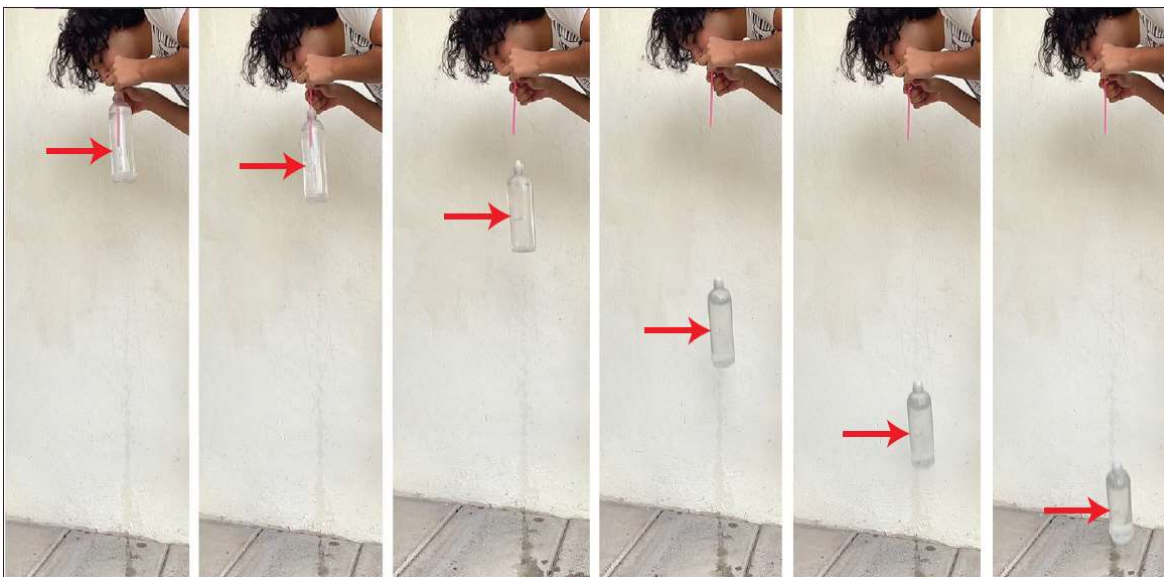


Figura 9. Burbuja formada en la botella mientras el sistema cae libremente.

Capítulo 7

Una nueva demostración de la ausencia de fuerza de empuje en la caída libre

Para mostrar los efectos de ingravidez que se producen dentro de una botella mientras está en caída libre, ideé un experimento en el cual a una botella con agua se le introduce aire casi en el fondo; mientras está en reposo relativo, con los efectos gravitacionales normales, lo que ocurre es que el aire sube instantáneamente, en forma de pequeñas burbujas, esto debido a la fuerza de empuje; pero mientras está en caída libre, se pierden los efectos gravitacionales del sistema, entonces no se manifiesta la fuerza de empuje, pero la fuerza elástica del globo sigue presente, así que el globo se desinfla de manera regular introduciendo aire a la botella, y el aire que se introduce ya no debería subir a la superficie de la botella en forma de pequeñas burbujas, sino que se debería quedar en el punto donde se está ingresando, y formar una gran burbuja de aire, que lograra desplazar el agua de su alrededor.

Mi idea para mostrar lo anterior fue construir un sistema botella-globo, donde el globo se infle con aire y se coloque con un popote en la botella de agua, de esta manera cuando el sistema está en caída libre, el globo se desinfla e introduce aire en la parte inferior de la botella, pues la fuerza elástica del globo no se pierde cuando están presentes los efectos de ingravidez.

Para mi experimento se utiliza una botella de plástico que se llena parcialmente de agua (Figura 10(a)), en la tapa de ésta se hace una perforación por la cual se introduce un popote metálico (Figura 10(b)), metálico para que no se deforme como lo puede hacer uno de plástico, en un extremo del popote se pone un globo y se le asegura con una liga (Figura 10(c)), se infla el globo por el extremo opuesto del popote (Figura 10(e)), se introduce en la botella mientras se impide el paso del aire del globo a la botella presionando el otro extremo del popote, es decir, en la punta que está ligado el globo (Figura 10(f)), mientras se impide el paso del aire se debe enroscar la tapa a la botella, y cuando ya está todo posicionado se suelta el sistema.

En mis primeras observaciones durante la caída libre del sistema, lo que ocurría es que se comenzaba a formar una gran burbuja de aire en la punta del popote que está dentro del agua, y el popote se comenzaba a desplazar hacia arriba de la botella, y como un cohete salía expulsado de la botella el popote con el globo. Para evitar que esto siguiera ocurriendo, lo que hice fue, colocar una banda de goma en el popote por la parte interior de la tapa de la botella (Figura 10(d)), de esta forma se evita que se deslice. Además, como el fondo en el

que se hizo los experimentos es de color claro, opte por poner un poco de colorante al agua (Figura 10(g)).



Figura 10. Ensamblaje del sistema botella-burbuja de la nueva demostración

En mis siguientes observaciones durante la caída libre del sistema, lo que sucedía era que se comenzaba a formar una burbuja esférica de aire en el interior de la botella, que no subía a la superficie de la botella, pero si se encontraba muy llena la botella, al no poderse desplazar el agua hacia ninguna parte, se dejaba de desinflar el globo y la burbuja dejaba de crecer. Esto por su cuenta ya es muestra de que no hay fuerza de empuje durante la caída libre, pues si la hubiera esta burbuja subiría.

Pero para mí las preguntas seguían surgiendo, ¿qué pasaría si el agua que está dentro de la botella tuviera a donde irse?

Para solucionar esto, le hice unos orificios en la parte superior de la botella, de esta manera el agua que intenta desplazar la burbuja puede salir por estos orificios.

Para grabar el experimento, gracias al maestro Corona, se utilizó una cámara que tiene la función de cámara lenta, de esta manera se pueden obtener unas imágenes más claras del evento.

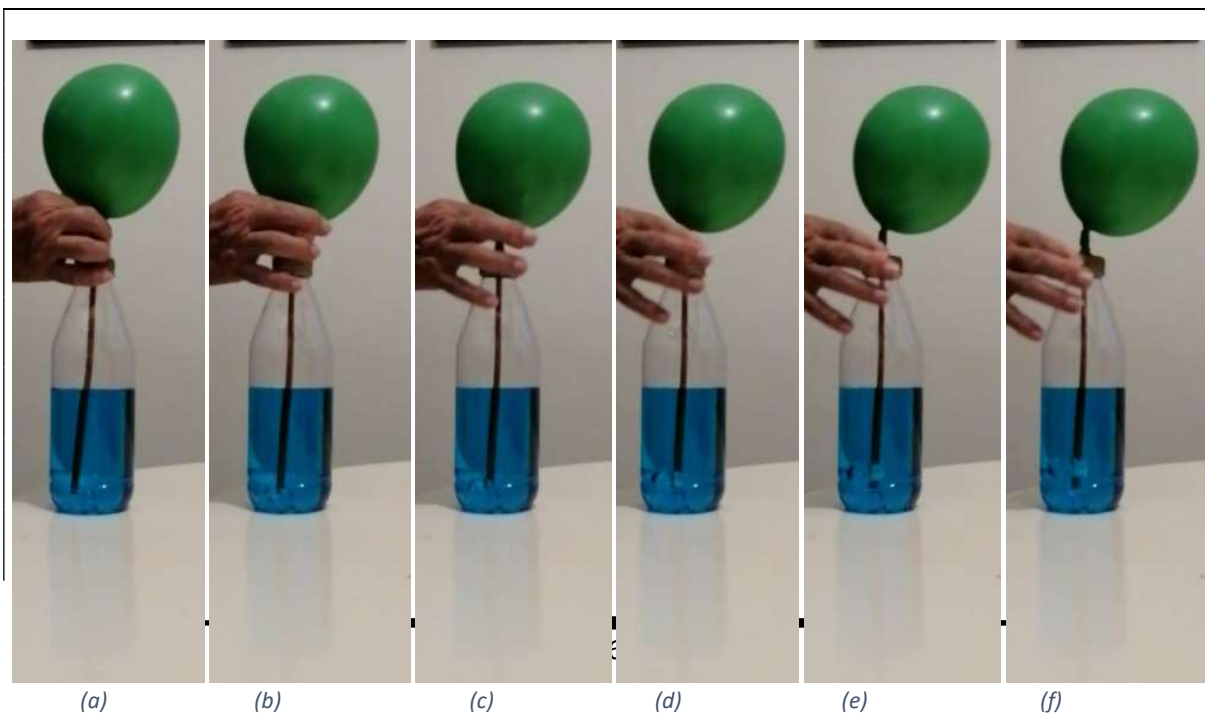
En las observaciones que de aquí en adelante presento, el resultado es el que se esperaba; mientras el sistema se encuentra en caída libre:

- en la punta inferior del popote se comienza a formar una burbuja de aire esférica.
- al no haber fuerza de empuje la burbuja se mantiene en su posición.
- al seguir habiendo fuerza elástica en el globo, este se sigue desinflando, introduciendo más aire a la botella, que hace crecer cada vez más a la burbuja.
- el agua que se encuentra por encima de la burbuja se va desplazando, permitiendo la entrada de más aire por el popote.
- el agua que se desplaza a la altura de los agujeros es expulsada de la botella.

A continuación, mostrare algunas imágenes de las secuencias capturadas, en las secuencias 1 y 2 el sistema está en reposo sobre una mesa, en las secuencias 3, 4 y 5 se observa el sistema en caída libre (para ver los videos se puede entrar a esta liga: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLnu0Rur8piKblmL8TglEzd3wuTtcf9xCl>):

Secuencia 1.

En esta primera secuencia, se muestra el sistema cuando está sobre una mesa, y se libera el paso de aire:



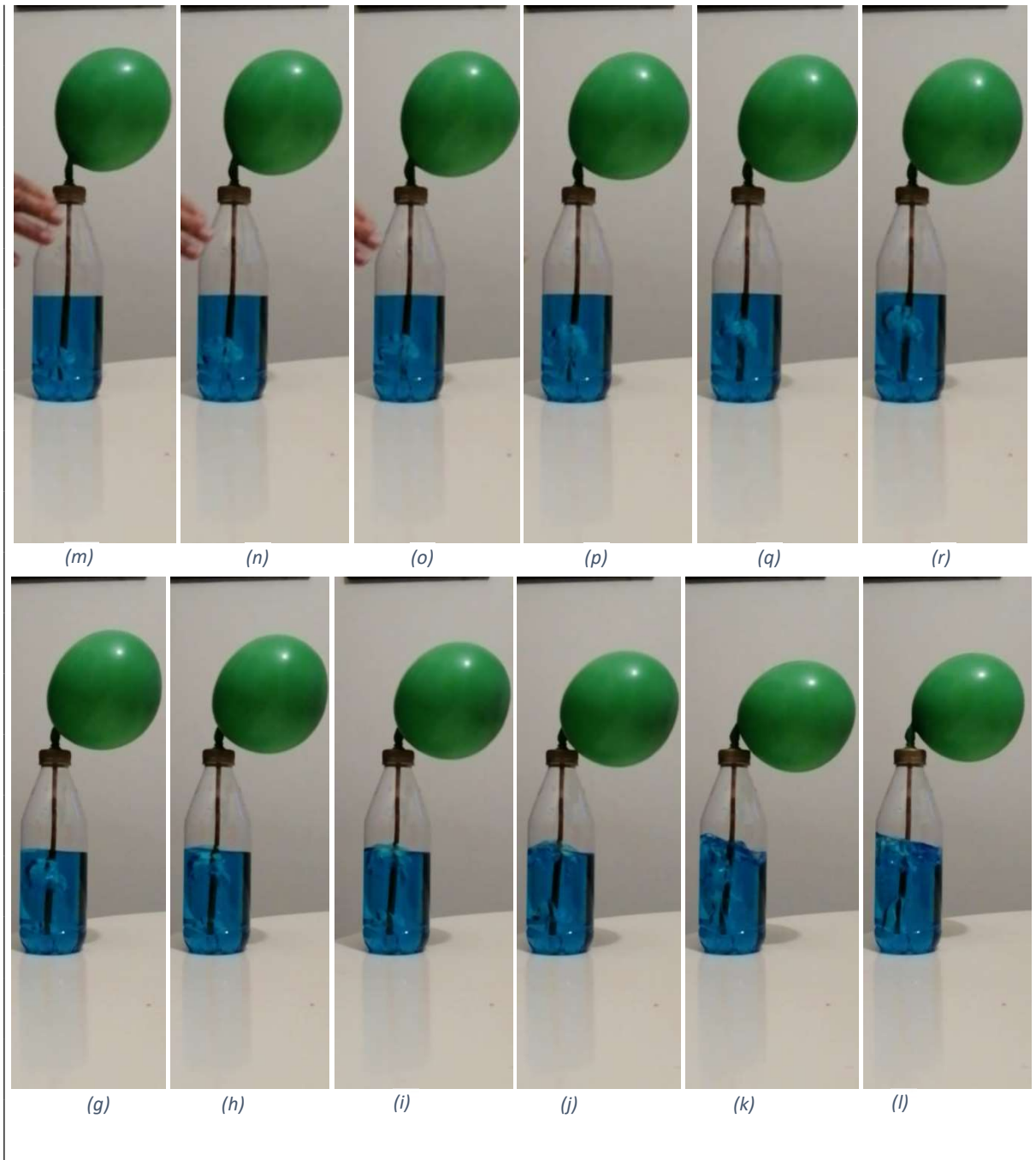


Figura 11. Sistema en reposo sobre una mesa (sin caída libre) donde se permite pasar el aire del globo a la botella.

Como se puede apreciar, la burbuja no se queda en la parte inferior de la botella, sino que bien se empieza a formar, ésta ya comienza a subir y se separa del popote, la primera burbuja sigue subiendo hasta llegar a la superficie del agua, pero en cuanto se separó esa burbuja del popote, se crea una nueva burbuja que hace lo mismo, y así una y otra vez.

Secuencia 2.

En esta secuencia la botella está más llena de agua:

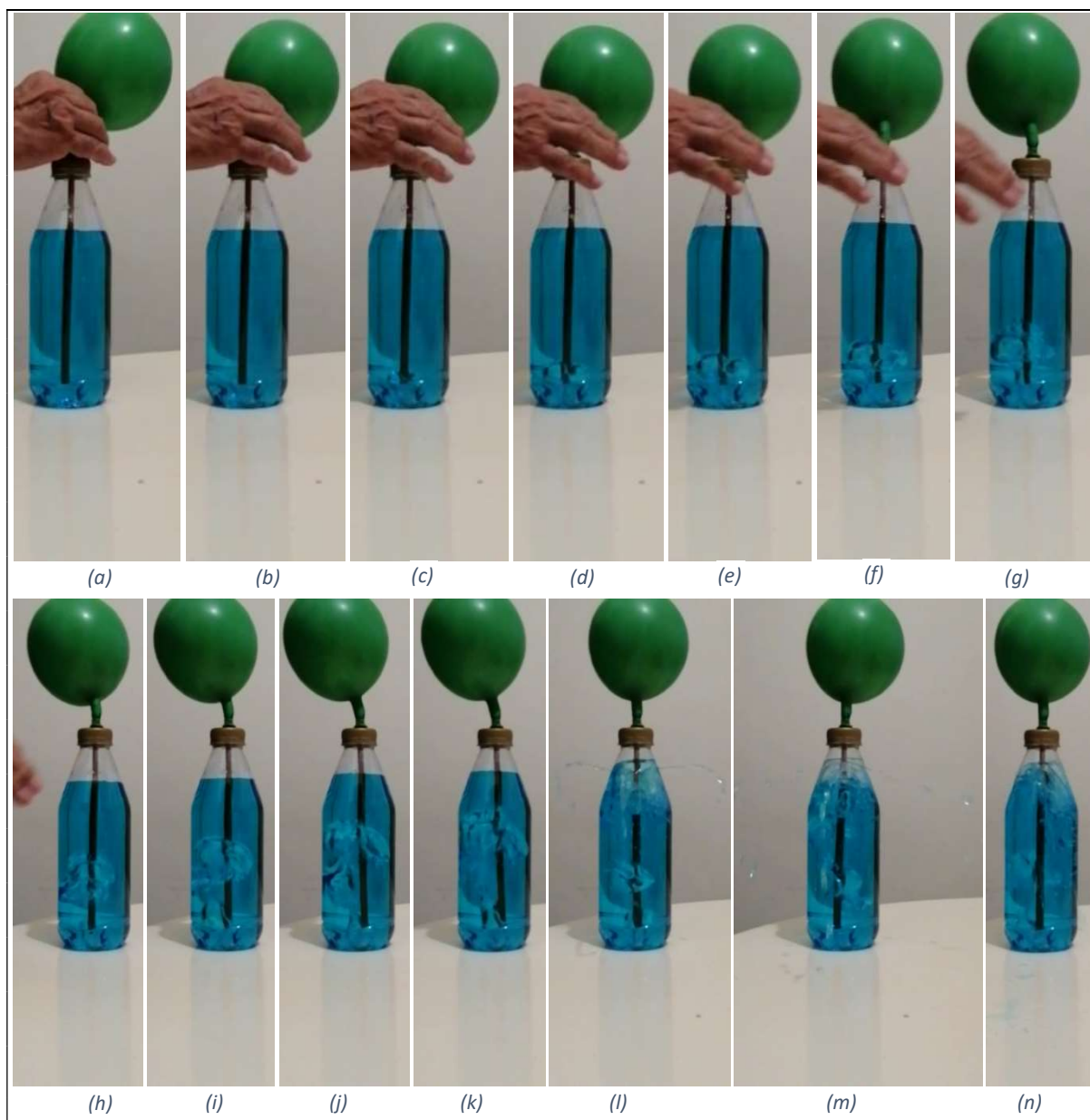


Figura 12. Sistema en reposo sobre una mesa, donde la botella está más llena de agua, y se permite el paso del aire.

Aquí ocurre lo mismo que en la Secuencia 1 (Figura 11), se forma una burbuja tras otra, y todas van subiendo al instante. En un momento (Figura 12. (l) y (m)) se ve que, como va subiendo el nivel del agua por el aire que se está introduciendo, el agua llega a los orificios y se sale, pero solo un chorrillo y deja de salir agua, pues lo que sigue llegando ahí es el aire de las burbujas.

Secuencia 3.

En esta secuencia el sistema globo-botella se dejó caer libremente.

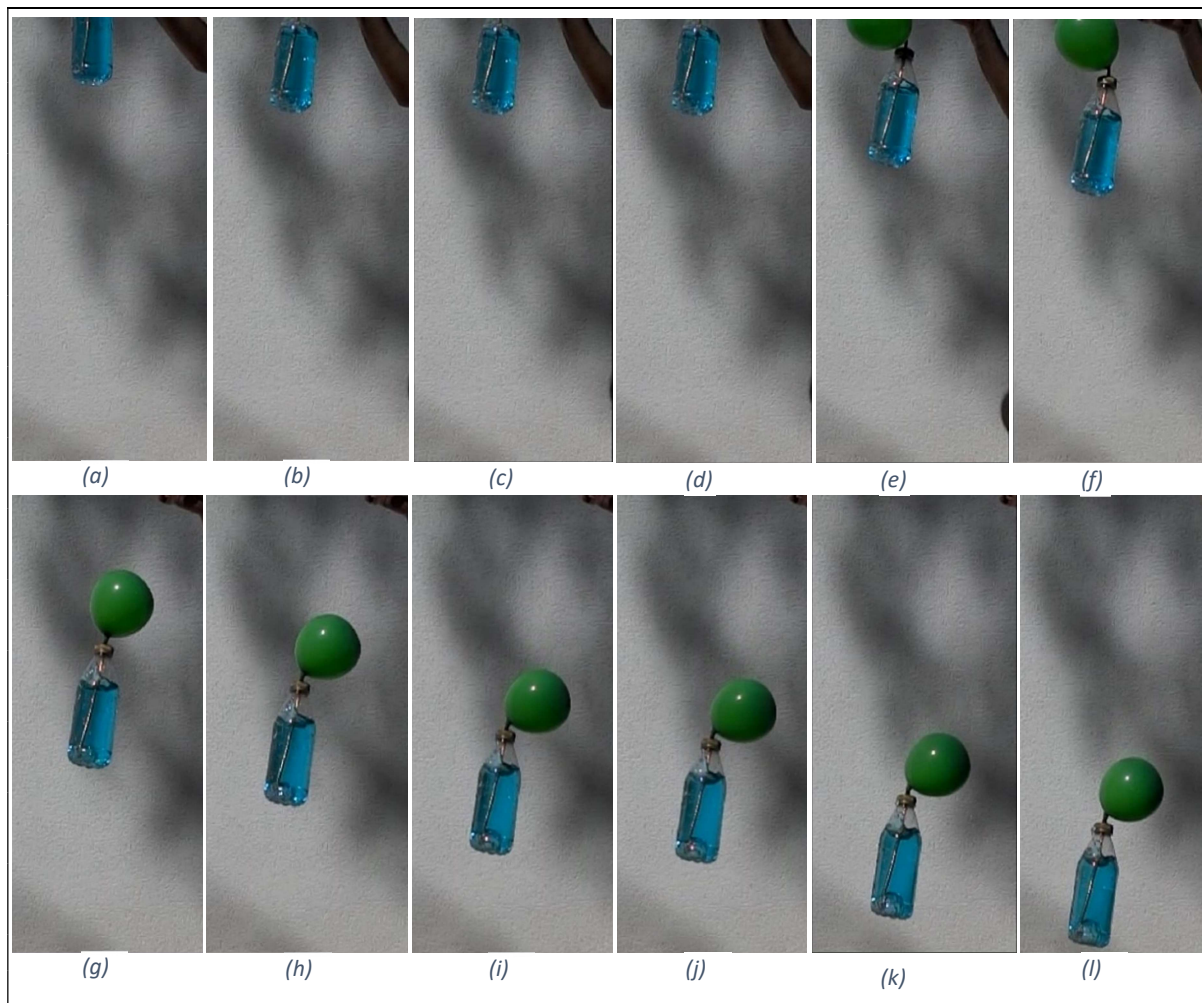


Figura 13. Sistema globo-botella en caída libre.

Se puede apreciar en la secuencia 3 (Figura 13) que conforme cae la botella, entra aire en el fondo del agua, se forma una burbuja en la punta del popote, se mantiene en su lugar, y va creciendo de forma esférica.

A diferencia del caso en reposo (Figura 11 y 12) donde las burbujas que se forman suben instantáneamente.

Esto solo es posible si no hay fuerza de empuje.

Secuencia 4.

En la secuencia 3 (Figura 13) se puede ver que el nivel del agua aumenta conforme la burbuja crece, para hacer más notorio este efecto, en esta secuencia (Figura 14) la botella está más llena de agua, y recordemos que la botella tiene orificios por donde puede salir el agua si es que llega a ese nivel:

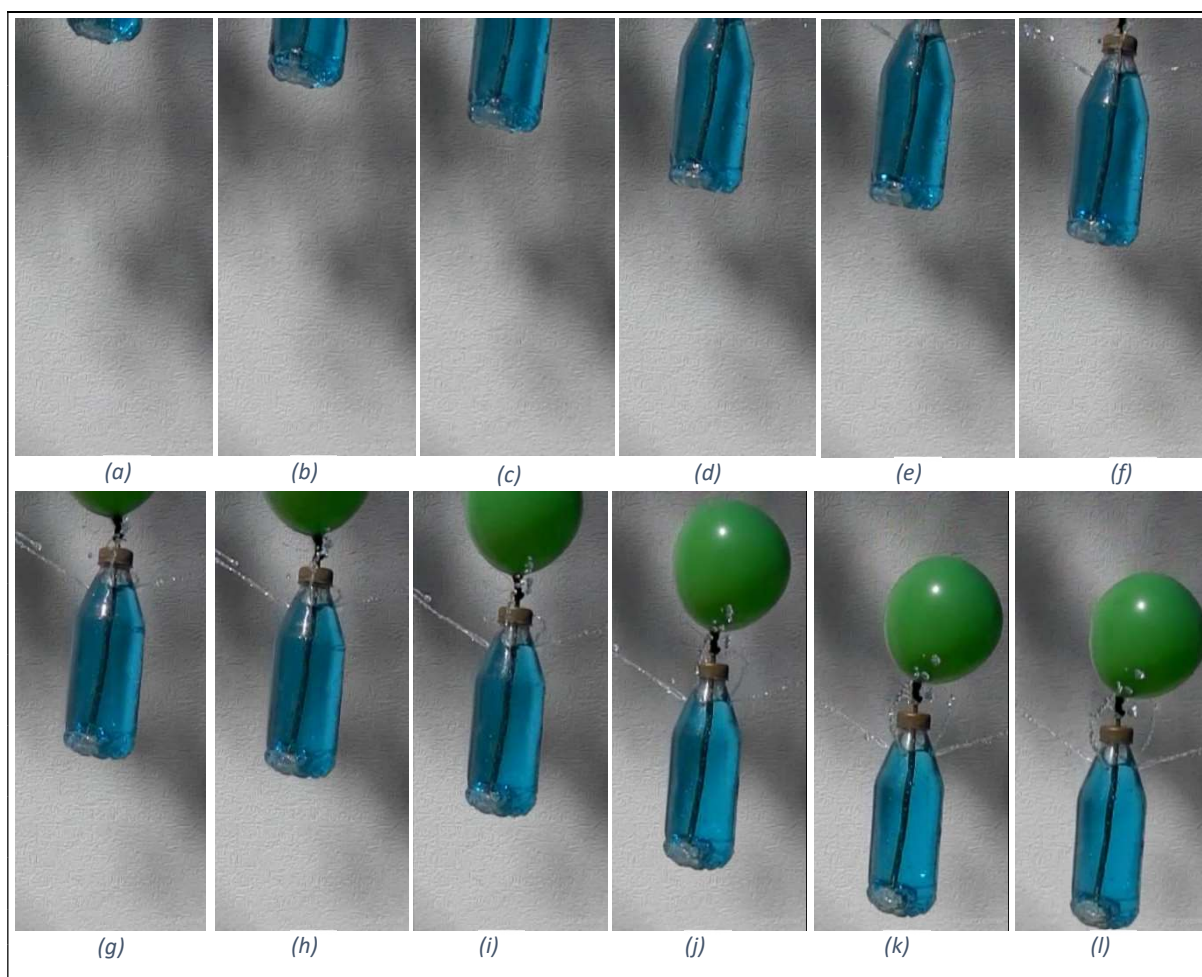


Figura 14. Sistema globo-botella en caída libre, con la botella más llena de agua.

En esta secuencia en particular, aparte de los efectos ya mencionados, se puede apreciar otro efecto que ocurre por la falta de los efectos de la gravedad en el sistema; el efecto al que me refiero es a la trayectoria del flujo de agua que sale de la botella, al tener un flujo constante de agua es fácil de observar. En un campo gravitacional normal, la trayectoria que se formaría debe ser de forma parabólica (Figura 15).



Figura 15. Botella expulsando flujo continuo de agua sin estar en caída libre.

En el caso de la caída libre (Figura 14), al no haber localmente una fuerza gravitacional, para nuestro sistema la trayectoria deja de ser una parábola, y en vez, el flujo del agua crea una trayectoria lineal, como si de un movimiento rectilíneo uniforme se tratase.

Secuencia 5.

En esta secuencia (Figura 16) se puede ver la botella desde antes de que se suelte y se permita el paso del aire:

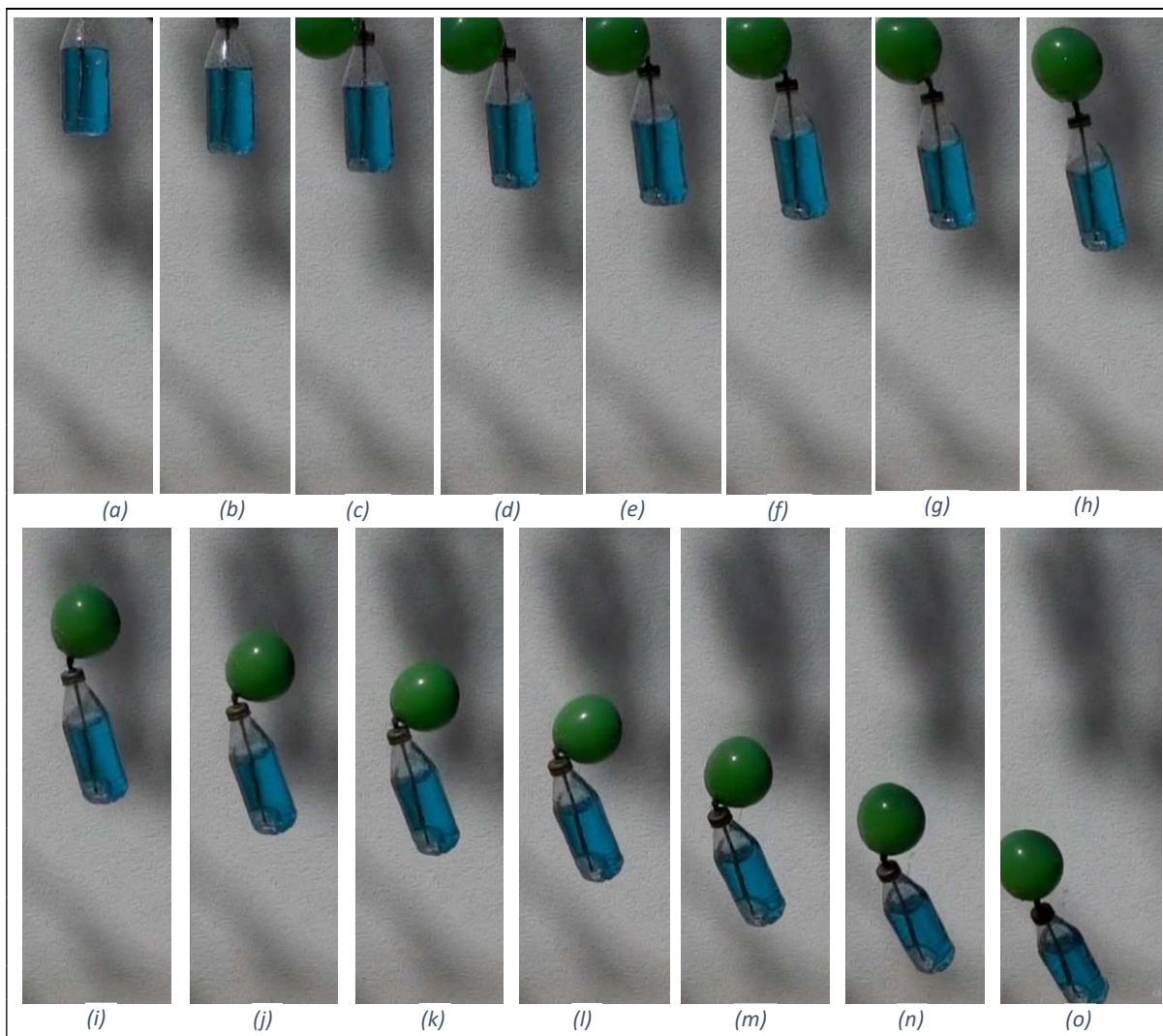


Figura 16. Sistema en caída libre, donde se ve más la botella previa a ser soltada.

Esta secuencia muestra de forma muy clara el efecto esperado, la burbuja se mantiene en el punto donde se comienza a inflar por el popote, a medida que cae el sistema la burbuja sigue creciendo y en ningún momento sube, sino que en vez el aire es capaz de levantar el agua, demostrando inequívocamente que la fuerza de empuje desaparece en la caída libre.

Capítulo 8

Conclusión

En respuesta a la pregunta formulada al inicio de esta tesis: “¿qué ocurrirá cuando el sistema esté en caída libre?”, la hipótesis presentada resultó ser la correcta.

A partir del momento en que se permite el paso del aire del globo hacia el interior de la botella se forma una burbuja de aire rodeada por el agua que está en el interior de la botella.

La burbuja no se mueve hacia la superficie en ningún momento del trayecto, sino que continúa creciendo en su lugar relativo a la botella. A diferencia del caso en donde el sistema está en reposo (donde suben abruptamente las burbujas creadas).

Y contra intuitivamente, la burbuja de aire (al seguir creciendo) es quien desplaza al agua. Logrando incluso expulsar el agua de la botella. Esto solo es posible si no hay fuerza de empuje. De lo contrario, si estuviera presente la fuerza de empuje, debería ocurrir lo mismo que cuando el sistema está en reposo.

De esta manera queda demostrado inequívocamente que la fuerza de empuje desaparece en la caída libre.

En contraste con los experimentos de Kruglak ^{[2][3]}, y los de Slisko & Planinšič ^{[4][5]} en esta tesis la fuerza de empuje se ejerce sobre aire (en vez de madera o globos inflados); y a diferencia de la demostración en el artículo *A bubble-based demonstration of free-fall weightlessness* ^[1], no se tiene que lograr soplar la burbuja en el momento preciso (lo cual fue complicado para los autores), sino que solo dejar de presionar la punta del popote, esto vuelve el nuevo experimento que en esta tesis se presentó más fácilmente replicable.

Además de probar que la fuerza de empuje deja de manifestarse en la caída libre, gracias a el efecto que muestra el flujo de agua en la secuencia 4 (Figura 15), se obtiene la respuesta a la otra pregunta:

“¿qué pasaría si el agua que está dentro de la botella tuviera a donde irse? “

La respuesta es: sale de la botella en un movimiento rectilíneo uniforme.

Esto se puede explicar pensando en el tiro parabólico. La trayectoria en forma de parábola se obtiene como la suma de dos componentes, una componente es el movimiento rectilíneo uniforme y la otra componente se efectúa por la gravedad, consecuentemente. Como en este experimento el sistema ya está en caída libre, al mantenernos con el sistema de referencia de la botella ya estamos tomando la componente de la gravedad, y como resultado ya solo veríamos la componente del movimiento rectilíneo uniforme.

Para hacer más claro este resultado, de qué trayectoria tiene un lanzamiento producido en caída libre, se puede crear una nueva demostración con un dispositivo similar, en donde en uno de los agujeros por el cual se expulsa el agua, se ponga una tachuela o un objeto pequeño que pueda rastrearse, al estar en caída libre el proyectil saldrá impulsado por el agua.

La predicción que aquí presento es que con respecto al sistema de referencia de la botella, parecerá ir con un movimiento rectilíneo uniforme, pero si además se le rastrea con un sistema de referencia inercial al suelo, lo que se verá es que en ese sistema forma una parábola. La confirmación de esta demostración se deja como un futuro proyecto, pues excede lo buscado en esta tesis, en la cual el objetivo era demostrar con un nuevo experimento que en la caída libre desaparece la fuerza de empuje.

Los experimentos que a forma de antología aquí se mostraron sirven para la presentación de varios temas a los estudiantes, en particular para mostrar claramente el principio de equivalencia, y varios de los efectos que se pueden observar en la caída libre; al ser la mayoría sencillos y fácilmente replicables, se alienta a que los estudiantes reproduzcan algunos de estos, esperando atraer su atención a los fenómenos físicos, y que intenten predecir los efectos que ocurrirán, con el fin de que se alimente la creatividad en ellos, y de esta forma podría ser que ellos ideen nuevas demostraciones o estrategias para resolver problemas.

Bibliografía

- [1] Slisko, J., & del Rosal R. (2022). A bubble-based demonstration of free-fall weightlessness. *The Physics Teacher*, 60(6), 527.
- [2] Kruglak, H. (1962). Demonstrations of weightlessness. *American Journal of Physics*, 30(12), 929-930.
- [3] Kruglak, H. (1963). Apparatus for teaching physics: Physical Effects of Apparent" Weightlessness". *The Physics Teacher*, 1(1), 34-35.
- [4] Sliško, J., & Planinšič, G. (2010). Hands-on experiences with buoyant-less water. *Physics Education*, 45(3), 292–296.
- [5] Slisko, J. (2020). A new role for the Cartesian diver: Showing free-fall weightlessness. *The Physics Teacher*, 58(6), 446-446.
- [6] Erlend H. Graf (2004). Just What Did Archimedes Say About Buoyancy? *The Physics Teacher*, 42, 296-299.
- [7] F.M.S. Lima (2012). Using surface integrals for checking Archimedes' law of buoyancy. *European Journal of Physics*, 33, 101-112.
- [8] F.M.S. Lima et al (2014). A downward buoyant force experiment. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(2), 2309.
- [9] G.B. Benedek, F.M.H. Villars (2000). *Physics With Illustrative Examples from Medicine and Biology: Mechanic*. Springer Science & Business Media, p. 199.
- [10] Trefil, J. (2003). *The nature of science: An A-Z guide to the laws and principles governing our universe*. Boston: Houghton Mifflin, p. 22.
- [11] J Sabaryati et al (2021). Viewing buoyant force as an application of principle of minimum potential energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1816 012110, 1-7.
- [12] Ker Liang Goh (2018). Archimedes' Principle Using Energy Considerations. *The Physics Teacher*, 56, 616-617.
- [13] Hans C. Ohanian (1977). What is the principle of equivalence? *American Journal of Physics*, 45, 903-909.
- [14] Hacyan, S. (2020). El principio de equivalencia y la relatividad general. Analogías y conexiones en la Física, (pp. 57-65), CopIt-ArXives.
- [15] Dicke, R. H. (1961). The Eötvös Experiment. *Scientific American*, 205(6), 84-95.
- [16] Eötvös, R., Pekár, D., & Fekete, E. (1922). Beiträge zum gesetze der proportionalität von trägheit und gravität. *Annalen der Physik*, 373(9), 11-66.
- [17] Galindo, A. (2011). En recuerdo de Albert Einstein (2). *Revista Española de Física*, 19(4), 8-10.
- [18] R. M. Sutton (1938). *Demonstration experiments in physics*. McGraw-Hill Book Company, Inc.