

## El principio de Arquímedes en sistemas acelerados y su relación con el principio de equivalencia: Un conflicto cognitivo

Ninfa Garrido

*Departamento de Matemática y Física, Facultad de Humanidades y Educación, Universidad del Zulia (LUZ), Ciudad universitaria. Maracaibo. Postgrado en Aprendizaje y Enseñanza de la(s) Ciencia(s), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, La Hechicera. E-mail: ninfagarrido@hotmail.com - evefpostgrado@ula.ve*

María Judith Arias

*Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, LUZ. Postgrado en Aprendizaje y Enseñanza de la(s) Ciencia(s), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, La Hechicera. E-mail: mjjudithar@hotmail.com - evefpostgrado@ula.ve*

Félix Aguirre

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias, ULA. Postgrado en Aprendizaje y Enseñanza de la(s) Ciencia(s), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, La Hechicera. E-mail: aguirre@ula.ve - evefpostgrado@ula.ve*

*"¿Cuál es la justificación de nuestra preferencia por los sistemas inerciales frente a todos los demás sistemas de coordenadas, preferencia que parece estar sólidamente establecida sobre experiencias basadas en el principio de inercia? La vulnerabilidad del principio de inercia está en el hecho de que requiere un razonamiento que es un círculo vicioso: Una masa se mueve sin aceleraciones si está lo suficientemente alejada de otros cuerpos; pero sólo sabemos que está suficientemente alejada de otros cuerpos cuando se mueve sin aceleración"*  
Albert Einstein (Premio Nobel de física 1921)

---

### Resumen

Se compara el comportamiento, bajo las mismas condiciones de aceleración, de un globo sujeto mediante una cuerda al piso de un sistema no-inercial, con el de una plomada colgando del techo. La antagonista conducta

Recibido: 23-01-2008 ~ Aceptado: 27-06-2008

de ambos cuerpos representa un conflicto cognitivo que motoriza una rigurosa revisión del principio de Arquímedes, destacando la importancia que tiene el campo gravitatorio en el proceso de flotación. Se analiza el principio de Arquímedes en sistemas acelerados considerando el principio de equivalencia, que explica el comportamiento inesperado que presenta el globo, resaltando la importancia del principio de equivalencia al analizar los fenómenos físicos en sistemas acelerados.

**Palabras clave:** Conflicto cognitivo, sistemas no inerciales, fuerza ficticia, principio de Arquímedes, principio de equivalencia.

## Archimedes' principle in accelerated systems and their relationship to the principle of equivalence: A cognitive conflict

---

### Abstract

The behavior of a balloon tied to the ground with a rope in a non-inertial system is compared, under the same acceleration conditions, with the behavior of a weight hung from the ceiling. The opposing conduct of both bodies represents a cognitive conflict that motivates a rigorous revision of Archimedes' principle, highlighting the importance of the gravitational field in the flotation process. Archimedes' principle in accelerated systems is analyzed considering the equivalence principle, which explains the unexpected behavior displayed by the balloon, highlighting the importance of the equivalence principle for analyzing physical phenomena in accelerated systems.

**Key words:** Cognitive conflict, non-inertial systems, fictitious force, Archimedes' principle, principle of equivalence.

### 1. Introducción

Los modelos de enseñanza de hoy en día, hacen énfasis en tratar de lograr en los estudiantes aprendizajes significativos, de tal manera que sean capaces de apropiarse de los nuevos conocimientos, para ello se hace necesario que el estudiante logre establecer conexiones entre la

información que va recibiendo y lo que ya sabía como producto de sus experiencias y aprendizajes previos, para lograr no solo la comprensión de la información recibida, sino la *significatividad* del aprendizaje (Moreira, 1993; Pozo, 1996). Ello, teniendo en cuenta que alcanzar aprendizajes significativos supone haberse producido, ante la nueva

información y en la mente de quien aprende, una revisión, modificación y enriquecimiento de sus estructuras de pensamiento, de modo que se establezcan nuevas conexiones y relaciones que aseguran la memorización comprensiva de lo aprendido (Bretel, 2005; Ausubel, 1973a; 1976b; Moreira, 2000; Ausubel, 2002c). Sin embargo, en algunos casos, es conveniente tener cuidado con esas memorizaciones y se requiere crear conflictos cognitivos mostrando situaciones que sean opuestas a su sentido común (Ausubel y cols., 1989d; Novak y Gowin, 1988; Coll, 1990; Edwards y Mercer, 1988; Ontoria, 1995).

Si el ser humano en general, y los estudiantes en particular, no llegan a encontrarse en una situación de desequilibrio y sus esquemas de pensamiento no entran en contradicción, difícilmente se lanzarán a buscar respuestas; se plantearán interrogantes; investigarán, descubrirán, es decir, aprenderán. De esta manera el conflicto cognitivo no sólo se convierte en ese motor afectivo indispensable para alcanzar aprendizajes significativos; sino en la garantía de que efectivamente las estructuras de pensamiento se verán modificadas, porque ya no pueden seguir siendo las mismas.

Según Piaget, los aprendizajes más significativos, relevantes y duraderos se producen como consecuencia de un conflicto cognitivo. Provocar exitosamente el conflicto

cognitivo en los estudiantes, los impulsa a la búsqueda del equilibrio perdido llevándolos a investigar y producir respuestas y conocimientos, y no a seguir mecánicamente las respuestas propuestas por otros (Piaget, 1999). No es posible pensar en aprendizajes significativos que no supongan la reorganización, reestructuración, acomodación o *reequilibrio* de los esquemas de pensamiento. Dichos esquemas, no sólo son las lentes desde las cuales todo ser humano mira, entiende y juzga el mundo, sino que también son los organizadores que dan sentido a lo que él mismo es, y a aquello en medio de lo cual vive. Son, finalmente, los filtros racionales que le hacen aceptar o rechazar lo que recibe. Evidentemente no es posible pensar en verdaderos aprendizajes, si éstos no permiten y dan como resultado hacer todo esto de manera diferente (Piaget, 1999).

La enseñanza de la Física, es tal vez uno de los campos más adecuado para aplicar esta estrategia. En particular, el análisis del movimiento en sistemas no inerciales, bajo la concepción newtoniana, brinda un escenario lleno de aparentes inconsistencias que parecen poner en conflicto la validez de las leyes, lo cual sugiere una revisión crítica de sus formulaciones.

El propósito de este trabajo, es el de hacer una revisión minuciosa de algunos conceptos de la mecánica, tales como fuerza y gravedad, así

como el análisis del empuje (Principio de Arquímedes) y su relación con la gravedad, tanto en sistemas de referencia inerciales como en sistemas acelerados.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Fuerzas

Tal vez, la noción más elemental de fuerza está asociada con la práctica de empujar o arrastrar un objeto, sin embargo, el concepto involucra también la acción a distancia, como son los casos de la gravitación y los fenómenos electromagnéticos. Esto último pareciera darle a las fuerzas un carácter múltiple, en cuanto a su naturaleza, lo que sugiere una descripción más exacta. El término fuerza, en mecánica, agrupa, bajo un único concepto, todas las interacciones, independiente de su naturaleza. Conviene aclarar que sólo existen cuatro tipos de interacciones: gravitacionales, electromagnéticas y las llamadas fuertes y débiles, estas últimas a nivel sub-atómico. Cualquier otra manifestación es el resultado de una combinación de ellas (Serway, 2000; Moore, 2005).

En términos de las interacciones, las fuerzas solo pueden ser clasificadas como:

- De repulsión, cuando la acción de la interacción es la tendencia a separar los cuerpos que interactúan.
- De atracción, si la propensión es la de mantener los cuerpos ligados.

Esta clasificación se visualiza muy bien en la acción a distancia, pero cuando se analiza el contacto directo pareciera no cumplirse, como en el caso de las fuerzas de roce, que como se sabe son fuerzas tangentes entre los cuerpos en contacto. Sin embargo esta aparente contradicción puede fácilmente ser superada al analizar dicha fuerza desde su origen microscópico, describiéndola como el resultado de muchas interacciones, las cuales a este nivel obedecen a la clasificación anterior (Aguirre, 2007).

Una de las manifestaciones más sorprendentes de la naturaleza, es que un cuerpo puede estar interactuando simultáneamente, y de manera independiente, con otros cuerpos y siempre puede aceptar una interacción más. En términos de fuerzas podemos decir que un cuerpo está sometido, simultáneamente, a la acción de repulsión y atracción provocada por los cuerpos en su entorno, sin que la resultante llegue a saturarse. Si se asocia a cada fuerza la dirección en la cual se produce la repulsión o atracción, se estará justificando su carácter vectorial.

Finalmente conviene observar que, bajo el contexto de la mecánica, la operación con diferentes fuerzas, actuando sobre un cuerpo, involucra interacciones de naturaleza variada. De esta forma se puede ver que las fuerzas no tienen existencia propia, ya que representan la interacción y ésta es la responsable de

los cambios en el estado de movimiento. Así, al hablar de una fuerza, se hace una referencia, de manera simplificada, a una interacción (independientemente de su naturaleza), siendo esta última, la actuación mutua que ocurre entre dos cuerpos. Como puede verse, las fuerzas no son entes físicos de presencia aislada y, como se indicó anteriormente, corresponden a la representación de las interacciones.

## 2.2. Fuerzas ficticias

Son muchas las ocasiones en las cuales se experimentan efectos que pueden ser equivocadamente atribuidos a una fuerza, por ejemplo, la sensación que se siente al estar dentro de un auto que arranca o frena (Figura 1).

En el primero de los casos, se siente como si la persona fuera sujeta contra el asiento, mientras que en el segundo, se siente que es expelido de él. En el sistema de referencia ligado al auto, se puede interpretar esto como fuerzas que empujan hacia el asiento o fuera de él, sin em-

bargo, no se identifica el cuerpo que ejerce dichas fuerzas sobre la persona. Este hecho, impide interpretar el efecto como el producto de una fuerza, ya que es imposible identificar la interacción que se estaría representando (Aguirre, 2007).

Tal vez el caso más emblemático, de este tipo de efectos, es el de la llamada fuerza centrífuga. Al igual que en los casos anteriores, este efecto es detectado sólo en el sistema no inercial, ligado a la partícula, como una fuerza que tiende a alejar el objeto del centro del movimiento y como antes, no existe un cuerpo ejerciendo esta acción. Nuevamente se presenta un efecto que no puede ser asociado a una interacción y por lo tanto, no puede ser identificado como el resultado de una fuerza. Desde un sistema ligado a tierra (sistema inercial), ambas situaciones pueden explicarse como una manifestación del principio de inercia, esto es: la tendencia del cuerpo a mantener el estado de movimiento si no existen fuerzas actuando sobre él.



Figura 1. La sensación que se siente al estar dentro de un auto que arranca o frena se debe a las fuerzas inerciales dentro del sistema (no inercial) del auto.

Desde el punto de vista operacional, en los sistemas no inerciales, se introducen las llamadas fuerzas ficticias, pseudo-fuerzas o fuerzas inerciales, como términos auxiliares, que dan cuenta de dicho efecto en las ecuaciones de movimiento. Así la segunda ley de Newton, en un sistema no inercial, debe tomar la forma

$$\vec{F}_{\text{real}} + \vec{F}_{\text{ficticias}} = m\vec{a} \quad (1)$$

donde  $\vec{F}_{\text{real}}$  representa el efecto de las interacciones, mientras que  $\vec{F}_{\text{ficticias}}$  es la contribución de la "no inercialidad" del sistema (Aguirre, 2007).

### 2.3. Principio de Equivalencia

Aún cuando el concepto de fuerza ficticia brinda un buen procedimiento para analizar el movimiento desde los sistemas no inerciales, mantiene la presunción de la existencia de los marcos de referencia privilegiados: sistemas inerciales. Sin embargo, la búsqueda de ese sistema inercial puro, parece ser una

tarea tan difícil como la de aislar un cuerpo del resto del universo. Una visión diferente en el tratamiento de los sistemas acelerados puede lograrse al notar que la repercusión de la *no inercialidad* del sistema, corresponde a un efecto global, sentido de igual forma por todos los cuerpos allí presente, independientemente de su masa. Entonces, la descripción es exactamente la misma que se haría en un sistema inercial en presencia de un campo gravitatorio (Coles, 2004). El principio de equivalencia afirma que es indistinguible un sistema inercial, en presencia de un campo gravitatorio, de un sistema de referencia acelerado.

Para ilustrar esto se puede recurrir a un experimento pensado. Suponga, que un experimentador se encuentra dentro de un recinto cerrado sobre la superficie de la tierra. En buena aproximación este constituye un sistema inercial, Figura (2-a). Para determinar la aceleración de gravedad, deja caer piedras desde una cierta altura, encontrando que el valor es  $10 \text{ m/s}^2$ .

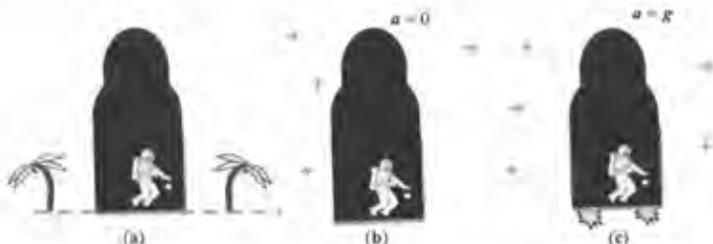


Figura 2. (a) Un experimentador dentro de un recinto cerrado sobre la superficie de la tierra; (b) el experimentador es puesto en un lugar del espacio donde no existe gravedad; (c) el recinto es impulsado mediante un algún dispositivo que le imprime una aceleración de  $10 \text{ m/s}^2$ .

Ahora, suponga que este mismo experimentador, dentro del mismo recinto, es puesto en un lugar del espacio donde no existe gravedad (2-b). Evidentemente no detectará ningún campo ya que las piedras no caerán. Por último imagine que el recinto, es impulsado mediante algún dispositivo, que le imprime una aceleración de  $10 \text{ m/s}^2$ , en dirección contraria hacia donde él intenta soltar las piedras, como se muestra en (2-c). Entonces, al soltar las piedras, éstas ya no acelerarán con el sistema, en consecuencia el piso se moverá hacia ellas con la aceleración antes descrita. Para el investigador, son las piedras las que se mueven hacia el piso con la misma aceleración. Entonces dentro de la cabina, la situación es idéntica a aquella que experimenta cuando está sobre la superficie de la tierra. No hay forma de distinguir entre la primera y la tercera situación. Suponga nuevamente, al investigador dentro de la cabina, pero ahora es elevado por una grúa a una gran altura y, acto seguido, se deja caer libremente (Figura 3).

Mientras está cayendo trata de medir la gravedad soltando piedras, como antes, pero encuentra que, desde su sistema de referencia, las piedras no caen (éstas caen junto con él). Por otro lado, siente que puede "flotar" dentro de la cabina, lo que es equivalente a no experimentar peso. De esta forma, el investigador describe el espacio libre de campo gravitatorio, que es precisamente lo que se aprecia en la situación planteada en el caso (2-b).

Así se tiene que:

1. El espacio descrito en la situación de Figura 2-a, donde el sistema propio es inercial, es **equivalente** a la situación que se experimenta en el caso de la Figura 2-c, donde el sistema no es inercial.
2. El espacio descrito dentro de la cabina en la situación de la figura 3, y que corresponde a un sistema no inercial, es **equivalente** al espacio descrito en la Figura 2-b, en el que el sistema propio es inercial.

Entonces, el efecto que introduce un sistema acelerado, puede interpretarse como la presencia de un

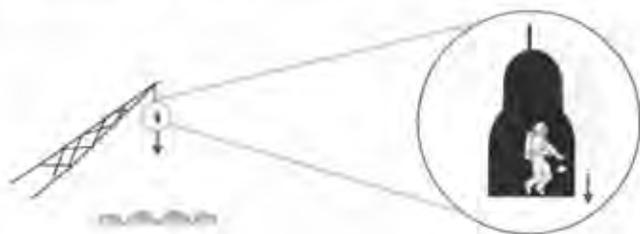


Figura 3: Para el sistema ligado a la cabina, el espacio puede describirse libre de gravedad.

campo gravitatorio en un sistema inercial. Bajo esta concepción se puede afirmar que todos los sistemas son equivalentes, es decir:

*Un sistema acelerado, se comporta exactamente igual a un sistema inercial en presencia de campo gravitacional.*

Fácilmente se pueden apreciar las consecuencias del principio de equivalencia al experimentar con una plomada colgada del techo de una cabina (un auto, un elevador, el camarote de un tren, etc.). Si dicha cabina acelera horizontalmente cerca de la superficie de la Tierra, un observador dentro de ésta, verá que la plomada se desvía de su dirección original. En lo que a este observador concierne, se encuentra en un lugar donde existe un campo gravitacional  $\vec{g}'$ , cuya dirección no es perpendicular al piso de la cabina, como lo era cuando se encontraba en reposo o se movía con velocidad constante. La relación con el campo medido por un observador fijo en Tierra es

$$\vec{g}' = -\vec{a} + \vec{g} \quad (2)$$

donde  $\vec{a}$  es la aceleración del sistema respecto al observador fijo en Tierra y  $\vec{g}$  el campo gravitatorio que mide éste. Así, en el sistema acelerado, se describe la plomada sometida a una fuerza gravitatoria (peso) cuyo valor es

$$P = mg' = m\sqrt{a^2 + g^2}, \quad (3)$$

Por otro lado, la dirección vertical, la cual debe estar asociada al

peso en ambos sistemas, se presenta con una rotación (una respecto a la otra) de un ángulo  $\theta$ , de valor

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{g}\right). \quad (4)$$

Nótese en (4) que, para  $a \rightarrow \infty$  el sistema acelerado se encuentra rotado  $90^\circ$  con relación al sistema fijo. En general, la ecuación (2) puede considerarse como la relación de transformación del campo gravitatorio entre sistemas acelerados. Así, por ejemplo, si  $\vec{a} = \vec{g}$ , entonces  $\vec{g}' = 0$ , en otras palabras, en el sistema acelerado se experimenta una situación de ingravidez, igual a aquella que se sentiría en un lugar del espacio donde no exista campo gravitatorio. Por otro lado, si  $\vec{a} = -\vec{g}$ , se sentirá, en el sistema no inercial, un campo gravitatorio de doble intensidad con respecto al campo terrestre. El observador, en el sistema acelerado, podrá verificar esto midiendo, por ejemplo, la frecuencia de oscilación, encontrará que esta última estará aumentada (en un factor  $\sqrt{2}$ ), en relación a aquella que se registra cuando la plomada está ligada al sistema fijo en Tierra.

El principio de equivalencia constituye uno de los pilares fundamentales de la física moderna y su atractivo radica en el hecho de que la descripción de la física no envuelve el estado de movimiento del observador, por el contrario, sólo se precisan de las variables locales inherentes al sistema. La equivalen-

cia entre los efectos inerciales y los gravitatorios establecen la igualdad entre las masas asociadas (inercial y gravitatoria) esto último ha sido comprobado, en diferentes experimentos, hasta con una precisión de  $10^{-12}$ . Actualmente existen, en procesos de preparación, varios experimentos que intentan detectar alguna diferencia, entre ambas masas, hasta con una precisión entre  $10^{-15}$  y  $10^{-18}$  (STEP, CG, MICROSCOPE) (Barry, 2008). Independientemente del éxito o no de estos experimentos, en la actualidad, el principio de equivalencia es una de las ideas más importante, concebida por Albert Einstein, que juega un papel determinante la física moderna.

#### 2.4. Conflicto en el sentido común

Ahora supóngase que en lugar de la plomada se usa un globo flotante, el cual está sujeto al piso mediante una cuerda. Al igual que la plomada, mientras la cabina no acelere horizontalmente, el globo se mantendrá vertical.

¿Qué pasa si acelera, por ejemplo, hacia la derecha?

Un razonamiento ligero, conduce a afirmar que el globo se desplazará hacia la izquierda, tal como lo hace la plomada. Sin embargo, el experimento muestra una situación totalmente opuesta, esto es, el globo se desplaza en la dirección de la aceleración. Se consigue aquí un verdadero conflicto entre aquello que pareciese lógico y el resultado natural (Figura 4).

Esta situación obliga a revisar la naturaleza de los procesos que intervienen en ambos sucesos a fin de encontrar una respuesta que resuelva esta incongruencia. El primer paso es identificar la diferencia entre la sustentación de ambos cuerpos (plomada y globo). Un análisis sencillo indica que la fuerza por la cual se mantiene la plomada colgando es de naturaleza diferente a aquella que hace que el globo flote. En el primer caso se refiere a la fuerza de gravedad, mientras que para el segundo es la fuerza de flotación, debida al empuje, la que actúa sobre el globo. Esta última, a diferencia de la gravedad, se presenta

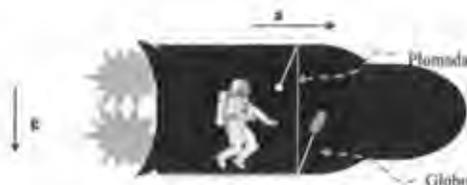


Figura 4. Un investigador dentro de una cabina cerrada colmada de aire moviéndose hacia la derecha con aceleración  $a$  bajo la acción del campo gravitacional terrestre, que tiene en su interior además de un globo inflado con Helio amarrado al "suelo", una plomada suspendida del "techo" de la cabina.

sólo cuando un cuerpo está sumergido en un fluido y es derivada del principio de Arquímedes. El siguiente paso consiste en revisar dicho principio y generalizarlo a sistemas no inerciales. En un trabajo previo (Carrillo, Daza, Múnera y Fajardo, 2001) se analiza esta misma situación usando el concepto de fuerzas ficticias, el objetivo de este trabajo es vincular la física presente en este escenario con el principio de equivalencia.

### 2.5. Principio de Arquímedes en sistemas no inerciales

El principio de Arquímedes sostiene que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje, vertical y hacia arriba, igual al peso de fluido desalojado por el cuerpo. Entonces, al describir las fuerzas que soporta un cuerpo de densidad  $\rho_f$ , totalmente sumergido en un fluido cuya densidad es  $\rho_c$ , se encuentra que

$$ma = m_f g - mg \quad (5)$$

de esta expresión se obtiene fácilmente

$$a = \frac{(\rho_f - \rho_c)}{\rho_c} g \quad (6)$$

De (6) se puede observar que es la diferencia de densidades, entre el objeto y el fluido, lo que determina el sentido en la cual debe moverse el objeto (si flota o se sumerge). Así se encuentra, para las diferentes condiciones que:

1. si  $\rho_f > \rho_c$  la aceleración es positiva, en sentido opuesto a  $g$ , por lo que el objeto flotará;
2. si  $\rho_f < \rho_c$  la aceleración es negativa, en el mismo sentido de  $g$ , y el objeto se hundirá, y
3. si  $\rho_f = \rho_c$  la aceleración es nula y por lo tanto podrá estar estático dentro del fluido.

Este análisis se hace bajo la suposición que el experimento se lleva a cabo sobre la superficie de la Tierra. Supóngase que el experimento se hace en la superficie de Júpiter, donde la gravedad es mucho mayor y cumpliéndose la condición 1: el objeto flota.

¿Es el ascenso del objeto, en esta situación, más lento que cuando se hace el experimento sobre la superficie de la Tierra?

Un análisis ligero nuevamente puede llevar a una conclusión errada, ya que al considerar la atracción gravitatoria, sobre el cuerpo, se puede afirmar que éste experimentará mayor peso y que "lógicamente" deberá ascender más lento. Sin embargo, la ecuación (6) indica que la aceleración es directamente proporcional al valor de la gravedad y por lo tanto el ascenso será más rápido. Por el contrario, si se experimenta sobre la superficie de La Luna, donde la aceleración de la gravedad es menor que la de la Tierra, la subida tendría que ser más lenta.

Las situaciones planteadas anteriormente, parecieran nuevamente poner el sentido común en conflicto, sin embargo, esto puede ser rápi-

damente superado al aceptar que la gravedad no sólo afecta el peso del objeto flotante, sino que también modifica la acción del empuje que experimenta el cuerpo. Esto último es debido a que dicho empuje es consecuencia de la diferencia de presión, en la dirección vertical, en los extremos del cuerpo y la presión, en este caso, está asociada al campo gravitatorio. En otras palabras, la fuerza flotante puede interpretarse como una acción indirecta de la gravedad, y en sentido opuesto a ésta, a través del fluido. Como se ve, la orientación de la gravedad define la dirección del empuje. Ahora se tienen todos los elementos que intervienen en el proceso de flotación de un cuerpo. Por un lado se tiene que son las densidades (o su diferencia) las que determinan si un cuerpo flotará o no, por el otro, se obtiene que es la gravedad la que define la orientación y la intensidad de la fuerza de flotación. Esto último le da a la gravedad un carácter protagónico de gran importancia en el proceso de flotación del cuerpo.

Se puede generalizar el principio de Arquímedes, a cualquier situación, admitiendo que el empuje se presenta en la dirección del campo gravitatorio y en sentido opuesto a éste. Esta afirmación permitirá entonces extender dicho principio a sistemas acelerados (no inerciales). El principio de equivalencia brinda una forma adecuada para el tratamiento de los fenómenos físicos en los sistemas acelera-

dos, interpretando el efecto de la "no inercialidad" en dichos sistemas como un campo gravitatorio. Un observador no inercial encuentra que, de acuerdo a (6), la fuerza de flotación, que experimenta un cuerpo que se encuentra completamente sumergido en un fluido, es

$$F_{flotacion} = m \frac{\rho_f - \rho_c}{\rho_c} \bar{g}' = m \frac{(\rho_f - \rho_c)}{\rho_c} |\bar{g} - \bar{a}| \quad (7)$$

donde  $\bar{g}'$  representa la gravedad registrada en el sistema acelerado, mientras que  $\bar{g}$  y  $\bar{a}$  corresponden al campo gravitatorio y la aceleración del sistema, medidos por un observador inercial, respectivamente. Dicha fuerza debe estar orientada en la dirección de  $\bar{g}'$  y en sentido opuesto a ésta. Una situación particular es aquella en la cual el sistema se desplaza perpendicular al campo gravitatorio  $\bar{g}$ , como en el ejemplo de la cabina en movimiento planteado anteriormente en el apartado 2.4, y que se esquematiza en la Figura 3.

En estas circunstancias se tiene que

$$F_{flotacion} = m \frac{(\rho_f - \rho_c)}{\rho_c} \sqrt{g^2 + a^2} \quad (8)$$

formando un ángulo  $\theta$  con la vertical, dado por

$$\theta = \arctan\left(\frac{a}{g}\right), \quad (9)$$

La situación planteada en la pregunta original, corresponde

exactamente a estas condiciones. El globo flota, porque la densidad del gas contenido en su interior es menor que la del medio (aire). De esta manera, si el sistema (la cabina), acelera hacia la derecha, un observador ligado a éste, registra un campo gravitatorio en dirección oblicua. Para dicho observador, sobre el globo debe actuar un empuje en la misma dirección del campo gravitatorio local y en sentido opuesto a éste, que lo obliga a desplazarse hacia la derecha lo cual explica el inesperado comportamiento que tiene el globo.

Algunos casos especiales pueden ser comentados:

1. El sistema se mueve en ausencia de campo gravitatorio, acelerando horizontalmente. En este caso la fuerza de flotación toma la forma

$$F_{\text{flotacion}} = m \frac{(\rho_f - \rho_f)}{\rho_f} a \quad (10)$$

en dirección horizontal y el sentido estará sujeto a la condición especificada por la relación de las densidades. La ecuación (10) es completamente equivalente a la ecuación (6), la cual se dedujo del principio de Arquímedes, cuando se considera que la experiencia se realiza en la superficie de La Tierra, en este caso la aceleración  $\vec{a}$  juega el papel de aceleración de gravedad, lo cual está en completo acuerdo con el principio de equivalencia. Nótese que para un observador ligado a este

sistema su percepción de lo que es "arriba" o "abajo" estará determinado por la dirección de la aceleración.

2. La aceleración del sistema es cero, en este caso se está en un sistema inercial y por lo tanto se tendrá una aplicación usual del principio de Arquímedes.
3. El sistema es inercial y en ausencia de campo gravitatorio. En esta situación, el cuerpo se mantendrá estático dentro del fluido, en cualquier posición (ni flota ni se hunde). Fácilmente explicable, ya que la presión debe ser homogénea en todo el fluido.
4. El sistema cae libremente, como puede verse de la ecuación (7), el objeto dentro del fluido debe mantenerse estático, siendo esta situación equivalente a la planteada anteriormente en el caso 3, correspondiendo a un sistema donde localmente ha sido anulada la gravedad, por lo tanto el cuerpo experimentará una presión uniforme.

### 3. Conclusiones

Dos tipos de conclusiones se pueden obtener de lo antes expuesto:

1. El antagonismo entre la lógica que dicta nuestro sentido común y los resultados experimentales, en una determinada situación, pueden ser usados como el estímulo principal para comenzar una revisión e investigación, de los elementos que

componen el esquema cognitivo en una determinada área del conocimiento. En la física, son muchas las situaciones que frecuentemente ponen en conflicto la intuición ante los resultados experimentales. Con la finalidad de dar respuesta a estos conflictos, dichas situaciones pueden ser usadas estratégicamente para emprender un proceso de revisión de los conceptos vinculados a las áreas relacionadas a la situación planteada.

2. Por otro lado, el desarrollo anterior enfatiza la importancia que reviste el principio de equivalencia, en el tratamiento de los fenómenos físicos en sistemas no inerciales. Poniendo en evidencia que dicho principio no es de aplicación exclusiva en la Relatividad, por el contrario, puede ser extensamente usado en distintas ramas de la física, para generalizar, de manera natural, situaciones donde el campo gravitatorio juegue un papel determinante, a sistemas no inerciales.

### Referencias Bibliográficas

- AGUIRRE, F. (2007). *Leyes de Newton y Sistemas de Referencias*. Manuscrito no publicado, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes. Mérida.
- AUSUBEL, D.P. (1973). *Algunos aspectos psicológicos de la estructura del conocimiento*. Buenos Aires, Argentina.
- AUSUBEL, D.P. (1976). *Psicología Educativa, Un Punto de Vista Cognoscitivo*, México: Ed. Trillas.
- AUSUBEL, D.P., Novak, J.D. y Hanesian, H. (1989). *Psicología educativa*. México: Trillas.
- AUSUBEL, D.P. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento. Una perspectiva cognitiva*. Barcelona: Paidós.
- BARRY, P. (2008). *El Principio de Equivalencia*, Recuperado el 18 de mayo de 2008, del sitio Web: [http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2007/18may\\_equivalence-principle.htm](http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2007/18may_equivalence-principle.htm)
- BRETEL, L. (2005). *Los Procesos de Aprendizaje*. Recuperado el 14 de mayo de 2008, del sitio Web <http://breteleandoaprendizajes.blogspot.com/>
- CARRILLO, C., DAZA, C., MÜNERA, H. y FAJARDO, F. (2001). *Sistemas no inerciales y fuerza de flotación*. *Revista Colombiana de Física*, 33, (2), 268.
- COLES, P. (2004). *Einstein y el nacimiento de la gran ciencia*. Barcelona: Ed. Gedisa.
- COLL, C. (1990). *Un marco de referencia psicológico para la educación escolar: la concepción constructivista del aprendizaje y de la enseñanza*.
- EDWARDS, D. y MERCER, N. (1988). *El conocimiento compartido. El desarrollo de la comprensión en el aula*. Barcelona: Paidós/MEC.
- MOORE, T. (2005). *Física Seis ideas fundamentales*. Tomo I. (2). México: McGraw-Hill.

- MOREIRA, M. (1993). **La teoría del aprendizaje significativo de David Ausubel**. Versión preliminar publicada en Fascículos del CIEF, Serie Enseñanza-Aprendizaje.
- MOREIRA, M. (2000). **Aprendizaje Significativo: teoría y práctica**. Madrid: Visor.
- NOVAK, J. y GOWIN, D. (1988). **Aprendiendo a aprender**. Barcelona: Martínez Roca.
- ONTORIA, A. y cols. (1995). **Mapas conceptuales. Una técnica para aprender**. Madrid, España: Narcea.
- PIAGET, J. (1999). **Psicología de la Inteligencia**. Madrid, España: Psique.
- POZO, J. (1996). **Teorías cognitivas del aprendizaje**. Madrid, España: Morata.
- SERWAY, R. y BEICHNER, R. (2000). **Física para ciencias e ingeniería**. Tomo I. (5) México: Mc Graw-Hill / Interamericana de México.