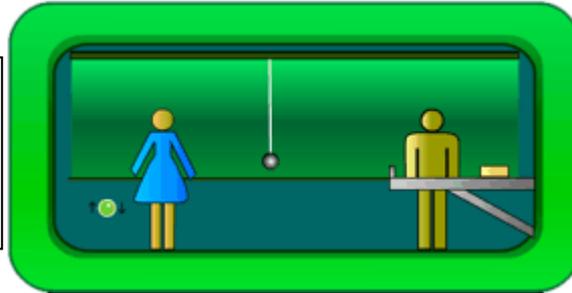


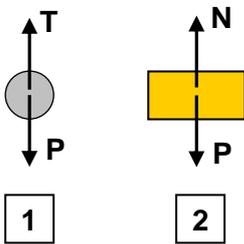
## SISTEMAS NO INERCIALES

IES La Magdalena.  
Avilés. Asturias

**Sistema en reposo** (vagón). En su interior están situados un péndulo y un bloque de madera apoyado sobre una mesa.

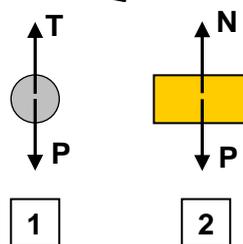


¿Cómo describen lo que sucede alguien situado en el interior del vagón y un observador en reposo situado fuera?



### Ecuaciones

- Péndulo  
 $T - P = 0$
- Bloque  
 $N - P = 0$



### Ecuaciones

- Péndulo  
 $T - P = 0$
- Bloque  
 $N - P = 0$

### Observador situado en el interior del vagón

Diagrama de fuerzas para los objetos.

- Péndulo en posición de reposo.
- Cuerpo situado sobre la mesa.

### Observador situado en el exterior del vagón

Diagrama de fuerzas para los objetos.

- Péndulo en posición de reposo.
- Cuerpo situado sobre la mesa.

Ambas descripciones son exactamente iguales.

### El vagón moviéndose con m.r.u.



La descripción para un observador situado en el interior del vagón es exactamente igual a la hecha cuando el vagón está parado, ya que desde el interior del vagón los objetos permanecen en reposo (no cambian de posición respecto de una referencia interna).

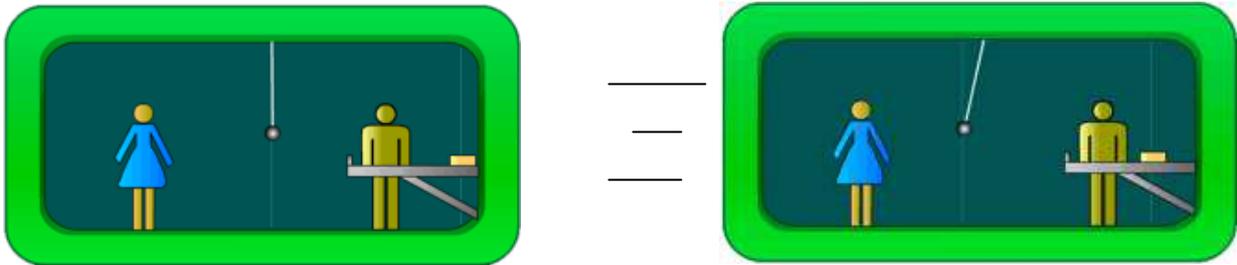
Un observador situado en el exterior detecta el movimiento, ya que tanto el vagón como los objetos cambian de posición respecto de un sistema de referencia situado en el exterior y considerado fijo (línea vertical). Como el sistema se mueve con  $v = \text{cte}$  ( $a = 0$ ) las ecuaciones tampoco variarán respecto de las propuestas cuando el vagón no se movía.

**Observar que mientras el sistema se mueva con movimiento rectilíneo y uniforme los observadores situados en el interior del vagón no pueden detectar el movimiento** (a no ser que puedan observar un sistema de referencia fijo situado en el exterior). Las cosas suceden exactamente de la misma manera cuando  $v = 0$  o cuando  $v = \text{cte}$ .

**El Principio de Relatividad** (ya enunciado por Galileo) establece la imposibilidad de distinguir entre un observador en reposo y otro que se mueva con movimiento rectilíneo y uniforme. Ambos sistemas son físicamente equivalentes y las leyes de la Física adquieren formas idénticas en ambos. Se les conoce con el nombre de **sistemas inerciales**.

El vagón acelera hacia la derecha

$a$  →



Si el vagón está parado y comienza a aumentar su velocidad acelerando hacia la derecha la descripción que da un observador exterior y uno interior empiezan a ser muy distintas.

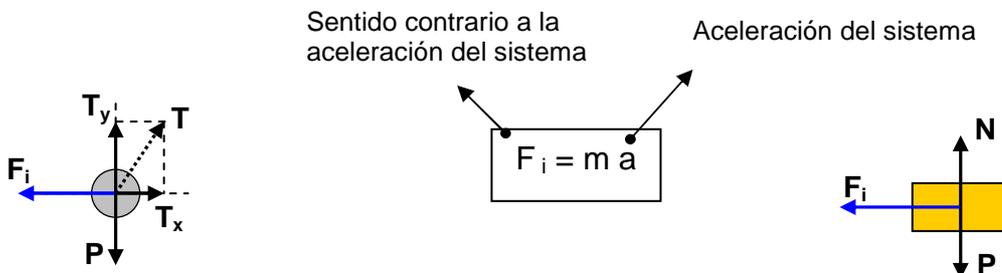
El observador externo observa que tanto el péndulo como el bloque (suponemos que no existe rozamiento con la mesa) al no estar sometidos a ninguna fuerza tratan de permanecer en reposo (Ley de Inercia) y, en consecuencia, van “retrasándose” respecto del vagón. El movimiento del vagón (con una aceleración  $a$  hacia la derecha) hace que los cuerpos se muevan (respecto de él) con una aceleración  $-a$  hacia la izquierda.

Los observadores situados en el interior del vagón ignoran que éste está acelerando (no tienen referencia exterior para saberlo). Observan, sin embargo, como los cuerpos situados en su interior aceleran hacia la izquierda, pero no son capaces de identificar la acción (fuerza) responsable de la aceleración observada. Deja de cumplirse, por tanto, el Principio Fundamental de la Dinámica:  $F = m a$ , ya que los cuerpos aceleran sin posibilidad de identificar la fuerza responsable de esa aceleración. Con el fin de poder seguir usando las Leyes de Newton es necesario introducir **fuerzas falsas o fuerzas de inercia**.

Con la introducción de las fuerzas de inercia podremos aplicar la Primera y Segunda Leyes de la Dinámica, pero la Tercera Ley no será de aplicación ya que no podemos encontrar la reacción a las fuerzas de inercia introducidas

Las fuerzas de inercia actúan siempre en sentido contrario a la aceleración y su valor es igual al producto de la masa del cuerpo por la aceleración del sistema:  $F_i = m a$ .

Los sistemas que poseen aceleración y en los cuales no se cumplen las Leyes de Newton reciben el nombre de **sistemas no inerciales**



Un observador situado en el interior (observador no inercial) puede explicar el movimiento hacia atrás del péndulo suponiendo que existe una fuerza de inercia,  $F_i$ , capaz de suministrar una fuerza resultante hacia la izquierda responsable de la aceleración observada.

Un observador situado en el interior (observador no inercial) explica el movimiento acelerado hacia la izquierda del bloque suponiendo que existe una fuerza de inercia,  $F_i$ , en ese sentido.

**Ejemplo 1**

Un objeto se encuentra situado en el suelo de la caja de un camión. Determinar el coeficiente estático de rozamiento mínimo para que no deslice si el camión al arrancar lo hace con una aceleración de  $5 \text{ m/s}^2$

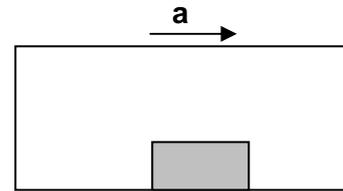
**Solución.**

**Observador situado en el interior  
(Observador no inercial)**

El objeto está situado en el interior de un sistema no inercial (con aceleración). Con el fin de poder aplicar las Leyes de Newton es necesario recurrir a las fuerzas de inercia. Por tanto el diagrama de fuerzas para el bloque sería:

Para que no deslice la fuerza que tira del cuerpo hacia la izquierda ( $F_i$ ) no puede ser mayor que la fuerza de rozamiento estático. Ésta tiene como valor máximo:  $F_s = \mu_s N$ . Por tanto, podemos poner:

$$F_i - F_s = 0; m a - \mu_s N = 0;$$

$$\mu_s = \frac{m a}{m g} = \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,5$$


**Observador situado en el exterior  
(Observador inercial)**

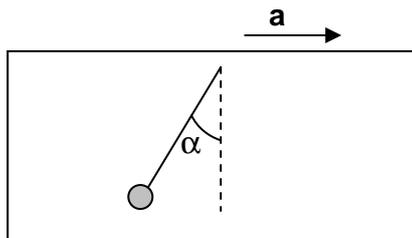
Si adoptamos el punto de vista de un observador en reposo situado fuera, el planteamiento es distinto ya que éste observará que el objeto se desplaza hacia la derecha con una aceleración. Para que efectivamente suceda esto y no deslice hacia atrás la fuerza de rozamiento estático debe ser la responsable de esta aceleración. Deberá cumplirse, por tanto:

$F_s = ma; \mu_s N = ma$

Ecuación idéntica a la obtenida en el caso anterior

**Ejemplo 2**

Un vagón se mueve con una aceleración de  $4 \text{ m/s}^2$ . Calcular el ángulo que formará con la vertical un péndulo situado en su interior.



**Observador situado en el interior  
(Observador no inercial)**

Un observador situado en el interior del vagón observará el péndulo en reposo formando cierto ángulo con la vertical. Para poder explicarse esta situación deberá introducir una fuerza de inercia dirigida hacia la izquierda.

Ecuaciones:

$$T \cos \alpha - m g = 0$$

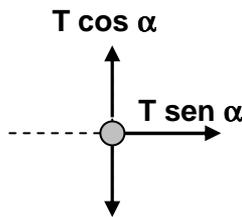
$$T \sin \alpha - F_i = 0$$

Poniendo el valor de la fuerza de inercia, operando y dividiendo ambas, se tiene:

$$\frac{T \sin \alpha}{T \cos \alpha} = \frac{m a}{m g}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{a}{g} = \frac{4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,4; \quad \alpha = 21,8^\circ$$

**Para un observador inercial (situado en el exterior)** las ecuaciones serían distintas. Él no necesita introducir fuerzas falsas ya que ve que el péndulo tiene una aceleración hacia la derecha. Esta aceleración debe ser comunicada por la componente de la tensión según el eje X. Por tanto:



$$T \cos \alpha - m g = 0$$

$$T \sin \alpha = m a$$

El observador inercial es capaz de explicar sin dificultad lo que sucede:

Como consecuencia de la aceleración del sistema hacia la derecha, el péndulo (debido a su inercia) va "retrasándose" respecto del vagón hasta que la componente horizontal de la tensión es capaz de proporcionarle una aceleración igual a la del vagón. Entonces comienza a moverse con su misma aceleración

### Ejemplo 3

La mujer de la figura tiene una masa de 58 kg, se encuentra en el interior de un ascensor y tiene bajo sus pies una balanza. Estudiar cuánto marca la balanza cuando el ascensor:

- a) Acelere hacia arriba.
- b) Acelere hacia abajo

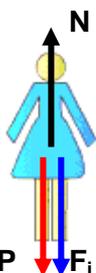
#### Solución

a) Supongamos que el ascensor sube con una aceleración **a**



**Observador situado en el interior  
(Observador no inercial)**

La persona se encuentra en reposo en el interior de un sistema no inercial. Por tanto, el diagrama de fuerzas sería:



**Donde N es la fuerza que ejerce la balanza sobre la mujer.** Esta fuerza será la reacción a la fuerza ejercida por la mujer sobre la balanza (por tanto ambas serán iguales en módulo)

**Por tanto N nos da indicación de la balanza.**

Hay que tener en cuenta que la balanza, aunque mide la fuerza que se ejerce sobre ella, está graduada en kg (masa y peso son proporcionales). Así cuando ejercemos una fuerza de 580 N el visor nos indicará:  $m = F/g = 58,0 \text{ kg}$

$$N - P - F_i = 0; N = P + F_i$$

$$N = m g + m a = m (g + a)$$

La lectura de la balanza equivale al peso que la mujer tendría sometida a un campo gravitatorio de valor  $g' = g + a$

**Una aceleración, a, constante y hacia arriba, produce el mismo efecto que un aumento del valor del campo gravitatorio.**

Supongamos que  $a = 4 \text{ m/s}^2$ . La indicación de la balanza sería:

$$N = m (g + a) = 58 \text{ kg} (10 + 4) \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 812 \text{ N} \quad \dots \text{fuerza con que sería atraída la masa de 58 kg por un campo gravitatorio de intensidad } 14 \text{ m/s}^2$$

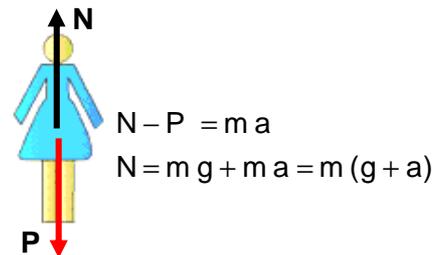
$$\dots \text{equivaldría a una masa de: } m' = \frac{812 \text{ N}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 81,2 \text{ kg} \quad \dots \text{si suponemos que el campo gravitatorio permanece inalterado en } 10 \text{ m/s}^2$$

**Observador situado en el exterior  
(Observador inercial)**

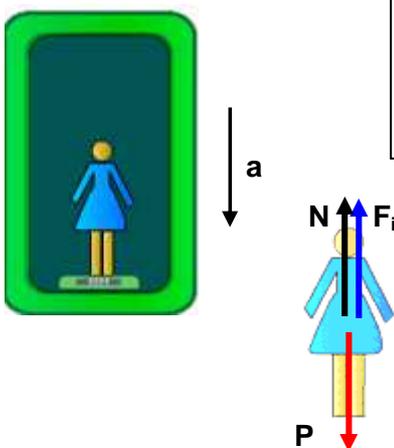
La persona no está en reposo para el observador externo. Se mueve hacia arriba con una aceleración  $a$ . Por tanto el diagrama de fuerzas y las ecuaciones correspondientes serán los que se muestra a la derecha.

El observador inercial explica sin problemas el aparente aumento de peso:

La mujer, debido a su inercia, trata de seguir moviéndose con la misma velocidad. Como el ascensor acelera hacia arriba "se adelanta" respecto de ella, provocando una mayor presión de ésta contra el suelo (balanza)



b) Supongamos que el ascensor baja ahora con una aceleración  $a$



**Observador situado en el interior  
(Observador no inercial)**

La persona se encuentra en reposo en el interior de un sistema no inercial. Por tanto, el diagrama de fuerzas sería:

$$P - F_i - N = 0; N = P - F_i$$

$$N = m g - m a = m (g - a)$$

La lectura de la balanza equivale ahora al peso que la mujer tendría sometida a un campo gravitatorio de valor  $g' = g - a$

**Una aceleración,  $a$ , constante y hacia abajo, produce el mismo efecto que una disminución del valor del campo gravitatorio.**

Sustituyendo valores ( $a = 4 \text{ m/s}^2$ ) se obtiene un valor de  $N = 348 \text{ N}$ . Fuerza con que sería atraída la masa de  $58 \text{ kg}$  en un campo gravitatorio de intensidad  $4 \text{ m/s}^2$ . Esto equivale a una masa de  $34,8 \text{ kg}$  si suponemos que el campo gravitatorio vale  $10 \text{ m/s}^2$

¿... y si el ascensor cae?. En este caso la aceleración del sistema sería la de la gravedad. Esto es  $a = g$ . Por tanto la lectura de la balanza (ver más arriba) sería la correspondiente a un campo gravitatorio de valor:

$$g' = g - a = g - g = 0$$

¡La balanza marcaría  $0 \text{ kg}$  y los ocupantes del ascensor se encontrarían en estado de ingravidez! La aceleración del sistema ha "anulado" la acción del campo gravitatorio. Abusando del lenguaje se dice que estamos en "gravedad cero".

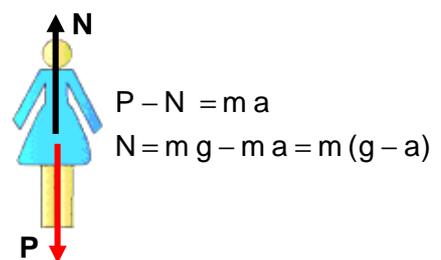
**Tal y como se desprende de todo lo anterior existe una equivalencia entre aceleración y campo gravitatorio** (no en vano las unidades del campo gravitatorio son las de una aceleración).

**Observador situado en el exterior  
(Observador inercial)**

La persona no está en reposo para el observador externo. Se mueve hacia abajo con una aceleración  $a$ . Por tanto el diagrama de fuerzas y las ecuaciones correspondiente serán las que se muestra a la derecha.

La mujer ahora se retrasa (debido a su inercia) respecto del ascensor presionando con menos fuerza sobre la balanza.

Si se produce la caída libre, persona y ascensor caen sometidos a la misma aceleración (caen "a la vez"). En consecuencia, la fuerza ejercida sobre la balanza será nula.



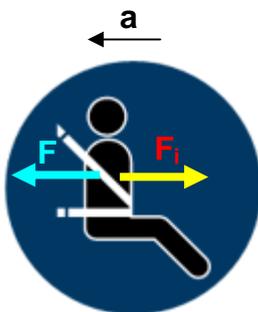
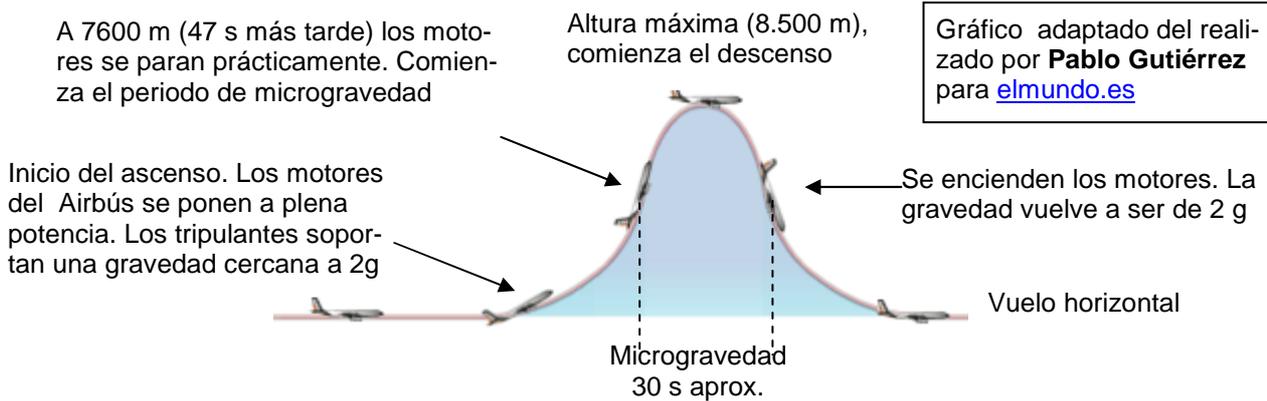
La Agencia Espacial Europea, **ESA** (European Space Agency), organiza en Burdeos los llamados vuelos parabólicos (Zero g) en los que se pueden realizar experimentos en ausencia de gravedad. Para ello se emplea un Airbús adaptado que realiza varias parábolas (31 en cada vuelo) quedando los tripulantes durante 30 s, aproximadamente, en cada parábola, sometidos a una gravedad cero.

El fundamento de estos vuelos es el expuesto más arriba en el caso del ascensor:

- Mientras el Airbús asciende con los motores a toda potencia (aceleración hacia arriba) los tripulantes sufren una aceleración cercana a 2g, ya que la aceleración del avión se suma a la de la gravedad.
- Cuando a mitad de la rama ascendente de la parábola los motores prácticamente se apagan, el avión y sus tripulantes quedan sometidos a "gravedad cero".
- Cuando se vuelven a encender los motores (a la mitad de la rama descendente de la parábola) el avión comienza a frenar su caída (aceleración hacia arriba) para recuperar el vuelo horizontal. El valor de la gravedad vuelve a ascender hasta 2 g.

Para más información (reportaje, gráficos animados y vídeos de uno de los vuelos):

<http://www.elmundo.es/especiales/2005/07/microgravedad/index.html>



Si viajamos en el interior de un automóvil que sufre de repente una brusca deceleración (aceleración hacia la izquierda) la fuerza de inercia,  $F_i$ , hace que salgamos proyectados hacia adelante. El cinturón de seguridad suministra una fuerza  $F$  de sentido contrario que anula a la fuerza de inercia y nos mantiene fijados en nuestro asiento evitando lesiones.

**La “fuerza centrífuga”**

La fuerza centrífuga es una fuerza de inercia que aparece cuando se describen trayectorias curvas. Un sistema que describa una trayectoria curva posee, al menos, aceleración centrípeta. En consecuencia, será un sistema no inercial. Para poder aplicar las Leyes de Newton desde el interior del sistema necesitaremos recurrir a las fuerzas de inercia.

**Observador situado en el exterior  
(Observador inercial)**

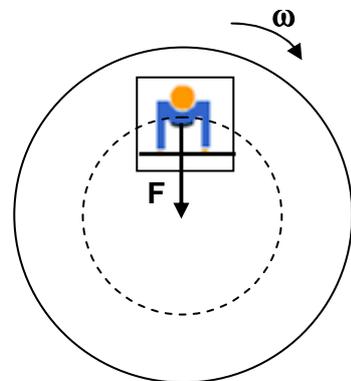
Supongamos una persona situada en el interior de una cabina anclada en una plataforma que gira con velocidad angular constante. Supongamos también, para simplificar, que la fuerza de rozamiento de la persona con el suelo es despreciable.

Para que la persona pueda girar con la plataforma debe existir una fuerza que apunte continuamente hacia el centro de la trayectoria que sea capaz de suministrar la aceleración normal o centrípeta.

En ausencia de rozamiento (o si este es insuficiente) dicha fuerza puede suministrarse agarrándose a algún asidero fijo como se muestra en la figura de la derecha. De esta manera se cumplirá:

$$F_N = F = m a_N = m \omega^2 R$$

Obsérvese que cuanto más rápido gire la plataforma, mayor sea la masa de la persona o más hacia el exterior se coloque (mayor R), mayor será la fuerza requerida para que se cumpla la ecuación (deberá agarrarse con más fuerza)



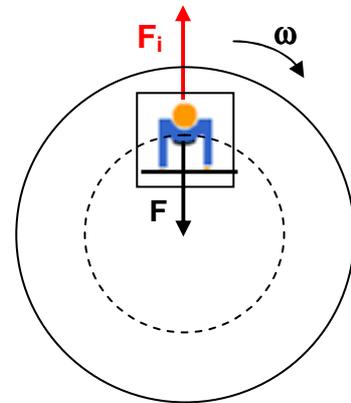
**Observador situado en el interior  
(Observador no inercial)**

Si ahora tratamos de describir lo que sucede desde el interior de la cabina, las cosas parece que suceden de forma muy distinta. La persona “sentirá” una fuerza  $F_i$  (que no puede asociar a ninguna acción, fuerza de inercia) que lo empujará contra la pared posterior. Si quiere permanecer quieto deberá agarrarse para suministrar una fuerza que la contrarreste.

Una vez en equilibrio podremos escribir:

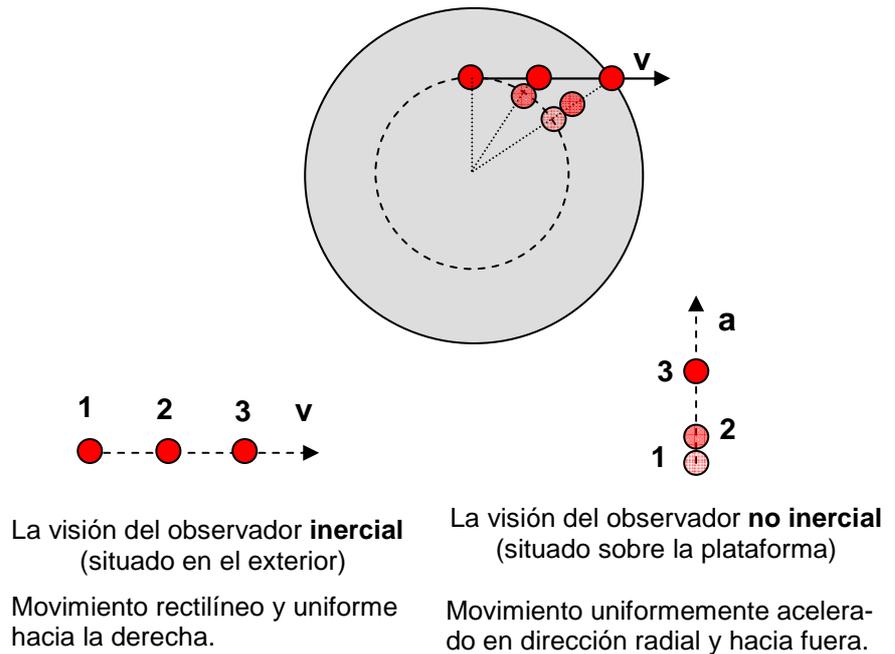
$$F_i - F = 0 ; F = F_i = m a_N = m \omega^2 R$$

Descripción idéntica a la del observador inercial.



La fuerza de inercia hacia afuera que el observador no inercial experimenta (fuerza centrífuga) no existe realmente. La tendencia a salir en dirección radial es debida a la

Si no hay ninguna fuerza que haga variar la dirección de la velocidad el cuerpo se moverá en línea recta.



**Ejemplo 4.**

Calcular la aceleración a la que está sometido el piloto de un F1 cuando da una curva de 100 m de radio con una velocidad de 200 km/h.

**Solución:**

Cuando está describiendo una curva el piloto se encuentra en el interior de un sistema no inercial, ya que el coche está sometido a una aceleración centrípeta. Por lo tanto el piloto “siente” una fuerza de inercia hacia el exterior de la curva de valor:

$$F_i = m a_N = m \omega^2 R$$

Por lo tanto está sometido a una aceleración:

$$a_N = \omega^2 R = \frac{v^2}{R} = \frac{(55,6)^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2}{100 \text{ m}} = 30,9 \frac{m}{s^2}$$



Esto es aproximadamente igual a 3g (tres veces el valor de la gravedad)

La cabeza del piloto es uno de los puntos más sensibles ante estas bruscas aceleraciones. Las grandes fuerzas a las que se ve sometida en los virajes deben ser compensadas por los músculos del cuello, razón por la cual éstos adquieren gran desarrollo en quienes practican este deporte.

