

**Actividades Experimentales para el Estudio del Fenómeno de la Rotación de la Tierra**

**Armando Antonio Palacios Hernández**

**2014146046**

**Diana Carolina Rentería Díaz**

**2014146054**

**Línea de Profundización:**

**La Actividad Experimental para la Enseñanza de la Física**

**Universidad Pedagógica Nacional de Colombia**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Departamento de Física**

**Bogotá D.C.**

**2019**

**Actividades Experimentales para el Estudio del Fenómeno de la Rotación de la Tierra**

**Armando Antonio Palacios Hernández**

**Diana Carolina Rentería Díaz**

**Trabajo de grado para optar al título de Licenciados en Física**

**Directora del trabajo:**

**Marina Garzón Barrios**


**Universidad Pedagógica Nacional de Colombia**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Departamento de Física**

**Bogotá D.C.**


**2019**

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 1 de 5</b>	

<b>1. Información General</b>	
<b>Tipo de documento</b>	Trabajo de Grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Actividades Experimentales para el Estudio del Fenómeno de la Rotación de la Tierra.
<b>Autor(es)</b>	Palacios Hernández, Armando Antonio; Rentería Díaz, Diana Carolina.
<b>Director</b>	Garzón Barrios, Marina
<b>Publicación</b>	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2019. 102 P.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional
<b>Palabras Claves</b>	EFEECTO CORIOLIS, ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, PÉNDULO DE FOUCAULT, ROTACIÓN DE LA TIERRA, VELOCIDAD.

<b>2. Descripción</b>
<p>El presente trabajo brinda elementos para la enseñanza de la física entorno a los fenómenos de rotación de la Tierra. Por tal razón, hemos organizado actividades experimentales que tienen como objetivo analizar el movimiento de acuerdo con el marco de referencia, los efectos y características de la rotación.</p> <p>Al indagar sobre la rotación de la Tierra hemos encontrado que existe una carencia de textos escolares que aborde este tipo de problemáticas, ya que los textos existentes abordan estos temas recurriendo a formalismos matemáticos fuera del alcance del nivel escolar.</p> <p>Consideramos que a través de la enseñanza de la física podemos propiciar la construcción de explicaciones a través de la argumentación y socialización o de refutación y validación de ideas. Encontramos pertinente problematizar fenómenos entorno al movimiento, que permitan generar discusiones en nuestros estudiantes, para que ellos ganen argumentos en la comprensión del mundo físico en diferentes contextos y se apropien de las formas de explicar el mundo en la construcción de su propio conocimiento. A través de la propuesta reflexionamos sobre cómo estamos enseñando física y con qué finalidad, pues para nosotros resulta importante señalar el papel de la física como ciencia para comprender y explicar el mundo.</p> <p>Reflexionar sobre la enseñanza de la física y su finalidad resulta importante, ya que el papel de la física como ciencia para comprender y explicar el mundo; por lo tanto, en este trabajo se ha indagado y detectado ideas de movimientos en marcos de referencia inerciales y no inerciales en un grupo de muestra, diseñando actividades experimentales entorno al movimiento mecánico, encaminándolas al fenómeno de la rotación de la Tierra y sus efectos observables. Por último, se implementaron estas actividades para así llegar a sistematizar y analizar los resultados obtenidos.</p>

<b>3. Fuentes</b>
<p>Adúriz, A., Bonán, L., Ure, C., y Garea, M. (2000). Trabajo de aula y trabajo de laboratorio. Propuesta para repensar los planos teórico y práctico a través del Péndulo de Foucault. REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA.</p> <p>Alexandre, M. (s.f.). Tracker-video análisis and modeling tool. Descargado 2019-07-24, de <a href="https://">https://</a></p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 2 de 5</b>	

[journals.openedition.org/bibnum/731?lang=en](http://journals.openedition.org/bibnum/731?lang=en)

BBCmundo. (2016). Por qué hay gente que aún cree que la tierra es plana. Descargado 2018-03-2, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37954365>

Beamonte, P. (2018). Chileno rechaza vacunarse por ideología y muere de fiebre amarilla. Descargado 2018-07-5, de <https://hipertextual.com/2018/02/chileno-rechaza-vacunarse-ideologia-muere-fiebre-amarilla>

Benoît, P. C. (s.f.). Lavabos, coriolis et rotation de la terre. Descargado 2003-02-21, de [https:// planet-terre.ens-lyon.fr/article/modelisation-coriolis.xml](https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/modelisation-coriolis.xml)

Copérnico, N., y Nacional, I.P. (1999). Revoluciones de las orbitas celestes: Tomo I (n.o v.1). Instituto Politécnico Nacional.

Coriolis, M. G. (1831). Académie mémoires -mémoires - sur le prencipe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines. Impr. Nationale.

Focucault, L., Garzon M. Rentería D. y Palacios A. (1848). Sur divers signes sensibles du mouvement diurne de la terre.

Giancoli. (1989). Física general v11. Prentice Hall (a Pearson Education company).

Hazen, W. E., y PIDD, R. W. (1969). Física.

Ibarra, E. (2010). Péndulo paramétrico de Foucault (Master en Ciencias Matemáticas).

Icordonm. (s.f.). Transformaciones de Galileo y Lorentz.

Landau, L., y Rumer, Y. (1995). ¿qué es la teoría de la relatividad? Ediciones Akal.

Mach, E. (1948). Conocimiento y error. Espasa Calpe.


Malagón, M., Ayala, M., y Sandoval, S. (2011). El experimento en el aula: comprensión de fenomenologías y construcción de magnitudes. Bogotá, D. C: Universidad Pedagógica Nacional

Moatti, A. (2011). Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843): Un mathématicien, théoricien de la mécanique appliquée (Tesis Doctoral no publicada). Université Paris I Panthéon-Sorbonne.

Newton, I., y García, E. (2011). Principios matemáticos de la filosofía natural. Alianza Editorial.

RAE. (2015). p. 1. Descargado 2018-01-15, de <http://lema.rae.es/dpd/srv/search?id=KKIXcZ6vMD6UiQB0EW>

Ripa, P. (1996). La increíble historia de la malentendida fuerza de Coriolis [archivo de computador]. Fondo De Cultura Económica USA.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 3 de 5</b>	

Rubio, J. (2018). La tierra plana, una teoría de la conspiración construida con memes y grupos de facebook. Descargado 2018-08-21, de [https://verne.elpais.com/verne/2018/01/30/articulo/1517320204\\_628910.html](https://verne.elpais.com/verne/2018/01/30/articulo/1517320204_628910.html)

Sagan, C., y Abelló, D. (2017). El mundo y sus demonios: La ciencia como una luz en la oscuridad. Grupo Planeta.

SPIEGEL. (2011). Analisis vectorial Schaum 2ed. McGraw Hill.

Stellarium. (s.f.). Catalogo de estrellas.

Stepanyants, Y. A., y Yeoh, G.H. (2008). Stationary bath tub vortices and a critical regime of liquid discharge.

Tipler, P. (1985). Física. Barcelona: Reverte.

Tobin, W. (2012). Léon Foucault. EDP Sciences.

Veritasium. (s.f.). The truth about toilet swirl. Descargado 2015-06-03, de <https://www.youtube.com/watch?v=aDorTBEhEtk-https://www.youtube.com/watch?v=ihv4f7VMeJw>

Viennot, L. (2003). Razonar en Física (spanish edition). Antonio Machado Ediciones.

#### 4. Contenidos


En el **primer capítulo** se aborda el estado de reposo y el movimiento con velocidad constante de un objeto, se finaliza analizando situaciones en las que es imposible diferenciar entre estos dos estados.

En el **segundo capítulo** se analiza el comportamiento de los objetos dentro de un móvil cuando se encuentra a velocidad constante en movimiento rectilíneo, y posteriormente, acelera sin cambiar de dirección. El análisis se realiza a partir de las leyes de Newton, de modo que, se establece una pseudofuerza dentro del marco de referencia no inercial, para así poder describir el aumento de la velocidad de los objetos que se encuentran dentro del móvil cuando éste acelera.

El **tercer capítulo** se centrará en el comportamiento de los objetos dentro de un móvil que cambia de dirección sin cambiar de rapidez, es decir, se encuentra en movimiento circular; surge nuevamente la necesidad de establecer una pseudofuerza en el marco de referencia no inercial y se describen los cambios de velocidad que experimentan los objetos que también se encuentran dentro del móvil cuando éste cambia de dirección.

En el **cuarto capítulo** se considera el comportamiento de los cuerpos que se desplazan dentro de un móvil en un Movimiento Circular a Rapidez Uniforme; se describe el efecto Coriolis para explicar los cambios de dirección en el marco de referencia no inercial y la magnitud de la pseudofuerza. Se finaliza estudiando el Péndulo de Foucault como un caso del efecto Coriolis mediante el cual se describe el Fenómeno de la Rotación de la Tierra, tomando en consideración la forma esférica de ésta para poder describir el comportamiento del péndulo en cada punto del planeta.

Se resalta que en cada capítulo se plantean las actividades experimentales que se llevaron al aula, para

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 4 de 5</b>	

indagar y detectar las ideas que tienen o que se van desarrollando por parte de los estudiantes sobre estos fenómenos, y en donde presentamos la sistematización del proceso de enseñanza.

### 5. Metodología

En este apartado describimos la investigación que se realizó para elaborar las actividades experimentales desde el campo de la física.

Como primera instancia, se tomó en cuenta la dinámica de Newton para luego realizar una revisión bibliográfica acerca del movimiento de la rotación de la Tierra, teniendo en cuenta como trabajos principales “Señales sensibles del movimiento de rotación de la Tierra” de Leon Foucault y “Sobre el principio de las fuerzas vivas dentro de los movimientos relativos de las máquinas” de Gaspard Coriolis, mediante las cuales se obtienen elementos para la construcción de los marcos teóricos y de las actividades experimentales.


El desarrollo de estas actividades está soportado en un aprendizaje en el que nuestros estudiantes asocian la información nueva con la que ya tienen, reorganizando y modificando ambas informaciones a lo largo de este proceso. Así, el fin de la actividad experimental es la indagación de las ideas, el potenciar la construcción de los modos de pensar y explicar los fenómenos del mundo físico, ampliando el campo de la experiencia de los estudiantes. Para nuestro trabajo el fenómeno de interés es el de la Rotación de la Tierra. La práctica e implementación de las actividades la realizamos con estudiantes del ciclo profesional de la Escuela Normal superior Distrital María Montessori (ENSDMM) del grado Undécimo (11<sup>o</sup>), los cuales se encontraban entre los 16 y 18 años y de los estratos socioeconómicos dos y tres. La gran mayoría de los estudiantes poseen celulares de gama media, así como el acceso a internet por medio de datos, lo cual nos permitió realizar una de las actividades y varias consultas. Ellos han tomado cursos de Álgebra, Trigonometría, Pre física, Física I y cursan Física II, en los cuales han abordado temas como: conversión de unidades, Trigonometría, Álgebra básica, Movimiento Rectilíneo Uniforme, Movimiento Uniformemente Acelerado (tiro parabólico), Leyes de Newton, entre otros.

### 6. Conclusiones

El experimento mental nos permitió indagar, detectar y discutir los efectos de inestabilidad que tiene un pasajero dentro de un móvil acelerado (marco de referencia no inercial). En varias ocasiones los estudiantes simulaban como se comportaba su cuerpo al tomar una curva, al frenar o acelerar el móvil en el que se encontraban; pero, encontramos apatía y desinterés al analizar las variables físicas en estas situaciones, mientras que los experimentos físicos aumentaron su interés.

Percibimos que parte del conocimiento de los estudiantes se divide en lo vivido diariamente y en lo estudiado en clase, lo cual crea un abismo entre ambos mundos, siendo esto un obstáculo a la hora de la construcción de los conceptos físicos implicados. El docente encargado y nuestra propuesta de aula trataron de eliminar dicha barrera con metodologías diferentes, pero nos encontramos con que la mayoría de los estudiantes no están acostumbrados a relacionar ambos mundos. Proponemos que este tipo de actividades experimentales, donde se incluya la experiencia como base para la construcción de conceptos físicos, se trabajen desde temprana edad para superar este tipo de dificultades.

Las prácticas experimentales evidenciaron en los estudiantes un problema en el análisis de la causa de la aceleración en los cuerpos dentro de un marco de referencia no inercial, y aunque podían nombrar las leyes de Newton no se remitían a las descripciones que ellos le otorgaban a la fuerza desde su experiencia, lo

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 5 de 5</b>	

cual constituyó un obstáculo en el desarrollo del concepto de pseudofuerza; por lo tanto, proponemos realizar las actividades desarrolladas en este trabajo, pero incluyendo un capítulo en donde solo se estudie el concepto de fuerza. Así, nuestro objetivo general en cuanto a la valoración de las actividades es positiva porque se logró indagar, detectar y discutir las ideas de movimiento que ya tenían los estudiantes, pero a su vez, encontramos que los estudiantes tienen deficiencia en el concepto de fuerza y por tal razón sus descripciones no terminan siendo coherentes en algunos casos con los marcos teóricos físicos.

Como en todo proceso, la participación inicialmente era liderada por unos pocos estudiantes; el temor a equivocarse fue dejándose a un lado en el transcurso de las sesiones. En este sentido, el trabajar activamente con los estudiantes, fue crucial para lograr involucrar a la gran mayoría en el proceso de proponer y comunicar sus predicciones.

<b>Elaborado por:</b>	Palacios Hernández, Armando Antonio; Rentería Díaz, Diana Carolina.
<b>Revisado por:</b>	Garzón Barrios, Marina

<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	15	08	2019
--	----	----	------

# Agradecimientos

*Quiero agradecer a mi mamá Mónica Hernández Porras y mi papá Edilberto Palacios Mora, ya que han sido excelentes padres; a la profesora Marina Garzón Barrios por su sabiduría y paciencia para elaborar este trabajo; a Diana Carolina Rentería Díaz por que estuvo en todo momento apoyándome y ayudándome desde que nos conocimos; al profesor Michael Ramírez que nos brindó el espacio para implementar esta investigación; a mi hermano Nicolás Palacios Hernández por la ayuda que me ha brindado; y a mis amigos y familiares que me ayudaron durante la carrera.*

Armando Palacios Hernandez

*Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. En primer lugar, doy gracias a Dios por permitirme tener tan agradable experiencia de comenzar y terminar esta carrera y por convertirme en una mujer profesional.*

*A la profesora Marina Garzón Barrios, asesora de este trabajo y maestra consagrada en los últimos dos años. Ella creyó en este proyecto, lo apoyó de manera personal e institucional y animó para que concluyera esta investigación.*

*Al profesor Michael Ramírez y a la Escuela Normal Superior Distrital María Montessori (ENSDMM), por brindarme el espacio durante año y medio para realizar mis prácticas y afianzar mi aprendizaje como maestra.*

*A mi compañero de trabajo de grado, Armando Antonio Palacios Hernández, por su sincera amistad y aunque hemos pasado momentos difíciles, le agradezco su paciencia, tolerancia y afecto incondicional.*

*A mi compañero de vida Jaime Andrés López Prieto, por su sacrificio y esfuerzo, por creer en mi capacidad y por brindarme su comprensión y cariño.*

*A mis amados hijos Samuel José y Guillermo Andrés, por ser mi fuente de motivación, inspiración y superación día a día y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.*

*A mi querida prima Aida Fernanda García Arriaga, por ser mi amiga y consejera, alentándome con sus palabras las cuales no me permitían decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpla con mis ideales.*

*A mi mamá Soledad Díaz Carrillo, que a pesar de nuestras diferencias, siempre me ha dado un ejemplo de vida y de empuje ante las adversidades.*



## II

*A mi hermano José Edelink Rentería Díaz (Q.E.P.D), por haber compartido parte de este esfuerzo y por todos los bonitos momentos que pasamos juntos desde nuestra niñez hasta su muerte. Muchas gracias hermano.*

*A mis compañeros y amigos presentes, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño se hiciera realidad.*

*Por último, pero no menos importante, a la Universidad Pedagógica Nacional que me dio la bienvenida y porque las oportunidades que me ha brindado son infinitas. Por la ayuda de mis maestros y administrativos de la Licenciatura en Física y en general, por todos los conocimientos que me han otorgado.*

Gracias totales. Diana Carolina Renteria Diaz

# Tabla de contenido

Índice de figuras	IV
Introducción	VII
<b>1. Te mueves o me muevo, la relatividad del movimiento</b>	<b>1</b>
1.1. Diseño de actividades sobre los movimientos a velocidad constante en el aula . . . .	5
1.1.1. Actividad I: Los movimientos a velocidad lineal constante y el reposo . . . .	5
<b>2. Inercial o no inercial, el observador nos lo dirá</b>	<b>11</b>
2.1. Análisis de la velocidad y aceleración para los móviles acelerados . . . . .	11
2.2. Los marcos de referencia no inerciales y la fuerza . . . . .	14
2.3. Diseño de actividades sobre los marcos de referencia no inerciales en el aula . . . .	15
2.3.1. Actividad II: Los cambios de movimiento en marcos de referencia no inerciales . . . . .	15
<b>3. Curvas y glorietas, ¿Qué nos obliga a girar?</b>	<b>19</b>
3.1. Análisis de la velocidad y aceleración para establecer la rotación como marco de referencia no inercial . . . . .	20
3.2. La velocidad angular: Una nueva variable para describir el movimiento circular . .	23
3.3. Diseño de actividades sobre los marcos de referencia en rotación en el aula . . . . .	29
3.3.1. La actividad III: Los cambios de movimiento según marcos de referencia en rotación . . . . .	29
<b>4. Fuerza ficticia o real, Coriolis nos lo aclarará</b>	<b>32</b>
4.1. Efecto Coriolis como ejemplos de esas pseudofuerzas . . . . .	33
4.2. El Péndulo de Foucault . . . . .	38
4.2.1. El Péndulo de Foucault y la forma de la Tierra . . . . .	42
4.3. Diseño de actividades sobre el efecto Coriolis y el péndulo en el aula . . . . .	46
4.3.1. La actividad IV: Los movimiento dentro de marcos de referencia en rotación	46
4.4. Diseño de actividades sobre el movimiento de rotación de la Tierra . . . . .	49
4.4.1. La actividad V: El movimiento de Rotación de la Tierra . . . . .	49
4.5. Actividad VI: Los Planetas como sistema de referencia no inercial . . . . .	53
<b>Conclusiones finales</b>	<b>56</b>
<b>A. Anexos</b>	<b>58</b>
A.1. Marcos de referencia inerciales: análisis matemático . . . . .	58
A.2. Marcos de referencia uniformemente acelerado: análisis matemático . . . . .	60

A.3. Marcos de referencia en movimiento circular uniforme: análisis matemático . . . . .	61
A.4. El sentido de giro de las estrellas . . . . .	64
A.5. Actividades . . . . .	66
A.5.1. ACTIVIDAD I: Los movimientos a velocidad lineal constante y el reposo . . . . .	66
A.5.2. ACTIVIDAD II: Procesos de indagación sobre los cambios de movimiento según marcos de referencia lineales acelerados . . . . .	69
A.5.3. ACTIVIDAD III: Procesos de indagación sobre los cambios de movimiento según marcos de referencia en rotación . . . . .	70
A.5.4. ACTIVIDAD IV: Los movimientos dentro de marcos de referencia en rotación	71
A.5.5. ACTIVIDAD V: El movimiento de rotación de la Tierra . . . . .	72
A.5.6. ACTIVIDAD VI: Los planetas como sistema de referencia no inercial . . . . .	74
A.6. Anexos sistematización . . . . .	75
A.6.1. Sistematización de la ACTIVIDAD I . . . . .	75
Registros gráficos ACTIVIDAD I . . . . .	83
A.6.2. Sistematización de la ACTIVIDAD II . . . . .	87
Registros gráficos ACTIVIDAD II . . . . .	91
A.6.3. Sistematización de la ACTIVIDAD III . . . . .	93
Registros gráficos ACTIVIDAD III . . . . .	93
A.6.4. Sistematización de la ACTIVIDAD IV . . . . .	94
Registros gráficos de la ACTIVIDAD IV . . . . .	96
A.6.5. Sistematización de la ACTIVIDAD V . . . . .	98
REGISTROS GRÁFICOS DE LA ACTIVIDAD V . . . . .	98
A.6.6. Sistematización de la ACTIVIDAD VI . . . . .	100
REGISTROS GRÁFICOS DE LA ACTIVIDAD VI . . . . .	100

# Índice de figuras

1.	Ideas en común que tiene un observador en reposo y uno a velocidad constante . . .	X
2.	Ideas que modifica un observador dentro de un movimiento acelerado en relación con uno inercial . . . . .	XI
3.	Experimento mental I con trenes . . . . .	2
4.	Experimento mental II con trenes . . . . .	2
5.	Experimento mental III con trenes . . . . .	3
6.	Experimento mental IV con trenes . . . . .	3
7.	Experimento mental V con trenes . . . . .	4
8.	Representación de un pasajero a velocidad constante . . . . .	12
9.	Representación de la aceleración positiva de un pasajero . . . . .	12
10.	Representación de la aceleración negativa de un pasajero . . . . .	13
11.	Representación de la fuerza en un móvil que cambia de dirección y la tendencia a seguir en línea recta . . . . .	20
12.	Cambio de dirección de 180° de un móvil (Curva en "U") . . . . .	21
13.	Cambio de dirección de 10° de un móvil . . . . .	21
14.	Análisis de los vectores en un movimiento circular . . . . .	22
15.	Triángulo dado por los vectores $\vec{v}$ y $\vec{r}$ en un MCU . . . . .	22
16.	Representación de un movimiento circular en el eje coordenado $(x,y,z)$ . . . . .	23
17.	Giro de los vectores $\vec{r}_x$ y $\vec{r}_y$ a favor de las manecillas del reloj . . . . .	24
18.	Giro de los vectores $\vec{r}_x$ y $\vec{r}_y$ en contra de las manecillas del reloj . . . . .	24
19.	Representación de los vectores $\vec{v}$ , $\vec{\omega}$ y $\vec{r}$ en un movimiento circular . . . . .	25
20.	Fuerza centrípeta en un movimiento totalmente circular . . . . .	27
21.	Dirección de la pseudofuerza centrífuga para un movimiento con velocidad angular negativa . . . . .	27
22.	Dirección de la pseudofuerza centrífuga para un movimiento con velocidad angular positiva . . . . .	28
23.	Base giratoria construida para el estudio del movimiento dentro de la rotación . . .	33
24.	Montaje del plano inclinado dentro de la base giratoria . . . . .	33
25.	Representación de la desviación de la esfera dentro de la base con $ \vec{\omega} > 0 $ . . . . .	34
26.	Representación de la desviación de la esfera dentro de la base con $ \vec{\omega} < 0 $ . . . . .	35
27.	Desviación de un movimiento en línea recta según un observador en rotación . . . .	37
28.	Movimiento recto hacia el centro, según un observador en rotación . . . . .	38
29.	Representación del plano de oscilación imaginario de un péndulo en un marco de referencia inercial . . . . .	39

30. Cambio exagerado del plano de oscilación imaginario de un péndulo en un marco en rotación . . . . .	39
31. Movimiento Armónico Simple, según un observador en rotación . . . . .	40
32. Representación de un péndulo donde se pone a girar el hilo que lo sostiene . . . . .	41
33. Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Norte en el Stellarium . . . . .	43
34. Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Sur en el Stellarium . . . . .	43
35. Capturas de pantalla de las estrellas vistas desde el Ecuador en el Stellarium, . . . . .	44
36. Experimento mental con planetas . . . . .	54
37. Marco en reposo $O$ y marco a velocidad constante $O'$ . . . . .	59
38. Marco de referencia inercial $O$ y marco lineal acelerado $O'$ (no inercial) . . . . .	60
39. Marco de referencia inercial $O$ y marco en rotación $O'$ (no inercial) . . . . .	62
40. Sentido de giro de las estrellas en el polo Norte ( $90^\circ\text{N}$ ) por fuera de la bóveda celeste	64
41. Sentido de giro de las estrellas en el polo Sur ( $90^\circ\text{S}$ ) por fuera de la bóveda celeste .	64
42. Sentido de giro de las estrellas en latitudes boreales medias ( $40^\circ\text{N}$ ) por fuera de la bóveda celeste . . . . .	65
43. Sentido de giro de las estrellas en latitudes australes medias ( $40^\circ\text{S}$ ) por fuera de la bóveda celeste . . . . .	65
44. Estrellas trazando direcciones paralelas en el Ecuador ( $0^\circ$ ) por fuera de la bóveda celeste . . . . .	65
45. Experimento mental con planetas . . . . .	74
46. Representación de los líquidos en los 3 casos expuestos de la actividad 1 . . . . .	83
47. Trayectoria del saco de arena de la película "Ágora" vista por dos observadores . . .	83
48. Trayectoria del saco de arena de la película "Ágora" . . . . .	84
49. Trayectoria de la esfera del documental "El Universo Mecánico", parte 4 . . . . .	85
50. Trayectoria de la esfera del experimento: Programa "Los Cazadores de Mitos" . . .	86
51. Descripción de la aceleración y comportamiento del cuerpo cuando el móvil en el que se encuentra frena . . . . .	91
52. Descripción del comportamiento del cuerpo cuando el móvil en el que se encuentra cambia de rapidez . . . . .	92
53. Descripción de la "fuerza centrífuga" para un movimiento circular . . . . .	93
54. Descripción de un móvil que cambia de dirección . . . . .	93
55. Descripción de la pseudofuerza que siente un pasajero que se encuentra dentro de un movimiento circular . . . . .	94
56. Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo con el sentido de giro . . . . .	96
57. Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo . . . . .	96
58. Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo para que éste llegue hasta la otra persona . . . . .	97
59. Sentido de giro de las estrellas de la actividad con el celular . . . . .	98
60. Sentido de giro de las estrellas según el movimiento del celular . . . . .	99
61. Descripción del sentido de giro de las estrellas en la pantalla del celular en rotación	99
62. Utilización de un péndulo para establecer que un planeta se encuentra en rotación .	100
63. Descripción del movimiento aparente de las estrellas para definir la rotación del planeta . . . . .	100

# Introducción

Que la Tierra gire sobre su propio eje o que la Tierra se traslade alrededor del Sol, son afirmaciones que decimos desde la primera infancia y luego a lo largo de toda la vida. En la actualidad, poner en discusión estas ideas, es necesario por dos razones:

1. Porque algunos pensamientos se han convertido más en una cuestión de fe, y la población, en general, tiene pocos argumentos para afirmar que la Tierra gira. Se afirma porque la ciencia ha ganado un reconocimiento que hace que se dé por cierto lo que en ella se dice, sin que sea cuestionado.
2. Porque hoy en día existen una serie de ideas terraplanistas que ponen en duda la forma esférica de la Tierra y sus respectivos movimientos como lo muestra BBCmundo (2016). Tales ideas se encuentran desarrolladas a través de argumentaciones meramente superficiales, establecidas solo por el razonamiento inmediato de lo que obtenemos por medio de los sentidos, y sin poner a prueba estas ideas en otras circunstancias. Casi siempre, estas ideas van acompañadas por tesis de complots de altos poderes que sirven para manipular a las grandes masas

*"Hay gente que cree que la Tierra no es una esfera achatada por los polos, sino un disco. Que la Tierra es plana. No es analfabetismo: estudiaron el Sistema Solar y sus planetas en el colegio, pero en los últimos años han decidido que todo eso de "la bola" es una gigantesca manipulación. Solo el 66% de los jóvenes entre 18 y 24 años de EE.UU. está plenamente seguro de que vivimos en un planeta esférico (el 76% entre 25 y 34 años). Es un fenómeno global, también presente en España, al que cuesta asomarse sin bromear. Pero al observar los mecanismos psicológicos, sociales y culturales que los llevan a convencerse de esta gigantesca conspiración se descubre una metáfora perfecta que resume los problemas más representativos de esta época. Aunque parezca medieval, es muy actual."*Rubio (2018)

Estas dos razones hacen vulnerables a las poblaciones frente a las manipulaciones de la información así como nos lo deja ver Sagan y Abelló (2017) (p.27). Lo que puede conllevar a desarrollar problemas de mayor envergadura, como, por ejemplo, en el área de la salud con el tema de la abstención de las vacunas y sus posibles consecuencias (ver artículo Beamonte (2018)).

En torno a lo anterior, se origina nuestra preocupación sobre cómo estamos enseñando física y con qué finalidad, pues para nosotros resulta importante reflexionar el papel de la física como ciencia para comprender y explicar el mundo.

Desde este reconocimiento, consideramos que a través de la enseñanza de la física podemos generar la construcción de explicaciones a través de la argumentación y socialización o de refutación y validación de ideas. Encontramos pertinente problematizar fenómenos entorno al movimiento, que permitan generar discusiones en nuestros estudiantes, para que ellos ganen argumentos en la comprensión del mundo físico en diferentes contextos y se apropien de las formas de explicar el mundo en la construcción de su propio conocimiento.

Es así, donde el papel de la actividad experimental en la enseñanza de la física, juega un papel importante para la comprensión del Fenómeno de la Rotación de la Tierra, ya que el diseño tiene la finalidad de establecer relaciones entre efectos y variables; utilizando la experiencia de los estudiantes como base para el estudio de dicho fenómeno, y en otros casos ampliando el campo de experiencia cuando se vea pertinente; por lo tanto, la actividad experimental es vista como un espacio donde se discuten y consolidan las de ideas de los estudiante en el aula, así el estudiante participa activamente en la construcción de su propio conocimiento.(Basados en el libro Malagón y cols. (2011))

Es por ello por lo que nuestras preguntas centrales son:

- **¿Qué actividades permiten tener evidencia sensible de la rotación de la Tierra?**
- **¿Cómo propiciar afirmaciones argumentadas, coherentes y consistentes con el modelo de Tierra esférica y rotante, en el aula de clase?**

Al indagar sobre la rotación de la Tierra hemos encontrado que existe una carencia de textos escolares que aborde este tipo de problemáticas, los textos existentes abordan estos temas recurriendo a formalismos matemáticos fuera del alcance del nivel escolar . Es por ello, que ha sido nuestra intencionalidad acudir a:

- La experiencia común y las prácticas experimentales cuando hemos visto que ha sido necesario.
- Al currículo de la secundaria colombiana que aborda el álgebra elemental, los vectores y las leyes de Newton, que consideramos son formalismos suficientes para la comprensión del fenómeno de estudio.

Así, el presente trabajo se propone brindar elementos para la enseñanza de la física que permitan enriquecer las experiencias entorno a los fenómenos de rotación de la Tierra. Por tal razón, he-

mos organizado actividades experimentales que tienen como objetivo analizar el movimiento de acuerdo con el marco de referencia, los efectos y características de la rotación.

### **Objetivo general**

Valorar las actividades experimentales propuestas en el aula de clase para la enseñanza del fenómeno de la rotación de la Tierra, que permita al estudiante tener experiencias para poder dar explicaciones entorno a este fenómeno

### **Objetivos específicos**

- Indagar y detectar ideas de un grupo de estudiantes acerca de movimientos en marcos de referencias no inerciales.
- Diseñar actividades experimentales entorno al movimiento mecánico, encaminándolas al fenómeno de la rotación de la Tierra y sus efectos observables.
- Implementar actividades experimentales para el Estudio del Fenómeno de Rotación de la Tierra.
- Sistematizar los resultados obtenidos en la implementación de las Actividades Experimentales para el Estudio del Fenómeno de Rotación de la Tierra.

### **Metodología**

En este apartado describimos la investigación que se realizó para elaborar las actividades experimentales desde el campo de la física.

En nuestra **Fase exploratoria** encontramos en nuestras prácticas pedagógicas que los estudiantes han tenido experiencias alrededor del movimiento. Con ellas exploramos cuáles son las descripciones que ellos hacen en relación con marcos de referencia inerciales o no inerciales; todo ello, para tener elementos que nos permitieron, en relación con la rotación, tener una comprensión de estas experiencias iniciales de los estudiantes y que las actividades que diseñamos estén vinculadas con esas descripciones iniciales. Esto se logró por medio de cuestionarios escritos y registros gráficos donde el estudiante se sienta menos expuesto a sentirse señalado de llegarse a equivocar. Esta fase va acorde con nuestro primer objetivo específico.

Para la **Fase de Diseño de Actividades**, nos encaminaremos a estudiar la rotación cuando el observador está inmerso en el movimiento. Como primera instancia, se tomó en cuenta la dinámica de Newton (ver Figura: 1), para luego realizar una revisión bibliográfica acerca del movimiento de rotación de la Tierra, teniendo en cuenta como trabajos principales las lecturas “Señales Sensibles



del Movimiento de Rotación de la Tierra”<sup>1</sup> de Leon Foucault y “Sobre el Principio de las Fuerzas Vivas Dentro de los Movimientos Relativos de las Máquinas”<sup>2</sup> de Gaspard Coriolis, mediante las cuales se obtienen elementos para la construcción de los marcos teóricos y de las actividades experimentales (ver Figura: 2)(segundo objetivo específico).

El desarrollo de estas actividades está soportado en un aprendizaje en el que nuestros estudiantes asocian la información nueva con la que ya tienen, reorganizando y modificando ambas informaciones a lo largo de este proceso. Así, el fin de la actividad experimental es la indagación de las ideas, el potenciar la construcción de los modos de pensar y explicar los fenómenos del mundo físico, ampliando el campo de la experiencia de los estudiantes. Para nuestro trabajo el fenómeno de interés es el de la Rotación de la Tierra.

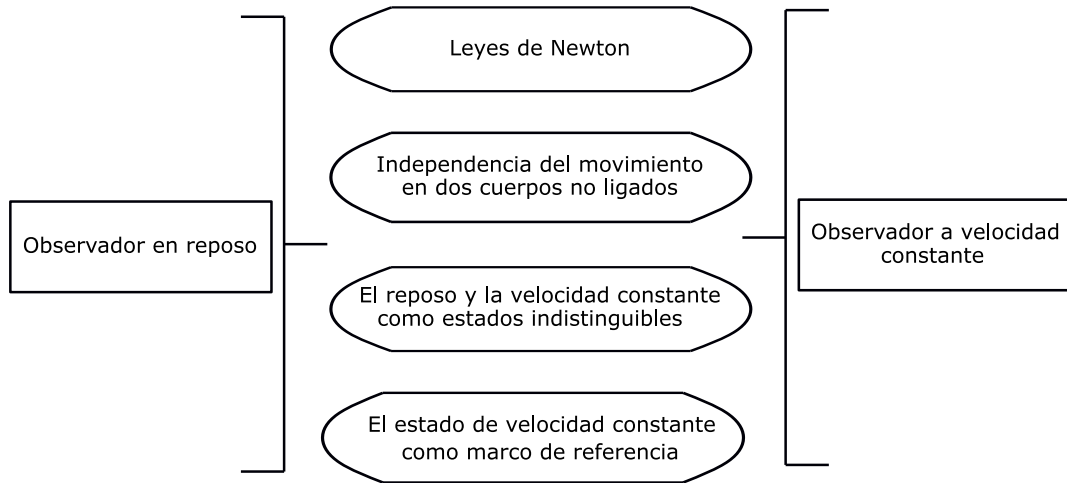
La **Fase de Implementación** de las actividades la realizamos con estudiantes del ciclo profesional de la Escuela Normal Superior Distrital María Montessori (ENSDMM) del grado Undécimo (11°), los cuales se encontraban entre los 16 y 18 años y de los estratos socioeconómicos dos y tres. La gran mayoría de los estudiantes poseen celulares de gama media, así como el acceso a internet por medio de datos, lo cual nos permitió realizar una de las actividades y varias consultas. Ellos han tomado cursos de Álgebra, Trigonometría, Prefísica, Física I y cursan Física II, en los cuales han abordado temas como: conversión de unidades, Trigonometría, Álgebra básica, Movimiento Rectilíneo Uniforme, Movimiento Uniformemente Acelerado (tiro parabólico), Leyes de Newton, entre otros.

En la **Fase de Sistematización y Análisis**, nos ocupamos del proceso de recolección de datos y el respectivo análisis de recepción de la propuesta, para cumplir con nuestro último objetivo específico

---

<sup>1</sup>Titulo traducido “Sur Divers Signes Sensibles” por Leon Foucault

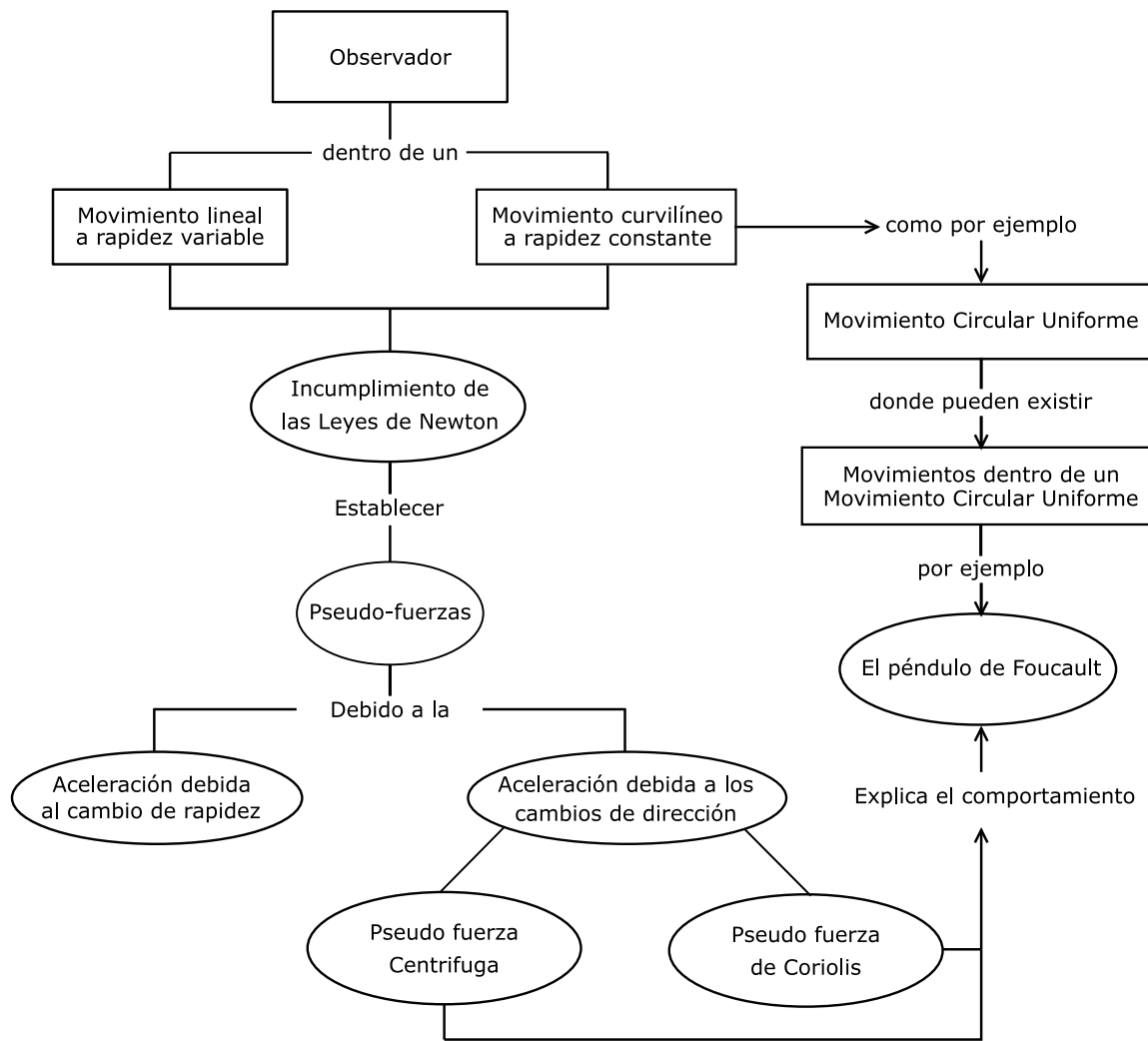
<sup>2</sup>Titulo traducido “Sur le Príncipe des Forces Vives dans les Mouvemens Relatifs des Machines” por G. Coriolis



**Figura 1:** Ideas en común que tiene un observador en reposo y uno a velocidad constante

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se establecen los dos observadores y en el centro se ubican las ideas en común



**Figura 2:** Ideas que modifica un observador dentro de un movimiento acelerado en relación con uno inercial

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se ubican dos observadores y se establecen sus ideas de arriba hacia abajo

**Vista general del contenido**

Para establecer el movimiento de un objeto es importante distinguir cuando éste se encuentra en movimiento y cuando no, por lo tanto, es primordial realizar un análisis del reposo y su relación con la velocidad constante, luego, del movimiento acelerado, donde se encuentran los de rotación y finalizando con los movimientos que ocurren dentro de éste, como es el caso de la Tierra.

Como justificación a todo lo anterior, los capítulos de nuestro trabajo se dividen en:

En el **primer capítulo** se aborda el estado de reposo y el movimiento con velocidad constante de un objeto y se finaliza analizando situaciones en las que es imposible diferenciar entre estos dos estados.

El **segundo capítulo** analiza el comportamiento de los objetos dentro de un móvil cuando se

encuentra a velocidad constante en movimiento rectilíneo, y posteriormente, acelera sin cambiar de dirección; el análisis se realiza a partir de las leyes de Newton, de modo que, se establece una pseudofuerza dentro del marco de referencia no inercial, para así poder describir el aumento de la velocidad de los objetos que se encuentran dentro del móvil cuando éste acelera.

El **capítulo tres** se centra en el comportamiento de los objetos dentro de un móvil que cambia de dirección sin cambiar de rapidez, es decir, se encuentra en movimiento circular; surge nuevamente la necesidad de establecer una pseudofuerza en el marco de referencia no inercial, se describen los cambios de velocidad que experimentan los objetos que también se encuentran dentro del móvil cuando éste cambia de dirección.

En el **capítulo cuatro** se considera el comportamiento de los cuerpos que se desplazan dentro de un móvil en un Movimiento Circular a Rapidez Uniforme, se describe el efecto Coriolis para explicar los cambios de dirección en el marco de referencia no inercial y la magnitud de la pseudofuerza. Se finaliza estudiando el Péndulo de Foucault como un caso del efecto Coriolis mediante el cual se describe el Fenómeno de la Rotación de la Tierra, tomando en consideración la forma esférica de ésta, para poder describir el comportamiento del péndulo en cada punto del planeta.

Se resalta que en cada capítulo se plantean las actividades experimentales que se llevaron al aula, para indagar y detectar las ideas que tienen o que se van desarrollando por parte de los estudiantes sobre estos fenómenos, y en donde presentamos la sistematización del proceso de enseñanza.

# Capítulo 1

## Te mueves o me muevo, la relatividad del movimiento

A diario tenemos experiencias de movimientos que suceden a velocidad constante y variable, ya que para desplazarnos a grandes distancias utilizamos medios de transporte como bicicleta, avión, tren, etc., en donde nos encontramos inmersos en el movimiento y apreciamos velocidades constantes o variables. Si estuviéramos al interior de un móvil como un autobús, y éste se desplazará con una **velocidad lineal constante**, podríamos ir de un lado a otro con total seguridad de no sentirnos “empujados” o inestables en el movimiento, como si el autobús estuviera en reposo (inmóvil).

Si analizamos el comportamiento de objetos al interior de un autobús que va a velocidad lineal constante, encontraríamos que estos se comportan como si estuvieran en reposo con respecto al bus. Por ejemplo, un libro encima de la silla del autobús seguirá encima de ésta; el agua dentro de un vaso que se encuentra sobre una mesa nivelada no se desbordaría de éste; si dejamos caer una esfera, ésta caería en línea recta en dirección hacia el suelo, o si lanzamos linealmente la esfera hacia una persona, la esfera no sufrirá variaciones en su trayectoria; un péndulo seguiría oscilando sin ninguna desviación de un lado a otro en iguales instantes de tiempo, o seguiría totalmente vertical si no le imprimiéramos ningún impulso, y una bala de cañón siempre seguiría cayendo en el mismo lugar si es lanzada bajo las mismas condiciones iniciales <sup>1</sup>, por lo tanto, se puede afirmar que es indistinguible el estado de reposo al de movimiento a velocidad lineal constante.

De acuerdo con lo anterior ¿cuáles son las condiciones para poder establecer si un objeto se mueve a velocidad constante o si está en reposo? En el ejemplo anterior, alguien podría decir que

---

<sup>1</sup>Esto ocurre siempre y cuando evitamos fuerzas indeseables como la fricción como nos lo deja ver Landau y Rumer (1995, p.22). En conclusión, todos los objetos se terminan comportando como si estuvieran en un marco de referencia que se encuentra en reposo

basta con abrir las ventanas y observar si nos encontramos en movimiento o no. Sin embargo, esta observación no es suficiente, veamos por qué:

Si nos encontráramos en un tren subterráneo (tren amarillo) y estamos inmóviles respecto a la estación, al observar por una de las ventanas, nos percatamos que se encuentra otro tren y vemos que se desplaza en frente de nosotros (ver Figura: 3)¿Cómo asegurar cuál de los dos trenes se está moviendo? Solo podríamos saber cuál se está desplazando si miramos hacia la estación, que sabemos se encuentra en “reposo”.



**Figura 3:** Experimento mental I con trenes

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Se ubican dos trenes en una estación de forma paralela



**Figura 4:** Experimento mental II con trenes

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Se ubican tres trenes en una estación de forma paralela en diferentes sentidos

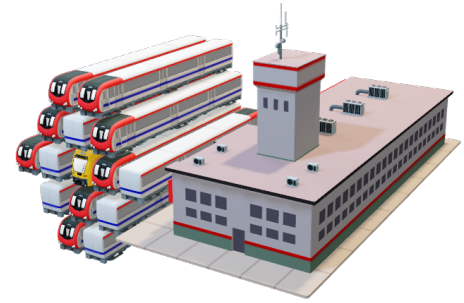
Ahora, si imaginamos que al otro lado de la ventana se encuentra otro tren que puede ir a velocidad constante (ver Figura: 4), desde el tren en el que nos encontramos: ¿Podríamos afirmar que nos estamos moviendo respecto a la estación?

Si a este experimento mental agregamos otros trenes, tanto en la parte inferior y superior, que pueden o no estar moviéndose a velocidad constante con respecto a la estación (ver Figura: 5), de nuevo la pregunta sería, ¿Cómo saber que el tren en el que nos encontramos se encuentra en movimiento respecto a la estación?; el lector podrá evidenciar que no es posible responder esta pregunta, cuando lo trenes tengan una velocidad lineal constante o estén en reposo, ni aun cuando abramos una ventana o llenemos un vaso de agua para comprobarlo .



**Figura 6:** Experimento mental IV con trenes

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Se ubican varios trenes en diferentes sentidos pero de forma paralela entre ellos



**Figura 5:** Experimento mental III con trenes

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Se ubican varios trenes en una estación en diferentes sentidos pero de forma paralela entre ellos

Podemos establecer situaciones más complejas añadiendo o quitando elementos, pero manteniendo la condición de velocidad lineal constante o de reposo de cada elemento; por ejemplo, de no llegar a haber una estación de tren (ver Figura: 6) ¿Respecto a qué nos moveríamos?, podemos llegar a pensar y contestarnos si tendría sentido el pensar que en el universo existe algún análogo de la estación o si todos los objetos del espacio exterior son análogos a los trenes.

Por otra parte, si algunos de los trenes no fueran siempre en dirección paralela respecto a la ubicación de nuestro tren, pero aún permaneciendo a una velocidad lineal constante o en reposo (ver Figura: 7), tampoco podríamos percibir quién se está moviendo, porque cualquier pasajero que se comunique con nosotros y que se encuentre en otro tren nos aseguraría que al observar por la ventana, nosotros seríamos los que nos encontramos moviendo, que el libro que posee no se ha movido y que el agua dentro de su vaso no se ha derramado, dando por hecho que todos los objetos se comportan en cada tren como si estuvieran en reposo.



**Figura 7:** Experimento mental  $V$  con trenes

*Fuente:* Adaptada de Microsoft  
*Nota:* Se ubican varios trenes en diferentes sentidos entre ellos

En conclusión, hablar del estado de movimiento parece ser algo relativo, por lo menos en condiciones de velocidad lineal constante o de reposo, ya que para Newton y García (2011) no podemos distinguir un estado del otro (p.114); entonces podríamos llegar a agrupar estos movimientos lineales a velocidad constante y utilizarlos como referentes para otros movimientos, los cuales, y a través del tiempo, se han denominado marcos de referencia.

Cuando observamos el firmamento desde la Tierra y sin importar si es de día o de noche, los cuerpos celestes se mueven respecto a nosotros, aunque también podríamos preguntarnos ¿Nosotros somos los que nos movemos? ¿La respuesta es meramente relativa? La situación parece tornarse más complicada, si por ejemplo, el cielo siempre estuviese nublado, y entonces tendríamos que llegar a preguntarnos, ¿Cómo saber si la Tierra está girando? De la misma manera que en el caso de los trenes subterráneos, no podemos afirmar con total seguridad que nos movemos solamente con observar el cielo (el cual vendría a ser análogo a nuestra ventana del tren); en este caso no bastaría con aseverar que la Tierra gira sobre su eje con el argumento de que los objetos celestes que vemos en el cielo se desplazan, sin, además, haber establecido un análisis para la rotación.

Aunque el experimento de los trenes ha sido mental, está basado en el análisis de la experiencia que tenemos a diario en el uso de los diferentes medios de transporte, es decir, estas ideas o representaciones no han surgido de manera espontánea; por ejemplo, en ciertos momentos del vuelo de un avión se sirven las bebidas (cuando se va a velocidad lineal constante) y solo en turbulencias, giros, despegues o aterrizajes (velocidad variable) se dejan de servir para evitar que los líquidos se desborden de los vasos o para evitar tener un accidente por la inestabilidad de los objetos en los casos anteriormente nombrados.



## 1.1. DISEÑO DE ACTIVIDADES SOBRE LOS MOVIMIENTOS A VELOCIDAD CONSTANTE EN EL AULA5

El anterior análisis mental nos da la ventaja de llevar la experiencia a un nivel algo más complejo, ya que hemos pasado del estudio de una experiencia, estableciendo las variables de velocidad constante y trayectoria en el movimiento a velocidad constante, a situaciones con un mayor número de elementos bajo la misma lógica, así como para Mach (1948, p.162).

### 1.1. Diseño de actividades sobre los movimientos a velocidad constante en el aula

En los experimentos mentales de este capítulo se ha establecido la condición de llevar siempre una velocidad lineal constante; en la cotidianidad, mantener este estado de movimiento es demasiado complicado, ya que tenemos que contrarrestar la fuerza de fricción y además, tendríamos que situar a nuestros estudiantes dentro de estos movimientos. Cuando viajamos en un móvil, los tiempos de velocidad constante son breves, por ello, hemos decidido recurrir al experimento mental, además de utilizar videos que se encuentran en Internet ubicados dentro de los medios de transporte a velocidad constante. Esto nos permitirá analizar variables que nos interesan como la velocidad y la trayectoria; pensamos que todo ésto deja ver que el estado de movimiento lineal constante y el de reposo son algo indistinguible entre sí.

#### 1.1.1. Actividad I: Los movimientos a velocidad lineal constante y el reposo

Esta actividad fue diseñada para dos sesiones, cada una con un tiempo de 1 hora y 40 minutos, y tiene como objetivo:

- Identificar la indistinguibilidad entre el reposo y el movimiento a velocidad lineal constante.

*Sesión I - Película Ágora: Hipatía, que va en un barco, observa cómo se deja caer un saco de arena desde el mástil por parte de un esclavo que también va en el barco. ¿Cómo cree usted que Hipatía percibiría la velocidad de los dos objetos implicados en el fenómeno?*

### Cuestionario

1. ¿La velocidad del barco y la del saco de arena es constante o variable? ¿Por qué cree que es esa velocidad?
2. ¿Se puede establecer alguna relación entre la velocidad del saco y la del barco? Justifique su respuesta

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

#### **Respuesta esperada según el análisis de Hipatía**

**Clave de respuesta:** El saco de arena antes de dejarse caer va a la misma velocidad del barco, cuando se deja caer además de tener la velocidad del barco tiene otra velocidad que se encuentra en aumento debido a la gravedad. Se cree que va a velocidad constante el barco, ya que si el barco acelera, Hipatía se caería.

**Análisis físico de la situación:** El saco de arena antes de caer va a la misma velocidad del barco, cuando el esclavo suelta el saco, la fuerza gravitacional lo atrae al centro de la Tierra, así la velocidad total del saco de arena es una suma vectorial de la velocidad horizontal que competía con el barco y la velocidad vertical que va en aumento. Hipatía va a velocidad constante en el barco, porque todos los objetos que van dentro de éste se comportan como si estuvieran en reposo.

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes desde la perspectiva de Hipatía

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 23$ )

Tabla 1: Velocidad del barco en la película Hipatía según los estudiantes

Velocidad	Indeciso/ Contradictorio	Constante por la acción de una Fuerza	Constante
Barco	(8,7%, $N = 2$ )	(8,7%, $N = 2$ )	(82,6%, $N = 19$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se muestra el número de estudiantes y la velocidad que le otorgan al barco

Tabla 2: Velocidad del saco en la película Hipatía según los estudiantes

Velocidad del saco	Reposo	Constante	Variable (aumenta)
Antes de la caída	13	7	-
Durante la caída	-	6	17
Después de la caída	9	3	1

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se muestra el número de estudiantes y la velocidad que le otorgan al saco

En consecuencia, y dada la categorización de las respuestas, encontramos que los estudiantes por medio de esta actividad:

- Establecen que la velocidad del saco de arena, antes de dejarse caer, es de reposo ( $N=13$ ). Esta es una “aproximación” de los estudiantes en cuanto a pensar en la indistinguibilidad entre el estado de reposo y de velocidad constante.
- Relacionan la velocidad del móvil y de los objetos dentro de éste, solo cuando la velocidad del móvil es constante (82,6%,  $N = 19$ ).

### Conclusiones de la sesión I

Fue sorprendente encontrar que algunos estudiantes ( $N = 7$ ) otorgan una velocidad constante al objeto que cae. Consideramos que el problema radica en querer expresar que los cambios de velocidad son constantes, más no que la velocidad lo sea, ya que en la socialización de la película “Ágora” la gran mayoría expresaba que el saco de arena se encuentra en caída libre por efecto de la gravedad y, por ende, el saco está acelerando.

Los estudiantes no descomponen la velocidad vectorialmente de los objetos dentro del móvil, lo que no permite relacionar las velocidades cuando existe una fuerza.

La existencia de la fuerza para mantener el barco a velocidad constante en algunos casos (8,7%,  $N = 2$ ) no permitió establecer una relación entre la velocidad del saco y la del barco; esto dificultó el inferir que algunos estudiantes piensan que el estado “natural” de los objetos siempre es en reposo.

### Sesión II – Líquidos en diferentes medios de transporte

Descripción de las situaciones:

- **Avión:** Se ubica un vaso lleno de gaseosa en una mesa nivelada durante un vuelo; la cámara muestra el comportamiento del vaso y luego la vista desde la ventana.
- **Metro:** Se ubica un vaso lleno de café en una mesa nivelada durante el desplazamiento; la cámara muestra el comportamiento del vaso y luego la vista desde la ventana.
- **Salón:** Se coloca un vaso de agua en una mesa nivelada dentro del salón a la vista de todos los estudiantes.

A los estudiantes se les presentan una serie de preguntas relativas a las observaciones que pueden describir según los videos.

### Cuestionario

1. ¿Cómo describiría el comportamiento del líquido en los diferentes casos de movimiento?
2. ¿Se puede llegar a establecer alguna diferencia o semejanza?
3. ¿Cómo caracterizaría la velocidad que lleva el móvil en cada caso?
4. ¿Qué sucedería con el líquido si el móvil frena o acelera rápidamente?

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

#### Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista

**Clave de respuesta:** En el caso del avión y del tren, se puede aproximar que el comportamiento de los líquidos es similar al del salón que se encuentra en reposo; ésto debido a la velocidad constante que llevan los móviles.

**Análisis físico de la situación:** Los líquidos al encontrarse en estado de velocidad constante se comportan como en estado de reposo, por ende, estos dos estados son indistinguibles entre sí.

## Respuestas

### Compendio de respuestas del movimiento de los líquidos en las situaciones presentadas

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 23$ )

Tabla 3: Velocidad y ubicación del vaso por parte de los estudiantes

Movimiento \ Ubicación vaso	Velocidad variable	Velocidad Constante	V. Constante o Reposo	Continua o Neutra	Reposo
Tren o metro	(36,7%, $N = 8$ )	(36,7%, $N = 8$ )	(9,1%, $N = 2$ )	(18,2%, $N = 4$ )	-
Avión	-	(18,2%, $N = 4$ )	(18,2%, $N = 4$ )	(18,2%, $N = 4$ )	(45,5%, $N = 10$ )
Mesa salón de clase	-	(9,1%, $N = 2$ )	(4,6%, $N = 1$ )	(9,1%, $N = 2$ )	(77,3%, $N = 17$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se ubica la posición del vaso y el número de estudiantes que le otorgan cierta velocidad

En consecuencia, y dada la categorización de las respuestas, encontramos que los estudiantes por medio de esta actividad:

- Separan las causas de movimiento de los líquidos, ya que, para el caso de la bebida carbonatada, el movimiento se debía al gas que ésta contenía, más no por el movimiento del avión
- Toman de estudio los objetos que se encuentran en su entorno para describir su estado de movimiento; por ejemplo, para el caso del tren, ésta se encuentra a una mayor velocidad que la del avión, debido a que el líquido presenta perturbaciones u ondas, que en el caso del líquido del avión no se presenta.

### Conclusión de la sesión II

Las causas más comunes que generaban las perturbaciones en los líquidos eran debido al medio en el que se encontraba el móvil o, al contacto que tenía el móvil con la superficie (nombran en ocasiones la fricción), así, para el caso del tren el contacto de sus ruedas era con los rieles, para el caso del avión al encontrarse volando, el único contacto que había era el del aire, por lo que en ocasiones era despreciable.

### Conclusiones finales de la Actividad 1: Los movimientos a velocidad lineal constante

Se dimensionó que, en todos los videos de esta actividad, los estudiantes identificaron el estado de movimiento como de velocidad constante, y su relación con el reposo estaba influenciada si visualizaban quién conducía el móvil. Por ejemplo, para el caso de los videos con los vasos llenos de líquidos o en la película "Ágora", fue común encontrar respuestas en la que los objetos dentro

del barco se encontraban en reposo, mientras que para el caso de “Los Cazadores de Mitos” (ver anexos A.6.1), al observar al conductor, las respuestas disminuían respecto a la relación reposo - velocidad constante. Esto es un resultado diferente al que encuentra Viennot (2003), donde en la relatividad Galileana se pone en duda debido a la presencia de algún mecanismo que mantenga cierta velocidad (p.69).

Los estudiantes manifiestan la dificultad de distinguir cuando un objeto se encuentra en movimiento a velocidad constante o en reposo, ya que cualquier objeto puede estar desplazándose o no (ver anexos A.6.1). Este modo de pensar nos permitió discutir la indistinguibilidad entre el reposo y la velocidad constante en las socializaciones de esta actividad.

Al referirse a las trayectorias en la cuales existía una fuerza y por lo tanto una aceleración, encontraron algunas dificultades al no relacionar los desplazamientos con el cuadrado del tiempo, y así obtener una trayectoria parabólica; por tal razón, los estudiantes en sus registros gráficos mostraban trayectorias diagonales, rectas horizontales y luego de un tiempo verticales, como por ejemplo, en la caída del saco de arena en la película “Ágora” vista por un observador fuera del estado de movimiento del barco.

La ayuda de los videos en las actividades experimentales fue fundamental, debido a que el fenómeno a querer mostrar se podía repetir en varias oportunidades. En la socialización se mostró la totalidad del video para que ellos, como estudiantes, pudiesen despejar cualquier tipo de duda al respecto.

## Capítulo 2

# Inercial o no inercial, el observador nos lo dirá

Nuestro estudio se ha centrado por el momento, en movimientos a velocidad constante, es decir, que no cambian ni la dirección, ni su magnitud, movimientos que se han denominado marcos de referencia. Para este capítulo, cambiaremos la magnitud de la velocidad (rapidez) en nuestros móviles, manteniendo la misma dirección, es decir, analizaremos un movimiento acelerado en línea recta, esto para visualizar ciertos efectos que nos ayudarán en el estudio de la rotación de la Tierra.

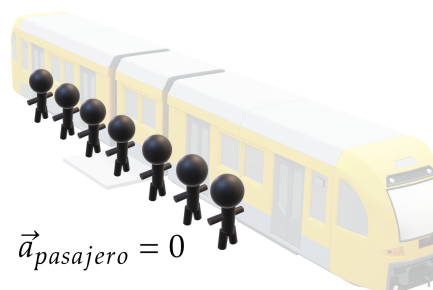
### 2.1. Análisis de la velocidad y aceleración para los móviles acelerados

En el capítulo 1 veíamos que cuando nos encontrábamos en un marco de referencia a velocidad constante ( $v$ ), podíamos caminar dentro del móvil con total seguridad de que no nos caeríamos, es decir, ubicábamos a una persona que se desplazaba en un bus que viajaba a velocidad constante. Continuando con este ejemplo, si suponemos que el conductor oprime el freno o el acelerador, nos llegamos a "sentir empujados" hacia la parte frontal del móvil cuando frena (donde comúnmente se encuentra el conductor) o la parte trasera cuando acelera. Caso contrario al del movimiento a velocidad constante, si en algún momento el móvil llegara a variar la velocidad ( $\Delta v$ ) empezaríamos a experimentar ciertas acciones, que se explicarán a continuación:

Haremos la consideración de que el sujeto dentro del autobús no puede apreciar lo que se encuentra fuera de éste, así, cuando el autobús viaja a velocidad constante ( $v_f = v_i \rightarrow a = 0$ ), el pasajero lo único que puede percibir es que todo se encuentra en reposo. Cuando el móvil es frenado o acelerado, el pasajero en relación con su entorno ha tenido un cambio de velocidad ( $\Delta v$ ),

es decir, ha pasado de una velocidad inicial igual a cero ( $\vec{v}_i = 0$ ) a una velocidad final diferente de cero ( $\vec{v}_f \neq 0$ ), es decir, hay una aceleración ( $\vec{a}$ )<sup>1</sup>.

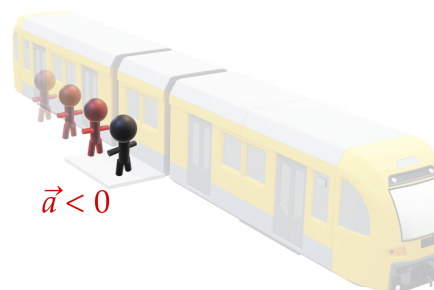
Si el autobús es visto por un observador que se encuentra fuera, lo que percibirá es una aceleración del móvil mientras que el pasajero permanecerá con la rapidez y la dirección constante que llevaba ( $\vec{a} = 0$ ), ver Figura: 8), solo al interactuar con otro objeto cambiará su velocidad; es a esto lo que se le denomina inercia (1era Ley de Newton), además, se puede concluir que el movimiento del autobús es independiente del pasajero.



**Figura 8:** Representación de un pasajero a velocidad constante

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Pasajero al lado en un tren en varios instantes de tiempo visto fuera del tren

Ahora, si estudiamos los vectores velocidad y aceleración del caso en el que se oprime el acelerador, obtenemos: el signo del cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) es el que nos denota el sentido de la aceleración ( $\vec{a}$ ), es decir, si el autobús pasó de una velocidad inicial ( $\vec{v}_i$ ) a una velocidad final ( $\vec{v}_f$ ), siendo la velocidad inicial menor que la velocidad final ( $\vec{v}_i < \vec{v}_f$ ), la aceleración va a ser mayor a cero ( $\vec{a} > 0$ ), mientras que el pasajero percibe una aceleración menor a cero ( $\vec{a} < 0$ ) (ver Figura: 9).



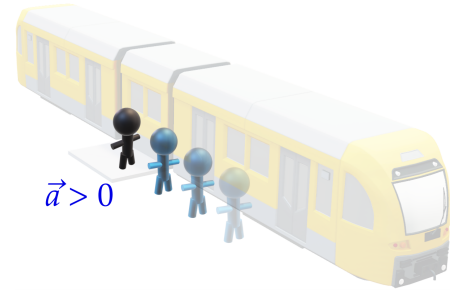
**Figura 9:** Representación de la aceleración positiva de un pasajero

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Pasajero al lado en un tren en varios instantes de tiempo visto desde dentro del tren

<sup>1</sup> Recordemos que la aceleración promedio se calcula como:  $\vec{a} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i}$



Caso contrario, si la velocidad inicial es mayor que la velocidad final ( $\vec{v}_i > \vec{v}_f$ ), la aceleración es menor a cero ( $\vec{a} < 0$ ); es a lo que denominamos "frenar o desacelerar", por lo que el pasajero en este caso percibe una aceleración mayor a cero ( $\vec{a} > 0$ ) (ver Figura: 10). En conclusión, podemos afirmar que la aceleración que percibe el pasajero, siempre irá en sentido contrario a la que el autobús realiza (ver Tabla:4 )



**Figura 10:** Representación de la aceleración negativa de un pasajero

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Pasajero al lado en un tren en varios instantes de tiempo visto desde dentro del tren

Tabla 4: Recopilación de la aceleración según dos observadores distintos

		Afuera	Dentro
Acelera ( $v_f > v_i$ )	Sujeto	$a = 0$	$a < 0$
	Autobús	$a > 0$	$a = 0$
Frena ( $v_f < v_i$ )	Sujeto	$a = 0$	$a > 0$
	Autobús	$a < 0$	$a = 0$

**Fuente:** Propia

**Nota:** Se establece la situación de cambio de aceleración, el objeto y el lugar de observación

En cuanto a la magnitud de la aceleración ( $\vec{a}$ ), ésta no sólo depende de la diferencia de la velocidad final y la velocidad inicial ( $\vec{v}_f - \vec{v}_i$ ), sino también del lapso en que se realice ( $\Delta t$ ). Así, pasar de  $10m/s$  a  $20m/s$  en un tiempo de  $\Delta t = 1s$ , es igual, en términos de la aceleración a pasar de  $1m/s$  a  $2m/s$  en el tiempo  $\Delta t = 0,1s$ . Es decir, la aceleración ( $\vec{a}$ ) depende del cambio de velocidad ( $\Delta \vec{v}$ ) en un instante de tiempo ( $\Delta t$ ).

Es de notar que al intentar cambiar de velocidad se necesita una acción, por ejemplo, cuando queremos acelerar un cuerpo que se encuentra en reposo, tenemos que realizar un contacto para que éste se acelere <sup>2</sup>; la dirección en la cual realicemos este contacto será la misma dirección que tome el cuerpo; entre mayor masa tenga el cuerpo, más difícil será acelerarlo. La causa de hacerlo acelerar, Newton y García (2011) la denomina fuerza (p.114)<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>En física, las fuerzas se pueden clasificar en aquellas que relacionadas con la idea de campo y las de contacto

<sup>3</sup>Aunque Newton realmente establece que los cambios de movimiento  $\vec{F} = \frac{(\Delta \vec{P})}{\Delta t} = \frac{\Delta m \vec{V}}{\Delta t}$  es a lo que él denomina fuerza (Newton y García (2011, p.114)), pero para efectos prácticos, donde no existe pérdida de masa como los casos tratados en este trabajo, podemos establecer que  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Dicho esto, ahora los marcos de referencia de los cuales se había hablado (velocidad lineal constante) reciben una denominación adicional que es el de la inercia, ya que tienden a permanecer en un estado de inactividad, es decir, marcos de referencia inerciales. Vale aclarar que aquellos marcos de referencia que no se comporten como si estuvieran en reposo, se llamarán marcos de referencia no inerciales como se verá más adelante.

Este modo de ubicar los dos observadores se realizará durante todo este escrito: uno ubicado en un marco de referencia inercial que siempre se encontrará por fuera del móvil, y otro, ubicado dentro del móvil, que definirá su estado de movimiento mediante el comportamiento de los objetos que se encuentren a su alrededor, estableciendo con esto si se encuentra en un marco de referencia inercial o no inercial.

Es importante explicitar las definiciones de lo que se denominan axiomas o leyes del movimiento de Newton para este trabajo. Tipler (1985) nos muestra que dichas leyes han sufrido cambios de redacción desde su formulación (p.96), pero la esencia ha sido siempre la misma. **Leyes de Newton**

1. Un cuerpo permanece en su estado inicial de reposo o movimiento a velocidad uniforme, a no ser que se ejerza una fuerza de desequilibrio externa.
2. La aceleración de un cuerpo es inversamente proporcional a su masa y directamente proporcional a la fuerza externa resultante que actúa sobre él.
3. Las fuerzas se presentan siempre por parejas. Si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre un cuerpo B, el cuerpo B ejercerá una fuerza igual pero opuesta sobre el cuerpo A.

La tercera ley de Newton es de suma importancia para el estudio de la rotación de la Tierra, ya que se puede concluir, que la existencia de una fuerza necesita de la interacción **de dos cuerpos** (Como se muestra en Newton y García (2011, p.115)).

## 2.2. Los marcos de referencia no inerciales y la fuerza

Ahora, comparemos aquello que se ha dicho acerca de la fuerza dentro del móvil que frena o acelera, y recordemos que el observador que se encuentra dentro del móvil no tiene contacto con el exterior, es decir, no sabe si se encuentra en movimiento o no. Este observador puede afirmar que los objetos que están libres dentro del móvil, como por ejemplo el pasajero, un libro, una botella de agua, etc., cambian su estado de reposo, siempre que tomemos de referencia lo que hace parte del móvil (por ejemplo, las sillas, el suelo, etc), y su aceleración no es ejercida por el contacto con algún objeto; además, al establecer que ha obtenido un cambio de velocidad ( $\Delta\vec{v} \neq 0$ ) dentro del móvil, se podría atribuir a la existencia de una fuerza.

Por otra parte, un observador en un marco de referencia inercial que está fuera de cualquier acción del móvil podrá registrar que, el sujeto que se encuentra dentro permanecerá con la misma velocidad que llevaba antes de que el móvil cambie de velocidad ( $\Delta\vec{v}$ ), es decir, en su estado de inercia (ver Figura: 8).

En conclusión, la fuerza sólo existe para el sujeto que se encuentra dentro del móvil, sin embargo, siendo rigurosos, esta fuerza no cumple con la Tercera ley de Newton; por ello, en los libros de texto de física se le ha denominado pseudofuerza o fuerza ficticia, ya que el prefijo "pseudo" significa algo que parecer ser, pero no es según la RAE (2015). El nombre de fuerza ficticia se puede malinterpretar como en Ripa (1996), donde se establece que la fuerza ficticia si existe, porque se perciben efectos y por lo tanto es una fuerza real; al no tener una fuerza igual y opuesta, nosotros queremos resaltar que las fuerzas ficticias o pseudo fuerzas son efectos que aparecen como resultado de los movimientos que se dan al interior de los marcos de referencia no inerciales y no como resultado del contacto entre objetos, como lo veremos en los capítulos 2, 3 y 4.

## **2.3. Diseño de actividades sobre los marcos de referencia no inerciales en el aula**

En relación con el análisis presentado anteriormente, hemos propuesto trabajar con los estudiantes los experimentos mentales que hemos descrito durante este capítulo, bajo una nueva condición: un cambio en la rapidez, pero, no en la dirección de los móviles. Esta condición es mucho más común para nuestros estudiantes, ya que utilizan distintos medios de transporte y evidencian diversos efectos.

Nosotros proponemos considerar dos observadores, uno en reposo y otro dentro de un móvil que se mueve en línea recta, y pretendemos que los estudiantes realicen un análisis de la velocidad, la rapidez, la aceleración y la fuerza, y que describan los efectos que se pueden percibir.

Hemos utilizado en esta ocasión un lenguaje más coloquial, como lo es "frenar bruscamente" u "oprimir el freno rápidamente" para referirnos a grandes aceleraciones que tengan direcciones positivas o negativas, para evitar influencias notables en la fuerza de rozamiento.

### **2.3.1. Actividad II: Los cambios de movimiento en marcos de referencia no inerciales**

Esta actividad fue diseñada para un tiempo de 1 hora y 40 minutos. Y tiene como objetivos:

- Establecer la independencia de los movimientos en situaciones a rapidez variable.
- Describir con variables físicas el comportamiento de los cuerpos, cuando existe un cambio

en la rapidez de los móviles, según dos observadores (uno dentro del móvil y otro fuera de éste).

Suponemos dos observadores (David y Aurora): *Aurora estará ubicada en la calle, y David de pie dentro de un Transmilenio en movimiento con velocidad constante. A los estudiantes se les presentan una serie de preguntas relativas a las observaciones que pueden describir David y Aurora desde sus marcos de referencia. Por ejemplo: Si el conductor del Transmilenio oprime el freno rápidamente, según la perspectiva de David ¿qué puede suceder?*

### **Cuestionario**

- (a) ¿En qué dirección se moverá David si no se encuentra bien sujeto dentro del Transmilenio? ¿Seguirá alguna trayectoria particular con respecto al conductor?
- (b) ¿Qué quiere decir frenar bruscamente en términos de la aceleración?
- (c) Si usted fuera David, y está dentro del Transmilenio, ¿Cuál creería que es la causa de ese movimiento? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (d) Ahora, suponga que usted es Aurora y está ubicada en la calle observando cuando pasa el Transmilenio, ¿Cómo describiría, la situación en términos de la velocidad? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (e) ¿Qué diferencia encuentra entre las velocidades que perciben Aurora y David

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

#### **Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista para Aurora**

**Clave de respuesta: d)** Para Aurora, esto se debe a que el conductor ha frenado y el móvil ha desacelerado, por lo cual, David al no encontrarse bien agarrado, sigue con la misma velocidad que llevaba el móvil, ya que David no hace parte del móvil.

**Análisis físico de la situación: d)** Desde el punto de vista de Aurora, David va a velocidad constante con el Transmilenio y éste el que posteriormente cambia de velocidad, es decir hay una aceleración, por lo cual David al no ser parte del móvil, seguirá con la misma velocidad en la que se encontraba, es decir, sigue en su estado de inercia.

**Nota:** El lector podrá encontrar el respectivo análisis de esta situación desde la otra perspectiva en los anexos al final del trabajo. Aunque las conclusiones sí se realizan teniendo en cuenta toda la actividad.

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes desde la perspectiva de Aurora

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 17$ )

Tabla 5: Respuestas de los estudiantes desde la perspectiva de Aurora

Respuestas	
Determinan que no hay diferencia entre David y el móvil.	(5,9%, $N = 1$ )
Asignan el empuje a una fuerza que es propia de David, que lo acompaña hasta que se detiene	(23,5%, $N = 4$ )
Establecen la mirada de Aurora y David, pero no aclara desde cuál de ellas se asignan las variables.	(29,4%, $N = 5$ )
Determinan que los cuerpos son independientes y atribuyen de forma correcta las variables (velocidad y aceleración)	(41,2%, $N = 7$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

En consecuencia, y dada la categorización de las respuestas, encontramos que los estudiantes por medio de esta actividad:

- Demuestran, en un solo caso (5,9%,  $N = 1$ ), que no existe diferencia por parte de los dos observadores con lo que sucede con un objeto dentro del bus después de que el conductor frena, lo que dificulta comprender lo que es un marco de referencia inercial y no inercial.
- Explican, desde los registros gráficos realizados, que el pasajero sigue con la posición que éste llevaba y afirman que éste es debido a que obedece la ley de la inercia, después de que el conductor ha frenado (ver anexos A.6.2).
- Comprenden que la velocidad del pasajero y la del móvil son independientes cuando alguno de ellos dos acelera (41,2%,  $N = 7$ ).

### Conclusión de la actividad II: Los cambios de movimiento en marcos de referencia no inerciales

Los estudiantes tienen claro que para empujar o tirar de un objeto hay que hacer fuerza, y la relacionan intuitivamente con el esfuerzo físico que hay que hacer para mover un determinado objeto. Por tanto, ellos definen la fuerza a partir de este concepto intuitivo, como una medida de la interacción entre dos cuerpos inicialmente, en donde la fuerza es acumulativa y acompañará al objeto hasta que éste llegue a su estado natural de reposo.

Para superar esta dificultad, en cuanto al concepto de fuerza, durante la socialización preguntábamos que entendían por este concepto, a lo cual ellos nombraron las Leyes de Newton. En relación con lo anterior, tratamos de desglosar cada una de éstas relacionándolas con ejemplos que se podían reproducir en el aula, como mover una mesa, empujar un estudiante, acelerar un objeto sin contacto físico, entre otros.

## Capítulo 3

# Curvas y glorietas, ¿Qué nos obliga a girar?

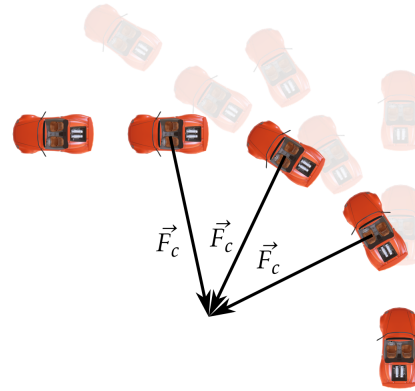
En el capítulo 2 (Movimiento Rectilíneo Acelerado), se realizó el análisis de los movimientos cuando se cambió la rapidez en los móviles. Para este capítulo y de aquí en adelante, realizaremos el estudio en movimientos que cambian de dirección, pero mantienen su rapidez constante como ocurre en el movimiento circular uniforme, para poder visualizar nuevos efectos que experimenta un observador que se encuentra dentro de un móvil que está en rotación (**marco de referencia no inercial**) y compararlo con los efectos que visualiza un observador en reposo que se encuentra fuera de este móvil (**marco de referencia inercial**).

En este caso, si nos encontramos en un móvil que va a velocidad constante, todos los objetos se comportan como si estuvieran en reposo. Si llegásemos en algún momento a tomar alguna curva manteniendo la rapidez constante, los objetos dejarían de comportarse de la misma manera, de hecho, nosotros también nos sentiríamos inestables respecto a nuestro estado anterior de reposo, y sólo hasta que el móvil finalice la curva, y mantenga su velocidad constante, nos volveríamos a sentir en reposo. Como la única condición que hemos cambiado ha sido la dirección, ésta será la característica que denotará la inestabilidad de los objetos dentro del móvil.

Al igual que en el capítulo 2, el observador que se encuentra inmerso en el movimiento no tiene control del móvil ni contacto con el exterior, por lo que no podemos saber si está tomando una curva o no. Dentro del móvil, encontramos que los objetos que no hacen parte de éste empiezan a acelerar, sin que exista algún cuerpo que ejerza una fuerza de contacto. Por tal razón, se incumple con la tercera ley de Newton del movimiento, pero, no por eso podemos negar que los cuerpos se aceleran, así que nosotros como observadores dentro del móvil deducimos que estamos en un marco de referencia no inercial y, por lo tanto, las aceleraciones se las atribuimos a una

pseudofuerza.

Por el contrario, un observador que se encuentra en reposo, fuera del estado de movimiento del móvil (marco de referencia inercial), observa que los cuerpos dentro del móvil tienden a seguir una trayectoria en línea recta y con la misma rapidez, en vez de seguir una curva, es decir, que seguirán en su estado de inercia. Mientras que para el móvil debe existir una fuerza que lo haga cambiar de dirección (ver vector Figura: 11)).



**Figura 11:** Representación de la fuerza en un móvil que cambia de dirección y la tendencia a seguir en línea recta

**Fuente:** Adaptada de Microsoft

**Nota:** Representación del vector fuerza, cuando se toma una curva por un carro en varios instantes de tiempo

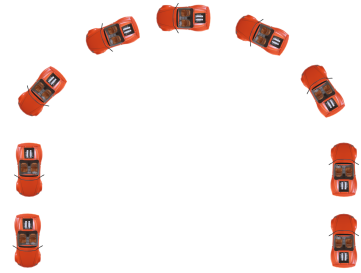
### 3.1. Análisis de la velocidad y aceleración para establecer la rotación como marco de referencia no inercial

Creemos que es pertinente preguntarnos: ¿De qué variables depende la aceleración de los objetos dentro del móvil en una curva?

Para responder esta pregunta, recurriremos a la experiencia que tenemos en los medios de transporte. Si vamos en un móvil y éste toma una curva suave o poco pronunciada a una rapidez inicial ( $v_0$ ), la aceleración ( $\vec{a}$ ) de los objetos dentro del móvil será poco notoria. Por el contrario, si la curva es demasiado pronunciada, el efecto de inestabilidad será más notorio.



Por ejemplo: para un móvil con una rapidez inicial ( $v_0$ ) que toma una curva en "U" y realiza un cambio de dirección de  $180^\circ$  (ver Figura: 12), ésto producirá una mayor aceleración en los objetos que se encuentran dentro del móvil, en comparación con la aceleración que se genera en una curva que cambia la dirección en  $10^\circ$  (ver Figura: 13). De acuerdo con lo anterior, podemos decir que, para un móvil que viaja a una rapidez constante, entre mayor sea el grado del cambio de dirección mayor será la aceleración de los objetos dentro de éste.



**Figura 12:** Cambio de dirección de  $180^\circ$  de un móvil (Curva en "U")

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Representación de una curva en "U" por un carro, en varios instantes de tiempo

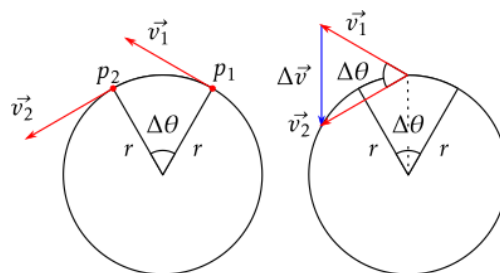


**Figura 13:** Cambio de dirección de  $10^\circ$  de un móvil

**Fuente:** Adaptada de Microsoft  
**Nota:** Representación de un carro en varios instantes de tiempo, en una curva de  $10^\circ$

Existe un rango mayor a  $0^\circ$  y menor de  $360^\circ$  grados en que un objeto pueda cambiar de dirección. Tomaremos el caso del movimiento circular que es el que nos interesa, en donde podemos establecer que el grado en el cambio de dirección es constante en todos los puntos de la circunferencia descrita, y a su vez, llegar a deducir que para este movimiento existe una relación entre los cambios de dirección, el radio y la rapidez lineal. A continuación, se deducirá porqué:

Si observamos la Figura 14, se podrá observar la representación de los vectores velocidad ( $v_1$  y  $v_2$ ) en dos puntos distintos. De no existir una fuerza, el objeto seguiría en línea recta tangente a la trayectoria circular (1era ley de Newton). También notaremos que se pueden establecer dos triángulos (ver Figura: 15) el primer triángulo será el de las velocidades, donde el cambio en la velocidad ( $\Delta v$ ) apunta siempre hacia el centro y, el segundo triángulo será el de las distancias.



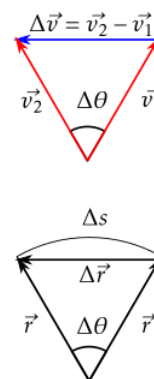
**Figura 14:** Analisis de los vectores en un movimiento circular

**Fuente:** Adaptado de [www.sc.edu/es/sbweb/fisica/cinematica/circular3/circular3.htm](http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/cinematica/circular3/circular3.htm)

**Nota:** Representación del vector velocidad en dos puntos distintos

Es así en donde podemos plantear la semejanza de los triángulos de las velocidades y de los radios: La semejanza  $\Delta V/v = \Delta r/r$ ; despejando  $\Delta v$  y dividiendo por  $\Delta t$  tenemos que:  $\Delta v/\Delta t = (v \Delta r)/(r \Delta t)$ , donde  $\Delta r = \Delta s$  para cambios infinitesimales y ya que  $a = \Delta v/\Delta t$ , se puede observar que el vector cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) está dirigido siempre hacia el centro (ver Figura:14), y es por esto que se denominada aceleración centrípeta, y al reemplazar  $\Delta r = \Delta s$  en  $(v \Delta r)/(r \Delta t)$  tenemos que la aceleración estará dada por:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (3.1)$$



**Figura 15:** Triángulo dado por los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{r}$  en un MCU

**Fuente:** Adaptado de [www.sc.edu/es/sbweb/fisica/cinematica/circular3/circular3.htm](http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/cinematica/circular3/circular3.htm)

**Nota:** Semejanza de los triángulos velocidad y radio

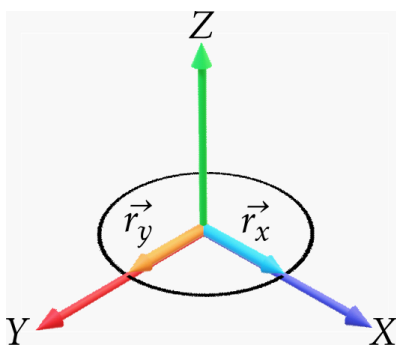
De esta manera, hemos mostrado la relación entre el radio, la velocidad y la aceleración para un movimiento circular.

### 3.2. La velocidad angular: Una nueva variable para describir el movimiento circular

Podemos establecer una magnitud para los cambios constantes del ángulo ( $\Delta\theta$ ) en un tiempo determinado ( $\Delta t$ ), cuyo vector permanezca constante: esta magnitud será la velocidad angular ( $\omega$ ) y estará dada por los cambios infinitesimales de  $\Delta\theta/\Delta t$ . Podemos relacionarla con la rapidez, midiendo el recorrido por unidad de tiempo  $v = \Delta S/\Delta t$ , y sustituyendo la longitud de arco,  $s = r\theta$ , obteniendo  $\Delta(r\theta)/\Delta t$ , el radio  $r$  al ser constante para un movimiento circular, hace que la expresión final sea  $v = r \Delta\theta/\Delta t$  o también:

$$v = r\omega \quad (3.2)$$

Ahora, para establecer la dirección de la velocidad angular realizaremos el siguiente análisis, recordando que para representar cualquier punto en el espacio es suficiente con establecer tres ejes coordenados, comúnmente denominados  $(x, y, z)$ ; ésto podemos utilizarlo para ubicar el móvil en dos puntos diferentes. Por simplicidad, podemos ubicar el centro de la circunferencia descrita por el móvil en la coordenada  $(x = 0, y = 0, z = 0)$ , en donde la distancia del centro al móvil en todos los puntos es siempre la misma.



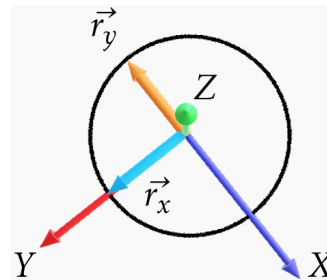
**Figura 16:** Representación de un movimiento circular en el eje coordenado  $(x,y,z)$

**Fuente:** Propia

**Nota:** Vectores radiales en un movimiento circular dentro de un plano cartesiano

Para este caso, estará dada por el vector radial ( $\vec{r}$ ), que varía en dirección, pero no en magnitud (ver Figura: 16). Entonces, ubicaremos dos vectores radiales en dos de los ejes coordenados  $x$  y  $y$  por simplicidad, los llamaremos  $\vec{r}_x$  y  $\vec{r}_y$  respectivamente. Podemos realizar infinitos giros de esos vectores, pero, para describir una circunferencia en el plano  $(x, y)$  podemos realizar dos giros, uno en el que el vector  $\vec{r}_x$  se dirigirá hacia  $\vec{r}_y$  o, el vector  $\vec{r}_y$  se dirigirá hacia  $\vec{r}_x$ , y en donde estos giros siempre describirán el camino más corto.

Ahora, si vemos el plano desde la parte superior y fijamos el ángulo entre los vectores  $\vec{r}_x$  y  $\vec{r}_y$ , y giramos los vectores  $\vec{r}_x$  hasta que llegue a la posición de  $\vec{r}_y$  recorriendo el mínimo de distancia, se asemejará el giro al de las manecillas del reloj (ver Figura: 17), en cambio, si giramos los vector  $\vec{r}_y$  hasta  $\vec{r}_x$  será similar al sentido contrario de las manecillas del reloj (ver Figura: 18). Al realizar cualquiera de estos dos giros, notamos que un vector ubicado a lo largo del eje z no varía, y podemos otorgarle a la velocidad angular un vector en este eje.

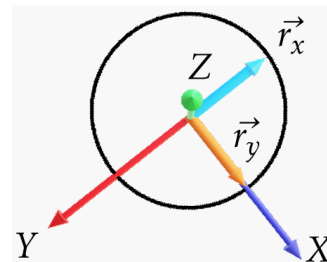


**Figura 17:** Giro de los vectores  $\vec{r}_x$  y  $\vec{r}_y$  a favor de las manecillas del reloj

**Fuente:** Propia

**Nota:** Vectores radiales en un movimiento circular dentro de un plano cartesiano, vista desde la parte superior

Ya que los radio vectores siempre se encuentran en el mismo plano  $(x, y)$ , al igual que sus velocidades tangenciales respectivas (ver Figura: 14), podemos denominar también un plano como el de rotación. El vector que se ubica en el sentido del eje z lo podemos establecer en dirección  $z+$  o  $z-$ . Utilizaremos la convención Dextrógiro o regla de la mano derecha, donde el giro en contra de las manecillas del reloj se toma como positivo y, por lo tanto, el vector velocidad angular ( $\vec{\omega}$ ) se ubique en dirección  $+z$ . Por lo que se ha dicho anteriormente, la velocidad angular será el vector que nos dé información del sentido del giro del movimiento.



**Figura 18:** Giro de los vectores  $\vec{r}_x$  y  $\vec{r}_y$  en contra de las manecillas del reloj

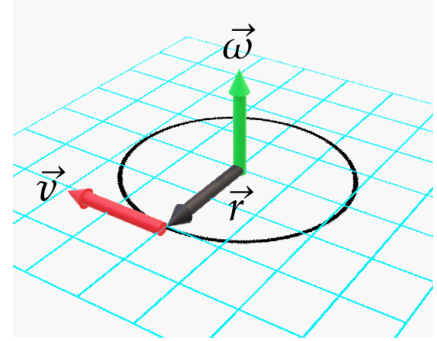
**Fuente:** Propia

**Nota:** Vectores radiales en un movimiento circular dentro de un plano cartesiano, vista desde la parte superior

Por lo que se ha dicho anteriormente, la velocidad angular será el vector que nos dé información del sentido del giro del movimiento<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Se podía seleccionar la relación contraria (Levógiro), es decir, para el sentido de giro a favor de las manecillas relacionarlo con algún vector en dirección  $z+$ .

Ahora, podemos establecer la relación matemática del producto cruz o vectorial, que se da entre dos vectores y da como resultado un vector perpendicular a los que se multiplican. Para mantener la relación numérica ( $v = r * \omega$ ) (ecuación 3.2), de unidades y de dirección entre las variables que hemos mostrado para describir el movimiento circular, el producto vectorial se daría entre el radio vector y la velocidad angular ( $\vec{v} = \vec{r} \times \vec{\omega}$ ); ésto es posible, ya que estos vectores son siempre perpendiculares entre sí (ver Figura: 19).



**Figura 19:** Representación de los vectores  $\vec{v}$ ,  $\vec{\omega}$  y  $\vec{r}$  en un movimiento circular

**Fuente:** Propia

**Nota:** Vector radio, velocidad angular y velocidad tangencial en un movimiento circular dentro de un plano cartesiano

Retomando el tema de la aceleración de los objetos dentro del móvil, debido a la aceleración centrípeta cuando se toma una curva, podemos realizar de forma cuantitativa el análisis de tres casos específicos, en donde haremos la comparación entre dos móviles: El móvil 1 describirá una circunferencia con radio  $r_1$  y rapidez  $v_1$ , mientras que para el móvil 2, el radio de la circunferencia será  $r_2$  y su rapidez  $v_2$ :

1. Cuando dos móviles describen circunferencias distintas ( $r_1 \neq r_2$ ), pero ambos se mueven a la misma rapidez ( $v_1 = v_2 = v$ )

Si calculamos la aceleración centrípeta para el móvil 1, tenemos:  $a_{c1} = v_1^2/r_1 = v^2/r_1$ , mientras que para el móvil 2, su aceleración centrípeta es  $a_{c2} = v_2^2/r_2 = v^2/r_2$ . Así, los objetos dentro del móvil se acelerarán mucho más cuando describan una menor circunferencia, ya que el radio, en el caso de la aceleración centrípeta, se encuentra en el denominador. Así lo habíamos descrito de manera cualitativa para curvas de  $180^\circ$  y de  $10^\circ$ .

2. Cuando dos móviles describen dos circunferencias distintas ( $r_1 \neq r_2$ ) y sus aceleraciones centrípetas son iguales

Ya que se quiere percibir los mismos efectos debido la aceleración centrípeta ( $a_c = v^2/r$ ), ésta tiene que ser igual en ambos casos, por lo tanto, el radio y la rapidez tienen que ser diferentes. Si el radio de la circunferencia del móvil 2 va a ser mayor que el radio del móvil 1 ( $r_2 > r_1$ ), éste tendrá que ir con mayor rapidez que el primer móvil 1 ( $v_2 > v_1$ ) para modificar en el mismo tiempo el cambio de dirección. Por ejemplo, si los radios de la circunferencia

tienen la relación  $100r_1 = r_2$ , la rapidez del segundo móvil  $v_2$  tiene que ser 10 veces mayor ( $v_2 = 10v_1$ ) para que tengan las mismas aceleraciones centrípetas.

3. Cuando dos móviles describen dos circunferencias distintas ( $r_1 \neq r_2$ ), pero con igual velocidad angular ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ )

Este caso se puede asemejar a la velocidad angular de la Tierra, por tal razón, decidimos tomar para el móvil 1 el radio de la Tierra ( $r_1 = 6371km = 6371000m$ )<sup>2</sup> al igual que su velocidad angular ( $\omega_1 = 2 * \pi / 86400s \approx 0,000072722rad/s$ )<sup>3</sup>, que será la misma para el móvil 2 ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ). Como los radios son distintos, para el móvil 2 tomaremos un radio menor al de la Tierra ( $r_2 < r_1$ ); por ejemplo, ( $r_2 = 100km = 100000m$ ). Podemos calcular la aceleración centrípeta con la misma velocidad angular, si sustituimos la ecuación  $v = r\omega$  en la ecuación  $a_c = v^2/r$ , por lo que la aceleración centrípeta puede escribirse de la forma  $a_c = \omega^2 * r$ . Así, para el móvil 1 la aceleración centrípeta es  $a_{c1} = \omega^2 r_1 \approx 0,03369301m/s^2$ , mientras que para el móvil 2, la aceleración centrípeta es  $a_{c2} = \omega^2 r_2 = 0,00052884m/s^2$ . Vemos que, en ambos casos, la aceleración centrípeta es menor a  $1m/s^2$ , esto mostraría que a pesar de que la rapidez que lleva una persona en la superficie es de gran valor ( $v = r\omega = (2 * \pi / 86400s) * 6371000m = 463,31m/s$ ), su velocidad angular es mínima, en consecuencia, la aceleración centrípeta también lo es y la aceleración de los objetos dentro del móvil será casi imperceptible.

En este último ejemplo hemos mostrado que a pesar de que la Tierra posee una gran rapidez y radio, su velocidad angular es pequeña; en consecuencia, también lo es la aceleración centrípeta, y por esto los efectos debido a los cambios de dirección son casi imperceptibles. Aun así, no percibimos que los objetos que utilizamos en la cotidianidad se aceleren debido a la rotación, y esto es debido a que en los ejemplos que hemos tomado no consideramos la fuerza de fricción, por lo tanto, la aceleración centrípeta tendría que ser de tal magnitud que pueda existir una pseudofuerza mayor a la fuerza de fricción de los objetos en la Tierra, para que estos se aceleren.

Lo anterior responde la pregunta: ¿Por qué no sentimos los efectos de una Tierra rotando si nos encontramos inmersos dentro de su movimiento? Existen experimentos de baja fricción que nos dan cuenta de esta rotación, los cuales estudiaremos en el siguiente capítulo.

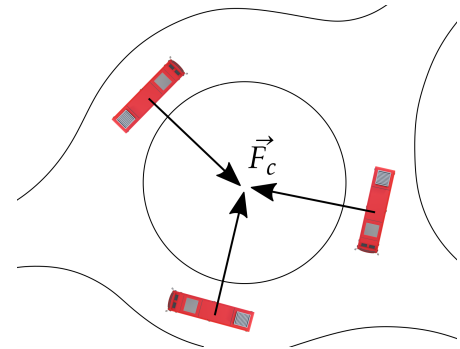
Cabe aclarar que habitualmente no tenemos demasiadas experiencias en movimientos totalmente circulares<sup>4</sup>, pero, la que tenemos en los medios de transporte en los cambios de dirección al tomar una curva es suficiente para nosotros, ya que podemos aproximar cualquier curva a una fracción del arco de una circunferencia.

<sup>2</sup>Radio medio de la Tierra, se puede calcular aproximadamente por el método de Eratóstenes

<sup>3</sup> $2 * \pi$  es un giro completo y los 86400s son equivalentes a las 24 horas

<sup>4</sup>Excepto la rotación de la Tierra, pero como hemos visto, sus efectos son casi imperceptibles

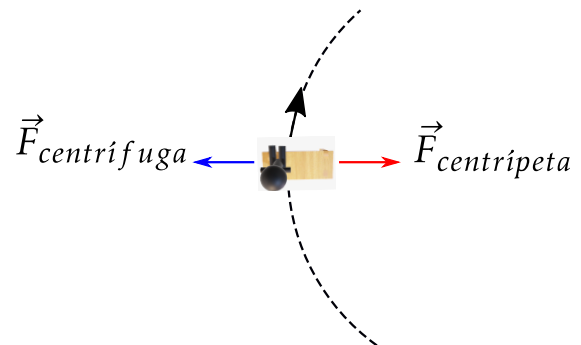
Como se dijo anteriormente, existe una fuerza que se denomina centrípeta responsable en el cambio de dirección del móvil (ecuación 3.1)(ver Figura: 20), sin embargo, los cuerpos dentro del móvil tenderán a seguir en línea recta con la misma velocidad que es tangencial a la curva (de acuerdo con su inercia lineal); es necesario aclarar que seguir en su estado de inercia no significa que exista una fuerza que se mantenga actuando a lo largo de la trayectoria, ya que no hay un aumento en la velocidad ni cambios de dirección.



**Figura 20:** Fuerza centrípeta en un movimiento totalmente circular

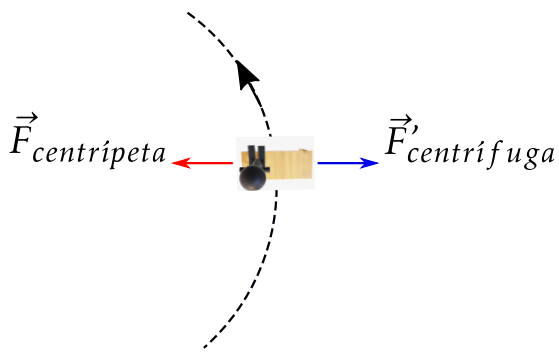
**Fuente:** Adaptado de Microsoft  
**Nota:** Representación de la fuerza centrípeta en un movimiento circular

Sólo nos falta hacer referencia a la dirección de la aceleración que sufren los objetos dentro del móvil, o lo que es equivalente a la sensación que tiene el observador de sentirse empujado. Si el móvil toma una curva hacia la derecha, es decir, si la aceleración centrípeta va hacia la derecha, nos sentiremos empujados hacia la izquierda (ver Figura: 21).



**Figura 21:** Dirección de la pseudofuerza centrífuga para un movimiento con velocidad angular negativa

**Fuente:** Propia  
**Nota:** Dirección de las fuerza y pseudofuerza vista desde la parte superior



**Figura 22:** Dirección de la pseudofuerza centrífuga para un movimiento con velocidad angular positiva

*Fuente:* Propia

*Nota:* Dirección de las fuerza y pseudofuerza vista desde la parte superior

Si, por el contrario, la aceleración centrípeta va hacia la izquierda, la sensación será la de sentirnos empujados hacia la derecha (ver Figura: 22). Por lo tanto, la dirección de la pseudofuerza que tendrá que establecer el observador dentro del móvil, será en dirección contraria a la de la fuerza centrípeta.

Así, la dirección de la pseudofuerza que tendrá que establecer el observador dentro del móvil, será en dirección contraria a la de la fuerza centrípeta.

En este capítulo hemos analizado los efectos que sufren los objetos que se encuentran dentro de los móviles cuando hay cambios de dirección, donde estos se aceleran en sentido contrario a la aceleración centrípeta del móvil. Por otro lado, en el capítulo anterior analizamos los efectos que acontecen a los cambios de rapidez y como los objetos se aceleran en sentido contrario al de la aceleración.

Si reunimos estas dos experiencias, podemos deducir que, al tomar una curva hacia la derecha con aumento de rapidez, dentro del móvil nos iríamos hacia la izquierda por los cambios de dirección, y a su vez, hacia atrás por la aceleración. Por otra parte, si se toma una curva hacia la izquierda con disminución de la rapidez, nos iríamos hacia la derecha y a su vez hacia adelante, es decir, resultaría una suma vectorial de los efectos por cambio de rapidez y por cambios de dirección.

La experiencia dentro de los medios de transporte nos ha servido para mostrar todo el estudio de las pseudofuerzas y, además, de realizar una clasificación de los marcos de referencia: los inerciales (reposo y velocidad constante) donde se cumplen las leyes de Newton, y los no inerciales (acelerados) donde no se cumplen, y en los cuales el observador ha tenido que atribuir a las aceleraciones una pseudofuerza.



### 3.3. Diseño de actividades sobre los marcos de referencia en rotación en el aula

En relación con el análisis presentado anteriormente, hemos propuesto trabajar con los estudiantes los experimentos mentales descritos durante este capítulo, bajo una nueva condición: un cambio en la dirección de los móviles, pero, no en la rapidez. Esta condición no es muy común para nuestros estudiantes, ya que permanecer por un tiempo muy prolongado dando vueltas en una rotonda o glorieta tiene poco sentido práctico en la vida cotidiana, pero creemos que la experiencia que ellos han tenido en los medios de transporte, cuando estos toman una curva, es más que suficiente para describir los efectos que se perciben en el movimiento circular.

Nosotros proponemos considerar dos observadores, uno en reposo y otro dentro de un móvil que se mueve a una gran rapidez constante dentro de una glorieta, y pretendemos que los estudiantes describan, por medio del análisis de la aceleración y la rapidez, los efectos de encontrarse inmerso en ese movimiento.

#### 3.3.1. La actividad III: Los cambios de movimiento según marcos de referencia en rotación

. Esta actividad fue diseñada para un tiempo de 1 hora y 40 minutos y tiene como objetivo:

- Identificar que una pseudo fuerza es una fuerza a la que el observador recurre en un sistema de referencia en rotación (no inercial), cuando describe el movimiento de los objetos

*Suponemos dos observadores (David y Aurora). Aurora está ubicada en la calle, y David está sentado y durmiendo dentro de un Transmilenio que se mueve a una gran velocidad constante dentro de una glorieta. A los estudiantes se les presentan una serie de preguntas relativas a las observaciones que pueden describir David y Aurora desde sus marcos de referencia.*

*Por ejemplo: Cuando el pasajero se despierta debido a que se siente “empujado”, según la perspectiva de David ¿Cuál es la causa?*

#### Cuestionario

- (a) Si usted fuera David y se despierta porque se siente empujado ¿Cuál considera que es la causa de esta sensación? Y ¿Hacia qué dirección es empujado? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento, indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (b) Si usted fuera Aurora ¿Cuál considera que es la causa del cambio de dirección de David?

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

### Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista para David

**Clave de respuesta: a)** Cuando el móvil (Transmilenio) describa la curva en la glorieta, David debe tener la sensación de salir disparado del móvil. Ya que nadie lo está empujando, esto se le puede atribuir a una pseudofuerza.

**Análisis físico de la situación: a)** Si David toma como referencia los objetos del Transmilenio, para medir la aceleración de su propio cuerpo cuando el móvil describe una curva, tiene la sensación de que puede haber una fuerza que lo empuja hacia afuera del móvil, y como no hay causa aparente que de origen a esta aceleración (según su sistema de referencia), la representa como una pseudofuerza que causa este resultado, mientras que el Transmilenio para tomar la curva en la glorieta (trayectoria circular), debe haber una fuerza centrípeta que hace que éste cambie su dirección.

### Respuestas

#### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes desde la perspectiva de David

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 34$ )

Tabla 6: Respuesta de los estudiantes desde la perspectiva de David en rotación

Respuestas	
Señalan que la causa del empuje es debido al cambio de color del semáforo.	(3%, $N = 1$ )
Establecen que cuando el móvil describe una curva, éste ejerce una fuerza ficticia (centrífuga) para poder tomar la curva, pero no dan cuenta de lo que entienden por esta frase.	(3%, $N = 1$ )
Determinan que cuando el móvil describe una curva, el movimiento de David se debe a una fuerza que lo empuja hacia afuera (centrífuga), tratando de dar algunas definiciones de lo que entienden por este concepto.	(5,9%, $N = 2$ )
Para cambiar de dirección el Transmilenio, el conductor debe ir frenando, lo cual causa el empuje de David.	(17,6%, $N = 6$ )
Asignan el empuje de David a una fuerza que es propia del móvil y la asocian con la dirección de éste.	(32,4%, $N = 11$ )
Atribuyen el empuje a una pseudofuerza o fuerza de inercia, pero no explican lo que entienden por esto; a su vez describen la dirección del movimiento de David.	(38,2%, $N = 13$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

En consecuencia, y dada la categorización de las respuestas, encontramos que los estudiantes por medio de esta actividad:

- Establecen que para el sujeto existe una fuerza (centrífuga)(5,9%,  $N = 2$ ), tratando de establecer direcciones para caracterizar dicha "fuerza".

- Identificaron que hay una fuerza centrípeta y centrífuga que son importantes para el movimiento circular, lo cual permitió discutir en el aula que se entendía por el prefijo "centri" y por el sufijo "fuga", esto para superar dicha dificultad, lo cual les hizo caer en cuenta que sus respuestas eran insuficientes o no tenían relación alguna.
- Utilizaron su experiencia, en los medios de transporte terrestres para desarrollar sus descripciones sobre la dirección que sufre un cuerpo en el cambio de dirección de un móvil y, además, cómo se comportan los objetos al interior de éstos (17,6%,  $N = 6$ ).

### **Conclusiones de La actividad III: Los cambios de movimiento según marcos de referencia en rotación**

Existen dificultades al momento de establecer fuerzas para describir un movimiento acelerado que podían describir, ya que establecen causas en distintas direcciones a las de la aceleración; por ejemplo, realizaban correctamente la descripción de la dirección que toma su cuerpo cuando ellos se encontraban en un móvil que tomaba una curva, pero la causa era debida a los cambios de rapidez del móvil y no de dirección (17,6%,  $N = 6$ ).

Por otra parte, el problema de la definición de una fuerza que se posee y no que se ejerce impide distinguir por parte de algunos estudiantes (32,4%,  $N = 11$ ), diferenciar entre un marco de referencia inercial y uno no inercial, es decir, siguen teniendo en consideración que el reposo es el único estado de referencia y los demás estados de movimiento dependen de la fuerza que se posea (fuerza vista desde el esfuerzo). Todo esto impedía consolidar el termino pseudofuerza por parte de algunos estudiantes.

Para aquellos que establecían una fuerza sobre el sujeto (David) en la misma dirección de las aceleraciones, no se podía apreciar una distinción entre la fuerza y la pseudofuerza, además, no tienen en consideración que las aceleraciones son diferentes según el observador, por lo que igualaban ambos sistemas de referencia. Todo esto permite ver que en sus descripciones, no diferencian entre dos marcos de referencia distintos (inercial y no inercial)(ver anexos A.6.3).

## Capítulo 4

# Fuerza ficticia o real, Coriolis nos lo aclarará

Hemos analizado los efectos que ocurren en los objetos, cuando estos se encuentran inmóviles dentro de un marco de referencia en rotación; sin embargo, no hemos realizado el estudio cuando estos objetos se encuentran en movimiento dentro de estos marcos acelerados.

Para realizar este análisis, los objetos no tienen que ser parte del mismo móvil, como ha ocurrido durante todos los capítulos, ya que no tendría sentido analizar el movimiento de una silla dentro de un móvil en rotación, porque se encuentra en reposo respecto al móvil; de la misma manera no tendría sentido analizar el movimiento de una montaña para saber si la Tierra está en rotación.<sup>1</sup>

Otra consideración que deducimos en el capítulo anterior, es la problemática de reducir al mínimo la fricción, para que se pudieran visualizar los efectos centrífugos en el movimiento de rotación de la Tierra, de no hacerlo, el objeto haría parte del mismo planeta y el movimiento de los objetos no serían independientes a la rotación.

---

<sup>1</sup>Esto conlleva a que los objetos a analizar no conserven el momento angular; realizamos esta aclaración ya que encontramos que es un error recurrente cuando se analizan el movimiento de los objetos

## 4.1. Efecto Coriolis como ejemplos de esas pseudofuerzas



**Figura 23:** Base giratoria construida para el estudio del movimiento dentro de la rotación

*Fuente:* Propia

*Nota:* Fotografía de la simulación del Péndulo de Foucault desde la parte superior

Como se ha establecido en el capítulo anterior, tenemos poca experiencia en los medios de transporte que lleven **un movimiento circular continuo**; esta experiencia es mínima si nos movemos dentro de ellos durante la rotación, por esto hemos decidido construir una base giratoria que nos permita estudiar los objetos en movimiento dentro de la rotación y poder visualizar nuevos efectos (ver Figura: 23).

En primer lugar, hemos decidido dejar caer una esfera desde lo alto de un plano inclinado que se encuentra dentro de la base, cuando ésta se encuentra en rotación (ver Figura: 24). La esfera se ha elegido maciza, con el fin de que ruede y obtener un punto mínimo de fricción con el suelo durante su movimiento después de dejar el plano, esto hará que su movimiento sea prolongado como lo muestra Giancoli (1989, p.201); la esfera al finalizar su recorrido por el plano llevará una velocidad mayor a cero y seguirá en línea recta a menos que exista una fuerza externa.



**Figura 24:** Montaje del plano inclinado dentro de la base giratoria

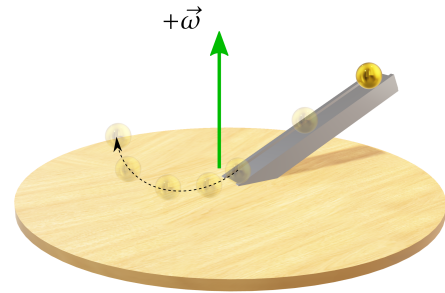
*Fuente:* Propia

*Nota:* Fotografía de la base giratoria con el plano inclinado desde la parte superior

Hemos decidido ubicar entre la esfera y la base giratoria una hoja de papel blanco y otra de papel carboncillo, con el fin de que el peso y el movimiento de la esfera dejen un rastro en el papel blanco, es decir, la hoja será el "observador" que se encuentre en movimiento con la base y "registrará" el rastro de su trayectoria. El peso de la esfera debe ser lo suficientemente grande para que deje marcado su rastro debido al contacto con el papel carboncillo, pero la esfera debe ser lo suficientemente pequeña para no desequilibrar la base. Por otro lado, al encontrarnos por fuera del marco de referencia no inercial, seremos los observadores que se encuentran en reposo.

Si en la base giratoria establecemos una velocidad angular similar a la de la Tierra ( $360^\circ$  en 24 horas,  $+\omega = \text{rad/s}^2$ ), y dejamos caer la esfera por el plano inclinado, el rastro en la hoja blanca es recto como si la base estuviera en reposo.

Al momento de establecer en la base una velocidad angular más grande  $|\vec{\omega} > 0|$ , en comparación con la de la Tierra, y volvemos a realizar el mismo experimento de dejar caer la esfera por el plano inclinado, notaríamos que ahora las marcas en la hoja blanca dejan de ser rectas y empiezan a ser curvas. Esta desviación de la trayectoria de la esfera se ha dado en el sentido contrario al de la velocidad angular de la base, es decir  $-\vec{\omega}$  (ver Figura:25).

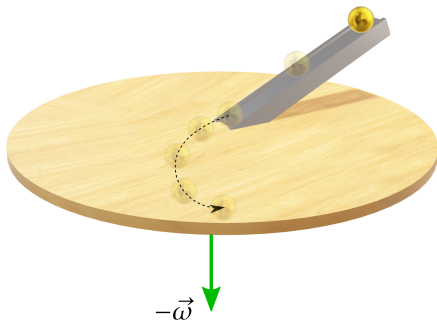


**Figura 25:** Representación de la desviación de la esfera dentro de la base con  $|\vec{\omega} > 0|$

**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación de la desviación de la esfera en la base giratoria

Si aumentamos la velocidad angular de la base, la desviación de la esfera se hace más notoria, es decir, se evidencia en la hoja blanca una curva más pronunciada, de hecho, si la velocidad angular ya es demasiado grande, la esfera al moverse durante una pequeña fracción de distancia, podría completar casi un círculo.



**Figura 26:** Representación de la desviación de la esfera dentro de la base con  $|\vec{\omega} < 0|$

**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación de la desviación de la esfera en la base giratoria

Ahora, cuando hacemos girar la base con una velocidad angular  $|\vec{\omega} < 0|$ , las desviaciones de la esfera se dan en el sentido  $|\vec{\omega} > 0|$  (ver Figura:26). Por lo tanto, la desviación de la esfera será proporcional y en sentido contrario a la velocidad angular de la base.

La trayectoria que siguen los objetos en movimiento, vistos desde el móvil en rotación son variadas, pero sabemos que dependerán de la velocidad angular del móvil y de que el objeto se encuentre en movimiento, así, el producto será proporcional entre la velocidad angular negativa del móvil y la velocidad del objeto. Como son vectores, tenemos el producto vectorial  $-\vec{\omega} \times \vec{v}$  o  $-(\vec{\omega} \times \vec{v})$  denominada Efecto Coriolis.<sup>23</sup>

Ya que no existe ninguna fuerza externa en la esfera, más que la fuerza de la gravedad y la de fricción, podemos decir que la esfera en movimiento dentro de la base se encuentra en un marco de referencia no inercial, por lo tanto, suponemos una pseudofuerza que hace que se desvíe en sentido contrario al de la rotación y a esta pseudofuerza se le denomina **Fuerza de Coriolis**. Mientras que para un observador que se encuentra en reposo, fuera de la rotación, observará que la esfera después de salir del plano inclinado sigue una trayectoria en línea recta con velocidad constante, es decir, en su estado de inercia.

Cuando realizamos el lanzamiento de la esfera desde una altura mínima en el plano inclinado, apenas es perceptible la desviación, ya que su recorrido es casi nulo después de que deja el plano; por el contrario, si lanzamos la esfera desde una mayor altura, su distancia recorrida será mayor y la desviación será más notoria. Así, para un marco de referencia con velocidad angular pequeña, el movimiento de los objetos tendrá que ser muy prolongado para visualizar los efectos de cambio de dirección. Los efectos serán más perceptibles cuando su velocidad angular sea grande o cuando

<sup>2</sup>Se utiliza la propiedad del producto vectorial:  $m(\vec{A} \times \vec{B}) = (m\vec{A}) \times \vec{B} = \vec{A} \times (m\vec{B}) = (\vec{A} \times \vec{B})m$ , siendo  $m$  un escalar (SPIEGEL (2011, p.22))

<sup>3</sup>El efecto Coriolis realmente está dado por  $-2(\vec{\omega} \times \vec{v})$  (ver anexos A.3)

el movimiento de los objetos sea prolongado y con mínima fricción con la superficie en rotación. Podemos entonces afirmar que los efectos son casi imperceptibles en la Tierra, debido a que ésta tiene una velocidad angular muy pequeña, porque los movimientos de los objetos dentro de esta ocurren en un tiempo breve o porque existe una gran fricción.

Para el caso de la Tierra, encontramos las desviaciones en el lanzamiento de los cohetes, en el movimiento de los aviones, en giroscopios de larga duración y en el **Péndulo de Foucault**.

Hemos decidido realizar diferentes gráficas de las trayectorias seguido por objetos en movimiento dentro de la rotación, para tener una idea del tipo de trayectoria de dichos objetos. Para ello, utilizaremos la idea de Coriolis (1831) de proyectar el movimiento aparente de rotación de los objetos en el observador que se encuentra en rotación (p.270), donde éste si es el que está rotando y lo sabemos debido a los efectos centrífugos. <sup>4</sup>

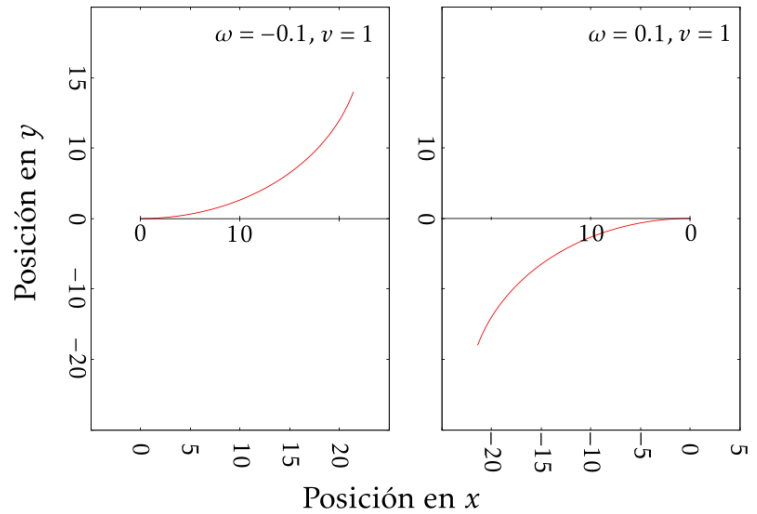
Si un pasajero dentro de un móvil que gira observa que los objetos fuera de éste tienen una velocidad angular, aún cuando sea él el que este rotando, podemos asegurar que es el pasajero que se encuentra en este estado de movimiento, debido a que los objetos que se encuentran dentro del móvil tienen efectos centrífugos y de Coriolis. Esta suposición nos permitirá otorgarle, por parte del pasajero una velocidad angular a las trayectorias de los objetos y suponer que él se encuentra en reposo. Así, si tenemos las ecuaciones de movimiento de los objetos en reposo, podemos sustituir el parámetro del tiempo ( $t$ ) por el de  $\theta/\omega$ , para obtener una gráfica vista por el pasajero, debido a que ahora hemos cambiado la variable independiente  $t$  por  $\theta$ , debemos graficar en coordenadas polares, recordando una velocidad angular constante ( $\vec{\omega}_i = \vec{\omega}_f$ ). Por simplicidad, tomaremos movimientos en una sola dimensión, por lo que  $y = r$ .

---

<sup>4</sup>Nombramos solamente los efectos debido a que en el momento del trabajo de Coriolis sólo se conocía ese efecto y donde su estudio revela que existe otro efecto, en algunos casos llamado segundo teorema de Coriolis o efecto Coriolis (Alexandre (s.f.)).



Ahora, podemos realizar la gráfica de las desviaciones de la esfera después de que deja el plano inclinado, y para ello la ecuación que describe la trayectoria en coordenadas cartesianas será  $y(t) = v * (t)$  y cambiando de variable,  $r(\theta) = v * ((\theta)/\omega)$ , en donde la velocidad angular la hemos tomado constante y positiva ( $\omega = 0,1$ ) y para el otro caso, la velocidad angular negativa ( $\omega = -0,1$ ) (ver Figura: 27)

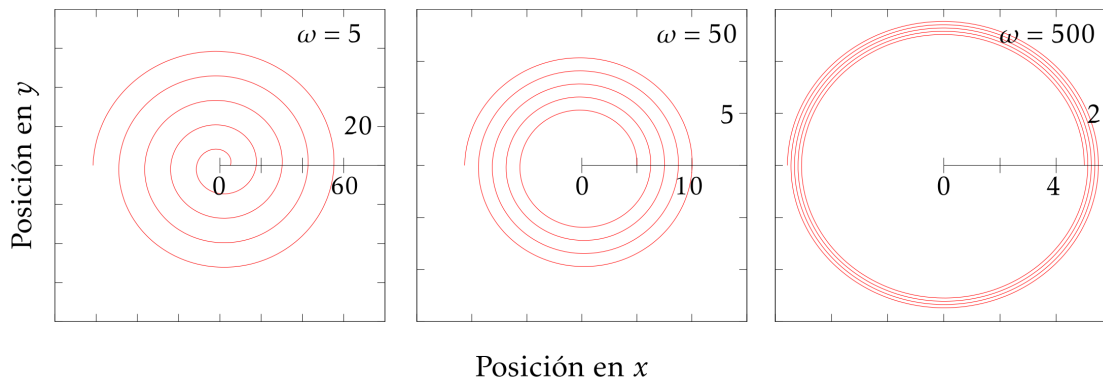


**Figura 27:** Desviación de un movimiento en línea recta según un observador en rotación

**Fuente:** Propia

**Nota:** Gráficas de la desviación de un movimiento recto, debido a la rotación

Es común encontrar información acerca del sentido de giro del agua en los sumideros; esto es debido al efecto Coriolis, pero estudios como los de Stepanyants y Yeoh (2008), Veritasium (s.f.) y (Benoît (s.f.)), han demostrado que la desviación de Coriolis es tan débil para el caso de la Tierra, que cualquier fuerza externa no deseada y otras variables como, por ejemplo, la forma del sumidero puede influir en el sentido de giro del agua. Aun así, hemos decidido realizar la gráfica de un punto que se acerca al centro, como ocurre con el agua y el sumidero.



**Figura 28:** Movimiento recto hacia el centro, según un observador en rotación

*Fuente: Propia*

*Nota: Gráficas de la desviación de un movimiento recto, debido a la rotación*

La ecuación que describe el movimiento de esta parte de agua, en coordenadas cartesianas, es  $y(t) = p_o + v * t$  y realizando el cambio de variable,  $r(\theta) = p_o + v * (\theta/\omega)$ , hemos tomado para la posición inicial  $p_o = 5$  unidades y la velocidad del móvil de 10 unidades/ $t$ , con distintas velocidades angulares de  $\omega = 5\text{rad}/t$ ,  $50\text{rad}/t$  y  $500\text{rad}/t$  (ver Figura: 28):

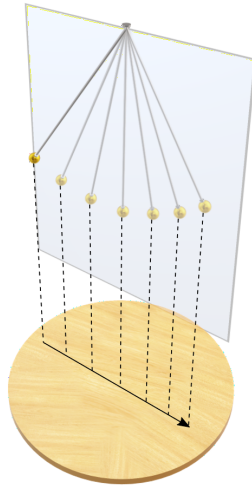
Podemos notar que para aproximarse a la trayectoria del sumidero que observamos comúnmente, necesitamos de una velocidad angular mucho mayor a la de la Tierra que es de  $\vec{\omega}_T T = 0,0000727222\text{rad}/s$ .

## 4.2. El Péndulo de Foucault

Las desviaciones que hemos descrito para el caso de la rotación de la Tierra, requieren de grandes distancias, para que los efectos sean percibidos. En 1851 el físico francés Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), realizó un experimento famoso: El Péndulo de Foucault, un péndulo capaz de superar las dificultades en la percepción de las desviaciones que son posibles de observar a grandes distancias y reduciendo la fricción. Este péndulo permitió evidenciar el efecto debido a la rotación en un espacio pequeño, en comparación a los que hemos descrito anteriormente.

A continuación, presentaremos las ideas más importantes de su obra denominada: Señales Sensibles sobre el Movimiento Diurno de la Tierra <sup>5</sup>; éste nos permitirá evidenciar la forma de pensar del físico y cómo dió solución a los problemas de fricción que hemos descrito durante el capítulo anterior. Su obra se caracteriza por tener experimentos mentales y físicos.

<sup>5</sup>SUR DIVERS SIGNES SENSIBLES DU MOUVEMENT DIURNE DE LA TERRE, 1852, traducción libre al español es nuestra



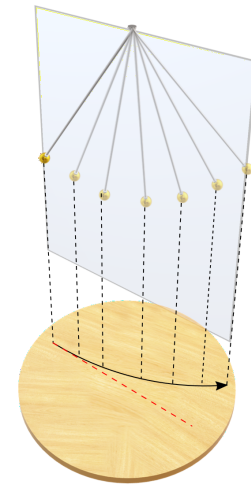
**Figura 29:** Representación del plano de oscilación imaginario de un péndulo en un marco de referencia inercial

**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación desde la parte superior de la trayectoria de un péndulo en una base sin girar

"si estas oscilaciones continuarán por algún tiempo, el movimiento de la Tierra, girando continuamente de oeste a este, se vuelve sensible por el contraste de la inmóvilidad del plano de oscilación, cuya traza en el suelo parece animada por un movimiento que se ajusta al movimiento aparente de la esfera celeste; y si las oscilaciones pudieran persistir durante veinticuatro horas, la traza [el rastro] de su plano, haría al mismo tiempo una revolución entera alrededor de la vertical, dirigida por el punto de suspensión" (Foucault y Trad. (1848))

En primer lugar, para el experimento mental, Foucault inicia ubicando un péndulo en el polo norte, donde el punto de apoyo de la masa del péndulo o de suspensión coincide con el eje de rotación de la Tierra, esto, para simplificar su análisis y alejar de su posición de equilibrio a la esfera del péndulo, para que debido a la única fuerza, la gravitacional, éste empiece a oscilar y su oscilación se puede describir siempre dentro de un mismo plano imaginario (ver Figura: 29); posterior a esto Foucault describe que:



**Figura 30:** Cambio exagerado del plano de oscilación imaginario de un péndulo en un marco en rotación

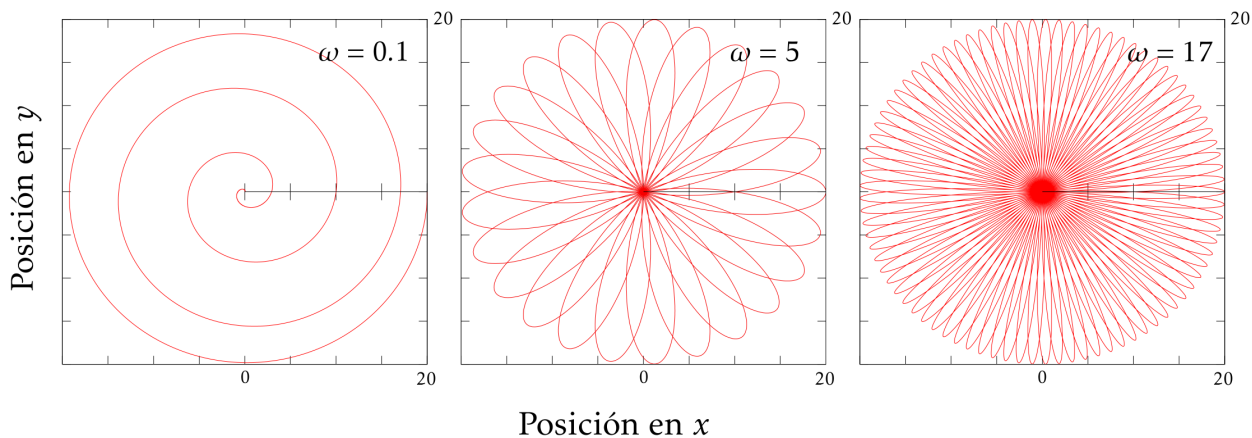
**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación desde la parte superior de la trayectoria de un péndulo en una base girando

Es decir, que la trayectoria de la masa de la esfera del péndulo se ha desviado debido a la rotación de la Tierra, ya que es un movimiento de oscilación dentro del movimiento de rotación de la Tierra. Esta descripción se realiza para el polo norte y su motivo se verá más adelante. En la Figura: 30, se exagera la desviación del plano de oscilación, debido a la rotación de la Tierra.

Hemos decidido graficar diferentes trayectorias de un movimiento armónico simple, como en el péndulo, en donde su trayectoria (o rastro) puede ser descrito por la ecuación, en coordenadas cartesianas, como:  $x(t) = A\cos(\omega_p * t)$  o si consideramos la idea de Coriolis de proyectar la supuesta rotación como lo hemos realizado, la ecuación será  $x(\theta) = A\cos(\omega_p(\theta/\omega_r))$ , donde  $\omega_p$  es la velocidad angular de oscilación del péndulo, y  $\omega_r$  la velocidad angular del móvil. Los valores que hemos tomado como constantes, son la velocidad de rotación del móvil  $\omega_r = 0,8rad/s$  y la amplitud del péndulo como  $A = 20unidades$ ; la velocidad angular del péndulo  $\omega_p$  la hemos variado para obtener diferentes gráficas y los valores han sido  $\omega_p = 0,1rad/s$ ,  $5rad/s$  y  $17rad/s$  (ver Figura: 31)<sup>6</sup>

Como se observa en la Figura: 31, la trayectoria en la desviación es similar a la que hemos obtenido del agua en el sumidero. También, a medida que aumentamos la velocidad con la que oscila el péndulo, en relación con la del móvil, se forman una serie de pétalos (Rosa polar) cada vez mayor, en la cual cada pétalo se va volviendo fino y próximo al siguiente. Así, podemos decir que, para el caso de la Tierra que tiene una velocidad angular pequeña  $\omega_T = 0,000072722rad/s$ , la cantidad de pétalos son mayores a los que hemos mostrado y son aún más finos y están más próximos entre ellos, por lo que no tendría sentido realizar su gráfica.



**Figura 31:** *Movimiento Armónico Simple, según un observador en rotación*

**Fuente:** *Propia*

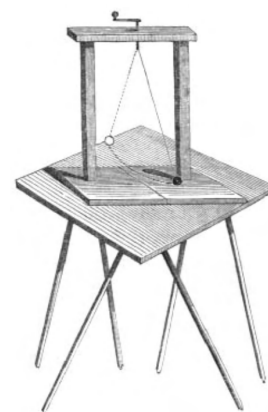
**Nota:** *Gráficas de la desviación de un Movimiento Armónico Simple, debido a la rotación*

<sup>6</sup>Hemos decidido variar la velocidad angular del péndulo  $\omega_p$  para no tener que disminuir  $\omega_r$  hasta la velocidad angular de la Tierra; ésto lo podemos hacer, ya que estas velocidades están relacionadas por medio del cociente  $\omega_p(\theta/\omega_r)$

Ahora, nos surge una nueva pregunta, ¿Por qué el péndulo se desvía si también la estructura para sostenerlo se encuentra dentro de la rotación? Volvemos a recurrir al escrito de Foucault, donde nos indica que " *la teoría no muestra una seria dificultad, y, a su vez, la experiencia me ha demostrado que, siempre que el alambre ha de oponerse a la misma resistencia y a la flexión en todos los planos; éste puede girar con rapidez suficiente de un modo u otro, sin afectar significativamente la posición del plano de oscilación, por lo que la experiencia que acabo de describir debe pasar en el polo en toda su simplicidad*" (Foucault y Trad. (1848))

En una de sus bibliografías Foucault dice: " *lo que me puso en la pista de la experiencia del péndulo, es el hecho de que el plano de oscilación de una barra fija en el mandril de un torno permanece fijo cuando se gira. Este efecto siempre nos parece sorprendente. Si el plano de vibración permanece fijo, es porque no hay fuerza que pueda hacerlo girar.*" (Tobin (2012, p.143))

Es decir, Foucault nos muestra que es debido a la experiencia y al análisis de fuerzas, que se puede afirmar que el único efecto que observa en un péndulo, que oscila dentro de un móvil en rotación, es la de la torsión del hilo para un observador en reposo, es por ello, por lo que no ve objeciones de que ocurra algo diferente en los polos. De hecho, existió un experimento posterior a la primera exposición del Péndulo de Foucault, donde se ajustó una manivela al hilo de un péndulo para que ésta se torciera y girara, en donde se mostró que la torsión del hilo no afecta el plano de oscilación del péndulo (ver Figura: 31) (Tobin (2012, p.146)).



**Figura 32:** Representación de un péndulo donde se pone a girar el hilo que lo sostiene

**Fuente:** Tomado de Tobin (2012, p.146)

**Nota:** Imagen del montaje de un péndulo donde se gira el hilo que lo sostiene

En comparación con los objetos que hemos nombrado, " *el péndulo tiene la ventaja de acumular efectos y el paso del ámbito de la teoría al de la observación.*" <sup>7</sup> (Foucault y Trad. (1848)), es decir, el efecto de desviación será perceptible después de un tiempo muy prolongado; por otra parte, evita la necesidad de movimientos a grandes distancias.

De la misma forma que describimos en este capítulo para una velocidad angular positiva, la desviación de " *la masa del péndulo se puede comparar a un proyectil que se desvía hacia la derecha*

<sup>7</sup>Podemos realizar una analogía del efecto de acumulación del crecimiento del cabello o las uñas, siendo éste perceptible a largo tiempo.

*cuando se aleja del observador, y que se desvía necesariamente en la dirección opuesta, cuando regresa a su punto de partida; lo que conduce al desplazamiento gradual del plano medio de oscilación e indica su dirección.”(Foucault y Trad. (1848))*

Aquí Foucault muestra que la desviación o giro del plano de oscilación va en sentido contrario al del giro de la Tierra o móvil. Foucault utilizó la expresión “desvía hacia la derecha”, pero para este trabajo hemos preferido utilizar la desviación en cierto sentido angular, ya que la percepción de derecha o izquierda depende de la ubicación de los observadores, como ocurre cuando dos personas de frente levantan la mano derecha.

Ahora, vemos necesario hablar sobre la forma de la Tierra para entender la desviación de los objetos que se mueven dentro de una rotación en todos los puntos de la superficie del planeta; ya que como Foucault ha hecho su experimento mental en el polo, nos preguntamos ¿el efecto de desviación es igual en toda la Tierra? ¿La forma esférica de la Tierra influye en el observador para describir las desviaciones en un marco de referencia en rotación?

#### 4.2.1. El Péndulo de Foucault y la forma de la Tierra

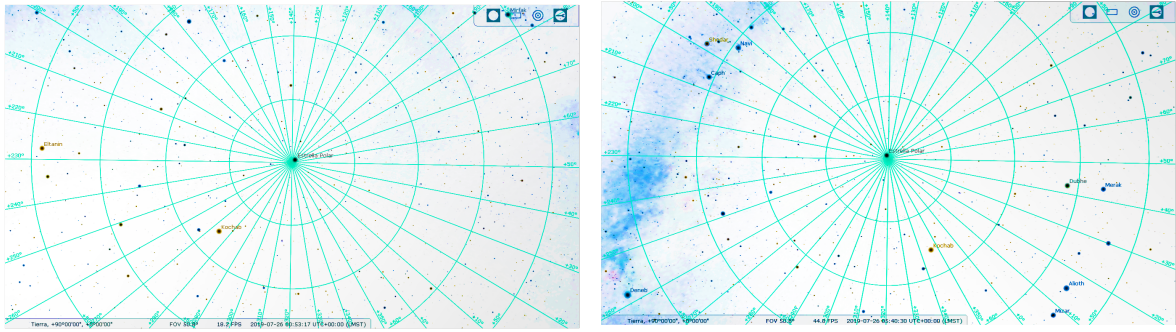
Recurriremos al software Stellarium (s.f.), ya que éste posee: un catálogo de 600.000 estrellas, control del tiempo y la posibilidad de simular cualquier ubicación en la superficie del planeta Tierra (), esto para hacer observaciones que sean comparables al analizar el comportamiento de las desviaciones en el Péndulo de Foucault en otras ubicaciones del planeta.<sup>8</sup>

Si simulamos en el Stellarium la ubicación en el polo norte, exactamente en el eje, ubicamos la vista hacia el cenit;<sup>9</sup>, aumentamos la velocidad del tiempo y realizamos el seguimiento de las estrellas, en donde notaremos que éstas tienen trayectoria con dirección a favor de las manecillas del reloj (Figura: 33), y ya que nos encontramos dentro de la Tierra, ésta tendrá la misma velocidad angular que se le denota a las estrellas.

---

<sup>8</sup>El estudio de los objetos celestes ha permitido a Copérnico y Nacional (1999) (1473 - 1543) desarrollar su idea del modelo del sistema solar, donde la Tierra se encuentra en movimiento de translación y de rotación . Algunas observaciones presentadas en su obra “Revoluciones de las Órbitas Celestes”, 1543, Tomo I, Capítulos I, II y III, son: • “en algunos lugares se observarán muchas estrellas que no tienen ocaso, y el austro muchas que no tienen orto” • “la forma de las aguas es observada por los navegantes, que desde la nave no ven la Tierra, que desde la altura del mástil si se contempla” • La observación de los eclipses en los países del oriente, pero no en los del occidente • La sombra de la Tierra proyectada en los eclipses lunares

<sup>9</sup>Intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador. (RAE)

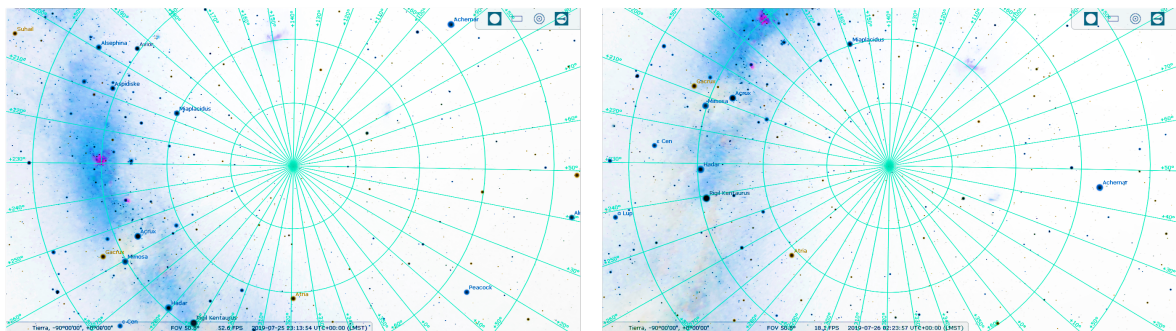


**Figura 33:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Norte en el Stellarium

**Fuente:** Adaptada de Stellarium (s.f.)

**Nota:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Norte en el Stellarium, la primera captura es la de la izquierda

Si cambiamos de posición, y nos ubicamos en el polo sur y realizamos los mismos pasos, notaremos que las estrellas tienen dirección contraria a la de las manecillas del reloj (Figura: 34).

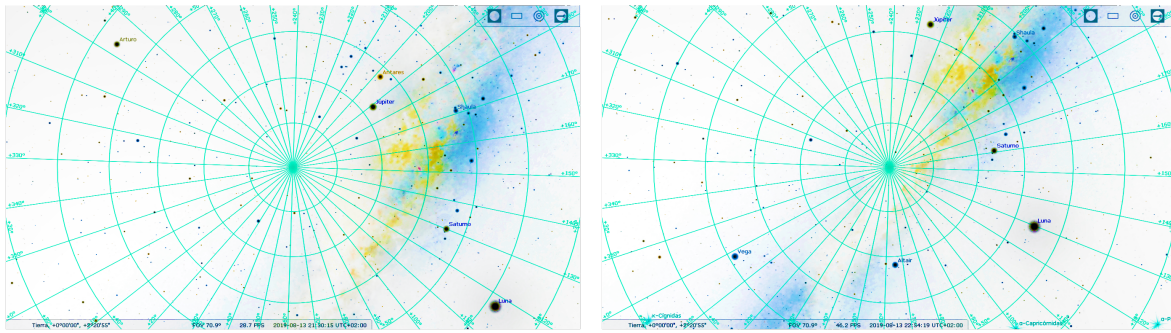


**Figura 34:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Sur en el Stellarium

**Fuente:** Adaptada de Stellarium (s.f.)

**Nota:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas en el polo Sur en el Stellarium, la primera captura es la de la izquierda

Por último, si nos ubicamos en el ecuador, la trayectoria de las estrellas en el cenit ya no parece describir una curva, sino una línea recta como si no estuvieran girando (Figura: 35).



**Figura 35:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas desde el Ecuador en el Stellarium,

*Fuente:* Adaptada de Stellarium (s.f.)

**Nota:** Capturas de pantalla de las estrellas vistas desde el Ecuador en el Stellarium, la primera captura es la de la izquierda

La anterior observación en el programa Stellarium nos permitirá establecer una percepción para la velocidad angular en la que se encuentra el observador, en donde esta velocidad angular en los polos es máxima y en el ecuador es cero. Dicho esto, el observador dentro de la Tierra podrá deducir que su velocidad angular es en sentido contrario a las manecillas del reloj en el polo norte, en sentido a favor de las manecillas del reloj en el polo sur y cero en el ecuador terrestre.

Hemos mostrado las desviaciones de los objetos en movimiento y aclarado que éstas dependen de la velocidad angular del móvil, así, las desviaciones del plano de oscilación en el péndulo dependerán de la ubicación en la cual se encuentre, así Foucault muestra que:

*”Cuando bajamos a nuestras latitudes, el fenómeno se complica por un elemento sobre el que deseo llamar la atención de los geómetras. A medida que nos acercamos al ecuador, el plano del horizonte toma en el eje de la Tierra una posición cada vez más oblicua y vertical, en vez de girar sobre sí mismo como en el polo, describe un cono cada vez más abierto; el resultado es una disminución en el movimiento aparente del plano de oscilación, un movimiento que se desvanece en el ecuador para cambiar de dirección en el otro hemisferio.”*(Foucault y Trad. (1848)).

*”De hecho, si se aplica al presente caso el razonamiento que he desarrollado para el caso anterior, no están considerando un par terrestre que se inclina gradualmente en el eje de rotación y se inactiva en el momento donde la pendiente da una dirección paralela al eje del mundo.”*(Foucault y Trad. (1848)).

Foucault ha expresado cómo ocurre el efecto de desviación en un polo y cómo este efecto va disminuyendo a medida que nos acercamos al ecuador, y cómo se vuelve nulo en el ecuador. La desviación cambia de sentido cuando cambia de hemisferio y vuelve y se hace máxima, pero en dirección contraria en el otro polo.

Por lo que *”el tamaño promedio de esta desviación, en relación con el tiempo que se utiliza para pasar, muestra, según las indicaciones de la teoría, que en nuestras latitudes la traza horizontal del plano*



*de oscilación no hace un giro completo en veinticuatro horas.”(Foucault y Trad. (1848)).*

Para finalizar, Foucault sintetiza en una relación matemática la desviación del plano de oscilación del péndulo, teniendo en cuenta que la dirección del desvío va en sentido contrario al del movimiento de la rotación de la Tierra y por lo tanto su forma esférica.

*”En la memoria anterior, mostré que, en virtud de la inercia de oscilación el péndulo del plano libre está sujeto a tener en relación con la vertical, una posición invariable, y he aplicado esta propiedad a la demostración experimental del movimiento de la Tierra sobre su eje. El fenómeno sensible que aparece en este experimento es una desviación relativa del plano de oscilación reportado en cualquier plano vertical solidariamente con la Tierra; esta desviación es igual al movimiento angular y de signo contrario al movimiento de la tierra, multiplicado por el seno de la latitud del lugar en el que opera”(Foucault y Trad. (1848)).*

*”Esta ley, que ninguna observación seria ha llegado a invalidar, implica una reducción de la desviación del polo donde es total, hasta el punto donde se vuelve nulo; y su variación progresiva, en presencia de una rotación realmente constante, muestra claramente que la fijación del plano de oscilación debe tomarse en sentido absoluto solo en el polo, y que, en cualquier otra situación en la superficie de la Tierra sólo se encuentra en la vertical cuya dirección cambia constantemente en el espacio.”(Foucault y Trad. (1848))*

A este péndulo que perdura por gran tiempo oscilando y que es sensible al movimiento de rotación se le denomina **el Péndulo de Foucault**. Para la época de Foucault, en donde no había una prueba tangible la sencillez de su experimento se ha denominado uno de los experimentos más elegantes en la historia de la física.

Así, y durante este trabajo hemos mostrado de forma concordante y coherente, con causas y efectos que han llevado a pensar por parte de la física el movimiento de la rotación de la Tierra <sup>10</sup>.

Si alguien llegase a suponer que la Tierra no se encuentra en rotación o que no tiene una forma esférica, debería poder describir de manera coherente, las desviaciones en las trayectorias de los Péndulos de Foucault que se encuentran por todo el mundo, las desviaciones de los cohetes y en los giroscopios.<sup>11</sup>

<sup>10</sup>Copérnico y Nacional (1999), utiliza también esta forma de pensar coherentemente para establecer los movimientos de translación y rotación, “nada me movió más a pensar en otra razón para deducir los movimientos de las esferas del mundo, que el haber sabido de los matemáticos, que ellos mismos no están de acuerdo sobre aquellos. Porque, en primer lugar, los matemáticos han estado tan inciertos del movimiento del Sol y de la Luna, . . . no utilizaron los mismo principios, suposiciones y demostraciones que para las revoluciones y movimientos aparentes” (p.16)

<sup>11</sup>Foucault también muestra en su obra (Foucault y Trad. (1848)) como el giroscopio es capaz de mostrar desviaciones debido a la rotación de la Tierra, pero para su estudio se necesita desarrollar conceptos que están fuera de la intención de este escrito.

### 4.3. Diseño de actividades sobre el efecto Coriolis y el péndulo en el aula

En relación con el análisis del movimiento dentro de un marco de referencia en rotación (no inercial) presentado durante este capítulo, hemos propuesto trabajar con los estudiantes la trayectoria que describe una esfera después de caer de un plano inclinado que se encuentra dentro de la base giratoria, primero, cuando ésta se encuentra inmóvil y segundo, cuando se encuentra en un Movimiento Circular Uniforme.

Posterior a ésto, proponemos considerar tres observadores en el experimento mental: dos dentro de una base que se encuentra en Movimiento Circular Uniforme y un tercer observador en reposo fuera de ésta, que observa el lanzamiento de una esfera por parte de un observador que se encuentra en la base giratoria. Entonces, pretendemos que los estudiantes en esta actividad describan la causa del cambio en la trayectoria de la esfera.

#### 4.3.1. La actividad IV: Los movimiento dentro de marcos de referencia en rotación

Esta actividad fue diseñada para un tiempo de 1 hora y 40 minutos y tiene como objetivos:

- Establecer una pseudofuerza (de Coriolis) por parte de un observador que se encuentra en un sistema de referencia en rotación (no inercial), para describir el cambio en la trayectoria de un objeto en movimiento.
- Reconocer que, para dos observadores en distintos marcos de referencia, existen diferentes trayectorias, cuando los objetos se encuentran en movimiento.

*Suponemos dos observadores (Aurora y David) y reciben compañía, se llama Ana. En el borde del carrusel en movimiento se encuentran David y Ana, ubicados en extremos opuestos. El carrusel va girando en el sentido de las manecillas del reloj. A los estudiantes se les presentan una serie de preguntas relativas a las observaciones que pueden describir David y Aurora desde sus marcos de referencia. Por ejemplo: Cuando Aurora le indica a David que lance en línea recta la esfera de un péndulo que se encuentra sostenido en el centro del carrusel, para que la esfera llegue hasta Ana. Según la perspectiva de Aurora, que se encuentra en un sistema de referencia inercial ¿Cuál es la causa de que la esfera no llegue a su destinatario?*

#### **Cuestionario**

- (a) ¿Qué trayectoria sigue la esfera? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento, indicando posibles causas, efectos y direcciones. **Finalmente, la esfera no llega hasta Ana. Parece que se ha desviado en el recorrido. Así que:**
- (b) **Si usted es Aurora y afirma que David sí lanzó el péndulo en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?**
- (c) Si usted es David y afirma que si lanzó la esfera en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?
- (d) Si usted fuera Aurora, ¿En qué dirección debe apuntar y lanzar la esfera para que se encuentre con Ana? Represente mediante un dibujo ese movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

**Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista para Aurora y David**

**Clave de respuesta: c) y b)** Para David, el péndulo se mueve hacia el lado contrario al que se desplaza el carrusel y no llega hasta Ana. Ya que no hay una fuerza que desvíe la esfera, David y Aurora le deben atribuir esto a una pseudofuerza. Para Aurora, la esfera va en línea recta y Ana se mueve con el carrusel; por tal razón, no le llega la esfera.

**Análisis físico de la situación c) y b):** En un sistema inercial como el de Aurora, la esfera del péndulo (en ausencia de fuerzas) se desplaza en línea recta y no llega a Ana, porque ésta se mueve con el carrusel. Desde el punto de vista de David, Ana se encuentra en reposo, pero también nota que la esfera del péndulo se desvía hacia la izquierda y no se encuentra con Ana (describe una trayectoria curva), por lo que para David la esfera tiene una aceleración. Por lo tanto, David y Ana se encuentran en un sistema de referencia no inercial (en rotación) y tienen que suponer una pseudofuerza que desvía la esfera del péndulo de su trayectoria recta; a esta pseudofuerza se denomina fuerza de Coriolis.

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes según Aurora y David

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 17$ )

Tabla 7: Respuesta de los estudiantes desde la perspectiva de Aurora en el efecto Coriolis

Respuesta para Aurora	
Atribuyen el recorrido de la esfera a la fuerza centrípeta, argumentando que si existe una desviación de la esfera por parte del observador en reposo.	(47,1 %, $N = 8$ )
Afirman que la esfera no llega a Ana por el movimiento del carrusel, el cual hace que la esfera se desvíe y que no haga un recorrido lineal, sino tangencial a la rotación del móvil.	(52,9 %, $N = 9$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas de los estudiantes según la perspectiva de Aurora, con su respectivo porcentaje

Tabla 8: Respuesta de los estudiantes desde la perspectiva de David en el efecto Coriolis

Respuesta para David	
Establecen que el movimiento del carrusel influye notoriamente en la desviación de la esfera, y que, si éste no se moviera, si llegará a Ana en línea recta.	(100 %, $N = 17$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas de los estudiantes según la perspectiva de David, con su respectivo porcentaje

Dada la categorización de las respuestas de los estudiantes desde las dos perspectivas, encontramos que los estudiantes por medio de esta actividad:

- Distinguen, (100 %,  $N = 17$ ) que el cambio de dirección del móvil es el causante de que exista una desviación de los objetos que se encuentran en movimiento, pero no establecen una fuerza para estas aceleraciones desde el observador que se encuentra dentro del móvil.
- Establecen que la desviación del objeto en movimiento dentro de la rotación siempre va en sentido contrario al del giro del móvil (ver anexos A.6.4)
- No llegan a reconocer que cuando dos observadores con distintos marcos de referencia estudian el movimiento de un mismo cuerpo, sus observaciones en cuanto a trayectorias pueden llegar a ser distintas. (ver anexos A.6.4).

#### **Conclusiones de la actividad IV: Los movimiento dentro de marcos de referencia en rotación**

No fue posible que reconocieran una fuerza acorde con el cambio de dirección del péndulo por parte del observador en el marco de referencia no inercial, pero sí que la desviación va en sentido contrario a la rotación que lleva el carrusel.

Ya que los estudiantes no han podido establecer la pseudofuerzas en un marco de referencia no inercial, no es posible distinguir la fuerza centrípeta de una pseudofuerza como la de Coriolis.

Percibimos que los estudiantes tratan la situación planteada siempre desde el observador que se encuentra en estado de movimiento en rotación, lo cual aún muestra la dificultad de entender el estado de inercia de los cuerpos en un marco de referencia no inercial.

#### **4.4. Diseño de actividades sobre el movimiento de rotación de la Tierra**

Ya que creemos que los estudiantes no han realizado un estudio de la trayectoria de las estrellas vistas desde ambos hemisferios, para establecer la velocidad angular del observador en cada latitud, diseñamos una actividad en la cual el celular va a ser análogo a la Tierra simulando la rotación, en donde sus cámaras frontal y trasera serán análogas a dos observadores que se encuentran ubicados, uno en el polo norte y el otro en el polo sur.

Pretendemos que los estudiantes describan, por medio del análisis de sus observaciones, la velocidad angular en los polos y puedan concluir que rotación se percibe en el ecuador

##### **4.4.1. La actividad V: El movimiento de Rotación de la Tierra**

Esta actividad fue diseñada para una clase, con un tiempo de 1 hora y 40 minutos, y tiene como objetivo:

- Establecer la desviación del péndulo en diferentes latitudes de la Tierra, por medio de la rotación que percibe un observador

*David quiere explicarle a Aurora cómo se imagina la rotación de la Tierra en los polos. David utilizará un celular para simular la rotación de la Tierra, la cámara frontal simulará un observador en el polo norte y la cámara trasera un observador en el polo sur; además, dibujará en una hoja de papel pequeñas pero notorias estrellas simulando parte de la bóveda celeste. David fijará para **todo el ejercicio el celular con la pantalla siempre de cara hacia el techo y en posición horizontal, y ya que éste simula la Tierra, girará de oeste a este (en sentido de las manecillas del reloj). Recuerde, lo único que gira David es el celular y no la hoja de papel.***

***Situación I:** Cuando David activa la cámara frontal simula al observador en el polo Norte, ubica la hoja con las estrellas a unos 5 cm de la pantalla. En la pantalla lo único que se observa es la hoja de papel*

con sus respectivas estrellas. Luego, David empieza a tomar un video mientras gira el celular. Según el video<sup>12</sup> ¿en qué sentido giran las estrellas? Dibújelo

**Situación II:** Esta vez David tomará el video con la cámara trasera y colocará la hoja de papel a unos 5 cm por debajo del celular. En la pantalla lo único que se observa es la hoja de papel con sus respectivas estrellas. Luego, David empieza a tomar un video mientras gira el celular. Según el video ¿en qué sentido giran las estrellas? Dibújelo

### Repuesta esperada de los sentidos de giro

**Situación I: (Cámara frontal – Polo Norte)** Las estrellas se mueven en sentido antihorario

**Situación II: (Cámara trasera – Polo sur)** Las estrellas se mueven en sentido horario

### Respuestas

#### Respuestas de los estudiantes del sentido de giro de la estrellas

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 31$ )

#### Situación I

Tabla 9: Número de estudiantes según la percepción de giro para la situación I

Sentido de giro de las estrellas	
Horario	(38,7%, $N = 12$ )
Antihorario	(61,3%, $N = 19$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Sentido de giro con su respectivo porcentaje

#### Situación II

Tabla 10: Número de estudiantes según la percepción de giro para la situación II

Sentido de giro de las estrellas	
Horario	(74,2%, $N = 23$ )
Antihorario	(25,8%, $N = 8$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Sentido de giro con su respectivo porcentaje

Con la ayuda del programa Stellarium, mostramos a nuestros estudiantes el movimiento de los objetos celestes como se aprecia si estuviéramos situados en los polos. Nos ubicamos en el polo

<sup>12</sup>Realizamos la aclaración de que el análisis se hace sobre el video, debido a que la cámara frontal se comporta en modo espejo, pero al momento de reproducir el video, se invierte la imagen y se muestra como debería ser.

Norte y luego en el polo sur; en ambos casos dirigimos la vista hacia el Cenit y posterior a esto, aumentamos la velocidad del reloj del programa, para que fuera posible visualizar el movimiento de los cuerpos celestes durante grandes lapsos de tiempo, y les pedimos que respondan las siguientes preguntas:

**Cuestionario**

1. ¿Si ubicamos un péndulo en el polo norte, hacia dónde se percibe su desviación?
2. ¿Hacia dónde, cuándo se encuentra ubicado en el Polo Sur?
3. ¿En qué sentido deduciría que gira el péndulo cuando se encuentra ubicado en el Ecuador?

**Clave de respuesta:** Si se observa desde el Polo Norte su Cenit, encuentra que las estrellas giran en sentido contrario a las manecillas del reloj, y ya que la observación se realiza dentro de la bóveda celeste, la percepción de giro de la Tierra debe ser igual al de las estrellas, por esta razón, el péndulo se desviará en sentido contrario al que gire la Tierra. Para el caso del polo Norte, la desviación será en el sentido de las manecillas del reloj.

En el polo Sur, las estrellas giran en el sentido de las manecillas de reloj y al igual que en el polo norte, la percepción de giro de la Tierra debe ser el mismo. Por esta razón, el péndulo se desviará en sentido contrario de las manecillas del reloj.

Debido a que la percepción del sentido de giro en el polo norte es contraria a la del polo sur, en el Ecuador terrestre no debe existir una percepción de sentido de giro en las estrellas, y por ende, no debe existir desviación alguna del péndulo.

## Respuestas

### Compendio de respuestas de los sentidos de giro

Tabla 11: Respuesta de los estudiantes de la desviación del péndulo en el polo Norte

Sentido de giro en la desviación del péndulo en el polo Norte	
Antihorario	(19,4%, $N = 6$ )
Horario	(80,6%, $N = 25$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Sentido de giro con su respectivo porcentaje

Tabla 12: Respuestas de los estudiantes de la desviación del péndulo en el polo Sur

Sentido de giro en la desviación del péndulo en el polo Sur	
Antihorario	(83,9%, $N = 26$ )
Horario	(16,1%, $N = 5$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Sentido de giro con su respectivo porcentaje

Tabla 13: Respuesta de los estudiantes de la desviación del péndulo en el Ecuador terrestre

Sentido de giro en la desviación del péndulo en el Ecuador Terrestre	
Antihorario	(6,5%, $N = 2$ )
Horario	(3,2%, $N = 1$ )
No tiene sentido de giro	(77,4%, $N = 24$ )
No sabe / No responde	(12,9%, $N = 4$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Sentido de giro con su respectivo porcentaje

### Algunas respuestas textuales

“Ya que es opuesto el sentido de giro de las estrellas en los polos, el péndulo se desviará en sentido contrario al de las estrellas”

“No existe ninguna diferencia entre el sentido de giro de las estrellas y el péndulo, ya que las estrellas se mueven en el sentido que gira el celular”

“Cambia la perspectiva, reflejando el sentido contrario en la desviación del péndulo”

“Existe un cambio en el sentido de giro de las estrellas y el péndulo, porque el sentido de giro es horario, pero al ver el video en el celular, su cambio es antihorario. Eso se debe al sistema de la



cámara.”

“Dependiendo del sentido de rotación de las estrellas, la desviación del péndulo se generaba en sentido contrario y en el ecuador no hay giro”

“Se supone que la imagen en el celular debe ser el reflejo de un espejo, pero al ver el video, el sentido de giro cambió debido a la percepción del movimiento generado, que hace que la desviación del péndulo sea en sentido horario o antihorario”

“Las estrellas giran en el sentido antihorario en el polo norte y el péndulo gira en sentido contrario por la percepción del movimiento”

“El péndulo gira en sentido de las manecillas del reloj, pues la Tierra es la que gira y no las estrellas, y como la Tierra gira de oeste a este, el péndulo gira de este a oeste.”

“El péndulo se desvía en un sentido en un polo y en otro sentido en el otro polo, entonces en el ecuador es nulo”

Encontramos que esta actividad permitió en los estudiantes:

- Establecer la desviación del péndulo en sentido contrario al de las estrellas, cuando el observador se encuentra ubicado en los polos.
- Deducir que en el ecuador no hay un efecto de desviación en el péndulo, debido a que allí los efectos de giro de la Tierra se cancelan para un observador terrestre (77,4%,  $N = 24$ ).

#### **Conclusiones de la actividad V: El movimiento de Rotación de la Tierra**

Notamos un cambio positivo en la actitud y participación durante la actividad, ya que no tenían que establecer fuerzas o pseudofuerzas para describir los efectos de desviación como en las actividades de los capítulos 3 y 4, así podemos deducir que los obstáculos en el desarrollo de las actividades se centraban en el concepto que ellos tenían de fuerza. Además, manifestaron que el análisis de las variables físicas en el experimento mental no generaba una motivación en ellos, mientras que los experimentos físicos aumentaban su interés.

En esta actividad, los estudiantes vincularon la dirección de la desviación que ocurre dentro de un movimiento en un marco de referencia en rotación (actividad anterior), con la desviación del péndulo según la ubicación del observador.

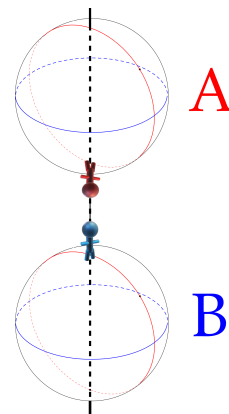
### **4.5. Actividad VI: Los Planetas como sistema de referencia no inercial**

Se propone a los estudiantes una última situación en la que ellos deben utilizar las ideas y conceptos que ellos desarrollaron durante todas las actividades. Para esto, nosotros planteamos un experimento mental en donde dos observadores, ubicados en los polos de dos planetas distintos deben establecer cuál se encuentra en rotación.

A continuación, presentaremos **la actividad de cierre en el aula VI: Planetas como sistema de referencia no inercial**. Esta actividad fue diseñada para un tiempo de 40 minutos y tiene como objetivo:

- Establecer que un planeta en rotación es un marco de referencia no inercial, realizando descripciones de efectos observables

**Situación planteada:** Aurora me ha contado que en un viaje espacial pudo observar a dos planetas que comparten un eje imaginario. Los habitantes de cada uno de estos planetas suelen agruparse en los polos, como se muestra en la Figura 36, y han tenido siempre un dilema., ¿Cuál planeta se encuentra en rotación? Los del planeta (A) aseguran que ven girar a los del planeta (B), mientras que los habitantes del planeta (B) aseguran que los que rotan son los del planeta A



**Figura 36:** Experimento mental con planetas

**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación de dos planetas con sujetos en los polos mas cercanos

### Cuestionario

Si usted tuviera que resolver este dilema, ¿Qué propondría para solucionar este dilema y cuáles serían sus argumentos como estudiante de física? Explique en detalle. **Aclaración:** No tenga en cuenta la translación de los planetas. **Sugerencia:** Tenga en cuenta las actividades que se han desarrollado en las anteriores sesiones.

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes sobre los planetas como sistema de referencia no inercial

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 27$ )

Tabla 14: Respuesta de los estudiantes al problema de los planetas en rotación

Respuestas	
Afirman que por tener la misma masa y estar unidos por un eje, los dos planetas rotan al tiempo, y que se encuentran en un sistema de referencia no inercial.	(7,4%, $N = 2$ )
Sustentan que, al compartir el mismo eje, los dos planetas están rotando y colocarían un péndulo en cada planeta para mirar la dirección del movimiento.	(26%, $N = 7$ )
Establecen los planetas como si el uno estuviera al lado del otro (sin tener en cuenta el eje) y aseveran que al tomar como referencia a los astros y su respectivo movimiento, así podrían saber cuál de los dos planetas está girando.	(14,8%, $N = 4$ )
Aseguran que para corroborar cuál de los dos planetas está rotando, colocarían un péndulo gigante en los polos de cada planeta, y si se desvían es porque se encuentran en un movimiento circular.	(51,8%, $N = 14$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

### Conclusiones de la actividad VI: Los Planetas como sistema de referencia no inercial

Encontramos que los estudiantes (26%,  $N = 7$ ) y el (51,8%,  $N = 14$ ) se remiten a la desviación del péndulo para establecer el movimiento de rotación de los planetas, como si las actividades II y III no hubieran sido significativas para establecer el estado de movimiento en los objetos, es decir, sus descripciones se limitaron a simplemente ubicar un objeto e inferir que si éste cambiaba de dirección cuando se encontraban en rotación. Así, los estudiantes describen los efectos en los cambios de dirección, pero nunca se preocuparon por el estudio de si existía una fuerza par responsable de esto.

Por otra parte, en sus descripciones traen elementos que no relacionan la rotación del planeta, por ejemplo: “la masa” a la hora de establecer un marco de referencia no inercial (7,4%,  $N = 2$ ); “el eje” es algo tangible y se utiliza como transmisor de movimiento y tomar “puntos de referencia” como los astros, para establecer el estado de movimiento (14,8%,  $N = 4$ ).

# Conclusiones finales

El experimento mental nos permitió indagar, detectar y discutir los efectos de inestabilidad que tiene un pasajero dentro de un móvil acelerado (marco de referencia no inercial). En varias ocasiones, los estudiantes simulaban como se comportaba su cuerpo al tomar una curva, al frenar o acelerar el móvil en el que se encontraban; pero, encontramos apatía y desinterés al analizar las variables físicas en estas situaciones, mientras que los experimentos físicos aumentaron su interés.

A pesar de que el docente encargado nos permitió trabajar todas las actividades propuestas, el tiempo fue insuficiente para que los estudiantes interiorizaran todos los conceptos involucrados para la descripción física del movimiento de rotación de la Tierra y sin los cuales no se puede tener una estructura y conocimiento coherente del mundo, no sólo científico sino del común.

Percibimos que parte del conocimiento de los estudiantes se divide en lo vivido diariamente y en lo estudiado en clase, lo cual crea un abismo entre ambos mundos, siendo esto un obstáculo a la hora de la construcción de los conceptos físicos implicados. El docente encargado y nuestra propuesta de aula trataron de eliminar dicha barrera con metodologías diferentes, pero nos encontramos con que la mayoría de los estudiantes no están acostumbrados a relacionar ambos mundos. Proponemos que este tipo de actividades experimentales, donde se incluya la experiencia como base para la construcción de conceptos físicos, se trabajen desde temprana edad para superar este tipo de dificultades.

Queremos destacar la importancia del estudio de los documentos originales de Foucault y Coriolis, lo cual permitió evidenciar las consideraciones que se tienen en cuenta para los conceptos en física, lo cual estructuró el marco teórico que sirvió de base para las actividades experimentales desarrolladas e implementadas con los estudiantes en el aula de clase.

Las prácticas experimentales evidenciaron en los estudiantes un problema en el análisis de la causa de la aceleración en los cuerpos dentro de un marco de referencia no inercial, y aunque podían nombrar las leyes de Newton, no se remitían a las descripciones que ellos le otorgaban a la fuerza desde su experiencia, lo cual constituyó un obstáculo en el desarrollo del concepto de pseudofuerza; por lo tanto, proponemos realizar las actividades desarrolladas en este trabajo, pero

incluyendo un capítulo en donde solo se estudie el concepto de fuerza.

Durante todo el proceso, la participación inicialmente era liderada por pocos estudiantes; el temor a equivocarse fue dejándose a un lado en el transcurso de las sesiones. En este sentido, el trabajar activamente con los estudiantes fue crucial para lograr involucrar a la gran mayoría en el proceso de proponer y comunicar sus predicciones.

Así nuestro objetivo general, en cuanto a la valoración de las actividades es positiva porque se logró indagar, detectar y discutir las ideas de movimiento que ya tenían los estudiantes, pero a su vez, encontramos que los estudiantes tienen deficiencia en el concepto de fuerza, y por tal razón, sus descripciones no terminan siendo coherentes en algunos casos con los marcos teóricos físicos.

# Apéndice A

## Anexos

### A.1. Marcos de referencia inerciales: análisis matemático

En el capítulo 1, realizamos el estudio desde un marco en reposo y su relación con otro marco a velocidad constante, podemos deducir las ecuaciones que describen el movimiento de un punto  $P$  desde ambos marcos de referencia, para esto, el marco de referencia en reposo tenemos que la distancia desde su origen  $O$  hasta un punto  $P$  es de:

$$x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} = \vec{r}$$

Mientras que para el marco de referencia a velocidad constante, la distancia hasta la partícula es de:

$$x'\hat{i}' + y'\hat{j}' + z'\hat{k}' = \vec{r}'$$

Podemos relacionar la distancia entre ambos marcos de referencia en un tiempo  $t$  por medio de la velocidad como:

$$\vec{R} = \vec{V} * t + \vec{R}_0$$

Así, la relación de transformación entre ambos marcos es:

Transformación de  $O'$  a  $O$

$$\begin{aligned}\vec{r} &= \vec{r}' + \vec{R} \\ \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{V} * t - \vec{R}_0\end{aligned}$$

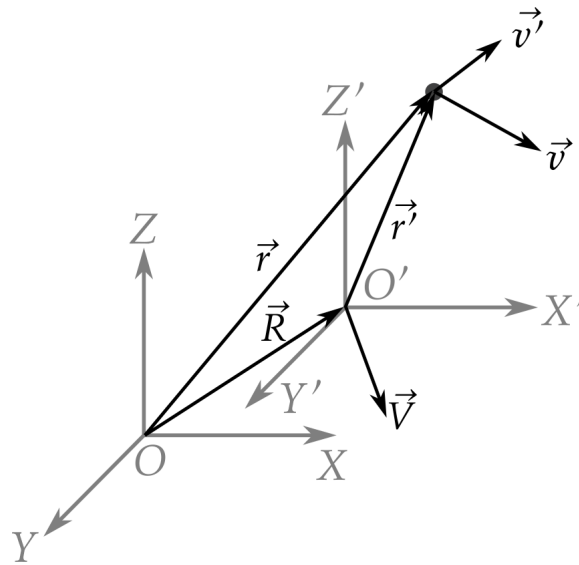
Transformación de  $O$  a  $O'$

$$\begin{aligned}\vec{r}' &= \vec{r} - \vec{R} \\ \vec{r} &= \vec{r}' + \vec{V} * t + \vec{R}_0\end{aligned}$$

Las ecuaciones paramétricas para ambos marcos son:

$$\begin{aligned}x &= x' + x_0 + V_x * t \\ y &= y' + y_0 + V_y * t \\ z &= z' + z_0 + V_z * t\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x' &= x - x_0 - V_x * t \\ y' &= y - y_0 - V_y * t \\ z' &= z - z_0 - V_z * t\end{aligned}$$



**Figura 37:** Marco en reposo O y marco a velocidad constante O'

**Fuente:** Adaptada de Icordonm (s.f., p.2)

**Nota:** Dos ejes coordenados, con los vectores posición y velocidad de un punto

Para Newton el tiempo transcurre igual para ambos observadores

$$t = t'$$

Si derivamos  $\vec{r}$  y  $\vec{r}'$  respecto al tiempo para tener la velocidad:<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}} &= \dot{\vec{r}}' + \vec{V}t & \dot{\vec{r}}' &= \dot{\vec{r}} - \vec{V}t \\ \vec{v} &= \vec{v}' + \vec{V} & \vec{v}' &= \vec{v} - \vec{V} \end{aligned}$$

Derivando de nuevo respecto al tiempo para obtener la aceleración:

$$\dot{\vec{v}} = \dot{\vec{v}}' + 0 = \vec{a}' \qquad \dot{\vec{v}}' = \dot{\vec{v}} - 0 = \vec{a}$$

Donde tenemos que  $\dot{\vec{v}}' = \dot{\vec{v}} = \vec{a}' = \vec{a}$ , lo cual la fuerza es igual para ambos marcos de referencia:

$$\begin{aligned} \vec{F}' &= \dot{\vec{p}}' = m\dot{\vec{v}}' & \vec{F} &= \dot{\vec{p}} = m\dot{\vec{v}} \\ &= m\vec{a}' = m\vec{a} & &= m\vec{a} = m\vec{a}' \\ \vec{F}' &= \vec{F} & \vec{F} &= \vec{F}' \end{aligned}$$

Tomado y adaptado de Icordonm (s.f., p.2)

<sup>1</sup>Utilizaremos la convención del punto de Newton para indicar la derivada respecto al tiempo, por ejemplo,  $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$

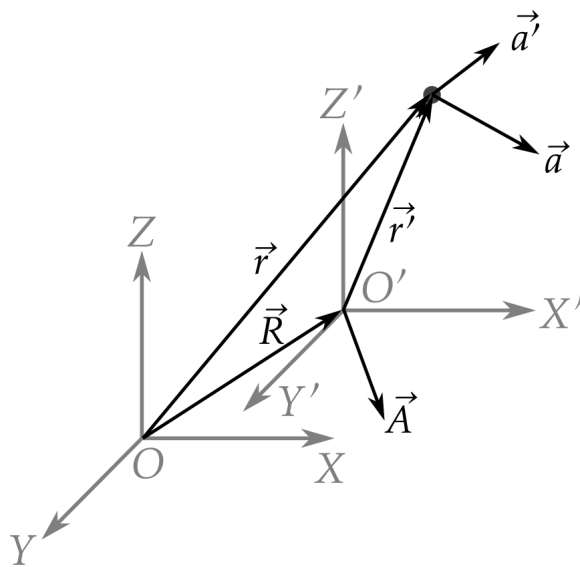
## A.2. Marcos de referencia uniformemente acelerado: análisis matemático

En el capítulo 2, realizamos el estudio de los marcos lineales uniformemente acelerados, es decir, que el cambio de rapidez es uniforme pero que no cambian de dirección. Podemos deducir las ecuaciones que describen el movimiento de una punto  $P$  desde el marco uniformemente acelerado y establecer una relación con un marco en reposo, para el marco de referencia inercial la distancia desde su origen hasta la punto  $P$  es de:

$$x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} = \vec{r}$$

Mientras que para el marco de referencia a aceleración constante, la distancia hasta la partícula es de:

$$x'\hat{i}' + y'\hat{j}' + z'\hat{k}' = \vec{r}'$$



**Figura 38:** Marco de referencia inercial  $O$  y marco lineal acelerado  $O'$  (no inercial)

**Fuente:** Adaptada de Icordonm (s.f., p.2)

**Nota:** Dos ejes coordenados, con los vectores posición y aceleración de un punto

Podemos relacionar la distancia entre ambos marcos de referencia en un tiempo  $t$  por medio de la aceleración uniforme como:

$$\vec{R} = \vec{R}_0 + \vec{V} * t + \frac{1}{2} * \vec{A} * t^2$$

Así, la relación de transformación entre  $O'$  a  $O$



$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{R}$$

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{R}_0 + \vec{V} * t + \frac{1}{2} \vec{A} t^2$$

Las ecuaciones paramétricas son:

$$x = x' + x_0 + V_x * t + \frac{1}{2} A_x t^2$$

$$y = y' + y_0 + V_y * t + \frac{1}{2} A_y t^2$$

$$z = z' + z_0 + V_z * t + \frac{1}{2} A_z t^2$$

$$t = t'$$

Si derivamos  $\vec{r}$  respecto al tiempo para tener la velocidad:

$$\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{r}}' + \vec{V} \dot{t} + \frac{1}{2} \vec{A} \dot{t}^2$$

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} + \vec{A}$$

Derivando de nuevo respecto al tiempo para obtener la aceleración:

$$\dot{\vec{v}} = \dot{\vec{v}}' + \dot{\vec{V}} + 0$$

$$\dot{\vec{v}} = \vec{a}' + \vec{A}$$

Teniendo la aceleración, podemos hallar la ecuación que describe la fuerza para el marco de referencia uniformemente acelerado:

$$\vec{F}' = \vec{P}' = m \vec{v}'$$

$$\vec{F}' = m(\vec{a}' + \vec{A})$$

$$\vec{F}' - m\vec{A} = m\vec{a}' \tag{A.1}$$

Al comparar la segunda Ley de Newton ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ) con la ecuación que hemos obtenido para el marco  $O'$ , notamos que existe el termino adicional  $-m\vec{A}$  que corresponde a la pseudofuerza que hemos estudiado en el capítulo 2.

Tomado y adaptado de Hazen y PIDD (1969, p.160)

### A.3. Marcos de referencia en movimiento circular uniforme: análisis matemático

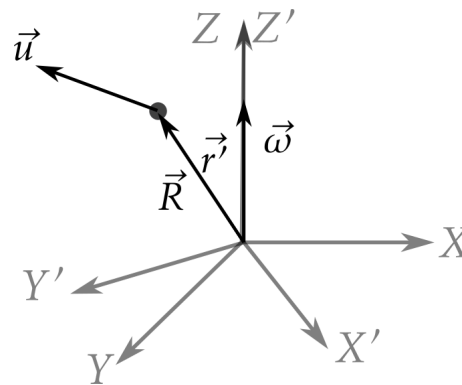
Durante los capítulos 3 y 4 se estudiaron los marcos de referencia en rotación uniforme  $\vec{\omega} = cte$  y las pseudofuerzas que en ellos aparecen; en el capítulo 4 establecimos que el objeto que se

encuentra dentro de la rotación de un marco  $O'$  se mueve a una velocidad constante  $\vec{u} = cte$ , así para el observador en reposo la distancia a  $P$  es :<sup>2</sup>

$$x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} = \vec{r}$$

Mientras que para el marco de referencia en rotación, la distancia hasta la partícula es de:

$$x'\hat{i}' + y'\hat{j}' + z'\hat{k}' = \vec{r}'$$



**Figura 39:** Marco de referencia inercial  $O$  y marco en rotación  $O'$  (no inercial)

**Fuente:** Propia

**Nota:** Dos ejes coordenados compartiendo el eje  $Z$ , con los vectores posición y velocidad de un punto

Ya que el sistema de coordenadas en rotación  $O'$  tiene distintos desplazamiento para todos los puntos, podemos simplificar el problema colocando el origen de ambos sistemas en el mismo punto y el vector rotación en  $O'$  será en la dirección  $Z'$ ; así, la ecuación que relaciona estos dos marcos es:

$$\vec{r} = r_x \cos \theta \hat{i} + r_y \sin \theta \hat{j} = r' \hat{r}'$$

Derivando la ecuación respecto al tiempo tenemos:

$$\dot{\vec{r}} = \dot{r}' \hat{r}' + r' \dot{\theta} \vec{u}'$$

Donde  $\vec{u}'$  es un vector normal a  $-\sin \theta \hat{i} + \cos \theta \hat{j}$ , físicamente representa la dirección de la velocidad medida desde el marco de referencia  $O'$ . Si volvemos a derivar  $\dot{\vec{r}}$  obtenemos la aceleración:

<sup>2</sup>Para una deducción matemática más completa, se recomienda leer SPIEGEL (2011, p.160).

$$\ddot{\vec{r}} = (\ddot{r}'\hat{r}' + \dot{r}'\dot{\hat{r}}') + (\dot{r}'\dot{\theta}'\vec{u}' + r'(\ddot{\theta}'\vec{u}' + \dot{\theta}'\dot{\vec{u}}'))$$

Sustituimos  $\dot{\theta}' = \omega$ ,  $\dot{\vec{u}}' = -\dot{\theta}'\hat{r}' = -\omega\hat{r}'$ , así tenemos:

$$\ddot{\vec{r}} = (\ddot{r}'\hat{r}' + \dot{r}'\omega\vec{u}') + (\dot{r}'\omega\vec{u}' + r'(\omega\dot{\vec{u}}' + \omega(-\omega\hat{r}')))$$

Sumando términos

$$\ddot{\vec{r}} = \ddot{r}'\hat{r}' + 2\dot{r}'\omega\vec{u}' + r'\omega\dot{\vec{u}}' - r'\omega^2\hat{r}'$$

Colocando en términos de aceleración y notación vectorial

$$\vec{a} = \vec{a}' + 2\omega \times \vec{u}' + \vec{\alpha} \times \vec{r}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}')$$

Donde:

- $\vec{a}'$ : Es la aceleración del punto  $P$ , respecto al marco en reposo.
- $\vec{a}$ : Es la aceleración del punto  $P$ , respecto al marco en rotación.
- $2\omega \times \vec{u}'$ : Es la aceleración de Coriolis.
- $\vec{\alpha} \times \vec{r}'$ : Es la aceleración angular, si el marco en rotación cambiara su velocidad angular.
- $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}')$ : Es la aceleración centrífuga.

Teniendo la aceleración podemos hallar la ecuación que describe la fuerza para el movimiento dentro del marco de referencia uniformemente acelerado:

$$\vec{F}' = m\vec{a}' = m\vec{a} - 2m(\omega \times \vec{u}') - m(\vec{\alpha} \times \vec{r}') + m(\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}'))$$

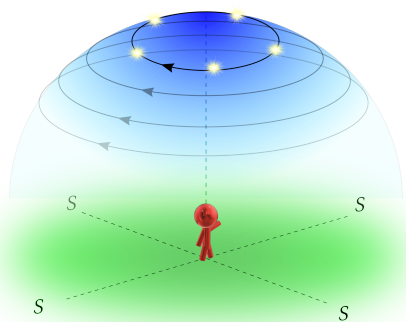
Al comparar la segunda Ley de Newton ( $\vec{F}' = m\vec{a}'$ ) con la ecuación que hemos obtenido para el marco  $O'$ , notamos que existen varios terminos adicionales, dos de los cuales corresponden a la pseudofuerza centrífuga ( $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}')$ ) estudiada en el capítulo 3 y la pseudofuerza de Coriolis  $2m(\omega \times \vec{u}')$  estudiado en el capítulo 4 .

Tomado y adaptado de SPIEGEL (2011, p.160)), (Moatti (2011, p.187)) y (Ibarra (2010, p.9)

## A.4. El sentido de giro de las estrellas

En el capítulo 4.2.1 se mostraron una serie de imágenes tomadas del programa Stellarium, donde se podía apreciar el movimiento aparente de las estrellas en lugares distintos de la Tierra; así, la velocidad angular que tenían las estrellas era la misma que se le otorgaba al observador en el planeta Tierra.

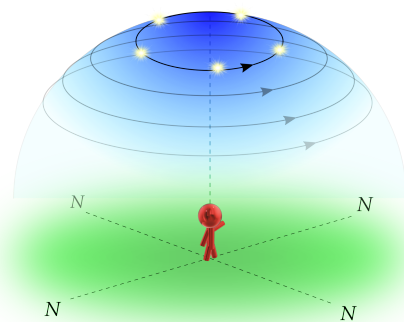
Si suponemos una bóveda celeste encontramos el siguiente sentido de las estrellas <sup>3</sup>



**Figura 40:** Sentido de giro de las estrellas en el polo Norte ( $90^{\circ}\text{N}$ ) por fuera de la bóveda celeste

**Fuente:** Adaptada de [www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html](http://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html)

**Nota:** Representación de la bóveda celeste con la trayectoria de las estrellas y su observador

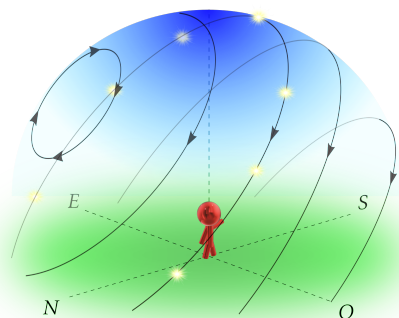


**Figura 41:** Sentido de giro de las estrellas en el polo Sur ( $90^{\circ}\text{S}$ ) por fuera de la bóveda celeste

**Fuente:** Adaptada de [www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html](http://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html)

**Nota:** Representación de la bóveda celeste con la trayectoria de las estrellas y su observador

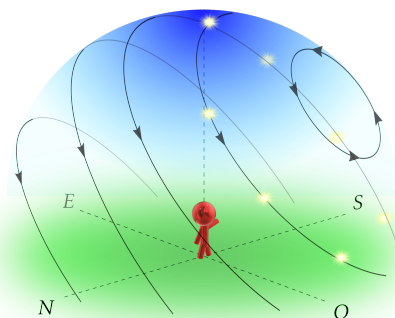
<sup>3</sup>Imágenes tomadas y adaptadas de <https://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html>



**Figura 42:** Sentido de giro de las estrellas en latitudes boreales medias ( $40^{\circ}\text{N}$ ) por fuera de la bóveda celeste

**Fuente:** Adaptada de [www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html](http://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html)

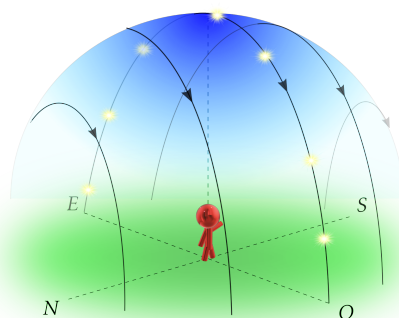
**Nota:** Representación de la bóveda celeste con la trayectoria de las estrellas y su observador



**Figura 43:** Sentido de giro de las estrellas en latitudes australes medias ( $40^{\circ}\text{S}$ ) por fuera de la bóveda celeste

**Fuente:** Adaptada de [www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html](http://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html)

**Nota:** Representación de la bóveda celeste con la trayectoria de las estrellas y su observador



**Figura 44:** Estrellas trazando direcciones paralelas en el Ecuador ( $0^{\circ}$ ) por fuera de la bóveda celeste

**Fuente:** Adaptada de [www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html](http://www.astronomia-iniciacion.com/movimiento-estrellas.html)

**Nota:** Representación de la bóveda celeste con la trayectoria de las estrellas y su observador

El lector podrá evidenciar que los sentidos de giro de las anteriores gráficas van en sentido contrario a las obtenidas del Stellarium, y no se trata de un error, ya que si hacemos el análisis de la velocidad angular del capítulo 3.2, pero esta vez vista desde la parte inferior, vamos a obtener que la velocidad angular va en la otra dirección, por lo tanto, la velocidad angular depende de la ubicación del observador, es decir, bajo una transformación de coordenadas el vector velocidad no se conserva.

Es por esto que Foucault (ver capítulo 4.2) toma el seno de la latitud multiplicado por la velocidad angular de la Tierra para describir la desviación del péndulo.

## A.5. Actividades

A continuación, mostraremos las guías trabajadas en la práctica con los estudiantes. Luego, algunas de las respuestas desarrolladas por ellos de acuerdo a las discusiones grupales que se llevaron a cabo y registros gráficos del trabajo que los estudiantes realizaron en el aula de clase.

### A.5.1. ACTIVIDAD I: Los movimientos a velocidad lineal constante y el reposo

#### Sesión I

Responda las siguientes preguntas de acuerdo con los videos mostrados

#### Película: "Ágora"

**Descripción de la situación:** Hipatía que va a velocidad constante en un barco observa cómo se deja caer un saco de arena desde el mástil por parte de un esclavo que también va en el barco al igual que el saco.

- ¿La velocidad del barco y la del saco de arena es constante o variable? ¿Por qué cree que es esa velocidad?
- ¿Se puede establecer alguna relación entre la velocidad del saco y la del barco? Justifique su respuesta

#### Documental: "El Universo Mecánico", parte 4

**Descripción de la situación (numeral 1):** Una persona que va sujeta en lo alto del mástil de un barco que va a velocidad constante lleva una pelota la cual deja caer hacia el suelo; la cámara la cual toma el video del evento se encuentra en reposo por fuera del barco

**Descripción de la situación (numeral 2):** Una persona que va sujeta en lo alto del mástil de un barco que va a velocidad constante, deja caer una pelota que se encuentra en reposo respecto a la cámara (es decir, no va con el sujeto); la cámara la cual toma el video del evento se encuentra en reposo por fuera del barco

- ¿Cómo es la trayectoria de la esfera cuando se lanza en movimiento con el barco?
- ¿Cómo es la trayectoria de la esfera cuando se hace caer fuera del movimiento del barco?
- ¿Encuentra alguna semejanza o diferencia en las trayectorias? Justifique su respuesta

#### Documental: PSSC

**Descripción de la situación:** Una persona sentada con una mesa al lado, donde no se puede distinguir si es el fondo o la persona la que se encuentra en movimiento.

1. Luego de ver el video, establezca los objetos que se encuentran en movimiento, ¿Cómo es la velocidad de cada uno de ellos?
2. ¿Qué conclusión puede obtener del numeral anterior?
3. ¿Cómo es la velocidad que lleva el objeto que está encima de la mesa según cada situación?

## Sesión II

### Experimento: Programa "Los Cazadores de Mitos"

**Descripción de la situación:** En una camioneta, el conductor trata de mantener a velocidad constante y que lleva un cañón en la parte trasera, se dispara en sentido contrario una esfera de boliche en a la misma rapidez con la que va el autor; se muestran las tomas de videos dentro y fuera de la camioneta.

- ¿Cómo es la velocidad del carro y de la esfera según el conductor? ¿Qué trayectoria cree que sigue la esfera según el conductor?
- ¿Cómo es la velocidad del carro y de la esfera según la cámara que se encuentra afuera? ¿Qué trayectoria cree que sigue la esfera?
- Siendo un mismo evento físico ¿Qué semejanzas podrían llegar a tener los dos observadores? ¿Qué condiciones debe tener un tercer observador para llegar a obtener las mismas semejanzas?

Responda las siguientes preguntas según los vídeos mostrados y relaciónelos de acuerdo con su experiencia:

#### Descripción de la situación:

- Avión: Se ubica un vaso lleno de gaseosa en una mesa nivelada durante un vuelo en el aire, la cámara muestra el comportamiento del vaso y luego la vista desde la ventana.
- Metro: Se ubica un vaso lleno de café en una mesa nivelada durante el desplazamiento del metro, la cámara muestra el comportamiento del vaso y luego la vista desde la ventana.
- Salón: Se coloca un vaso de agua en una mesa nivelada dentro del salón a la vista de todos los estudiantes.

Para las siguientes cuatro preguntas, represente por medio de un gráfico el comportamiento del líquido en los vasos

1. ¿Cómo describiría el comportamiento del líquido en los diferentes casos de movimiento?

2. ¿Se puede llegar a establecer alguna diferencia o semejanza?
3. ¿Cómo caracterizaría la velocidad que lleva el móvil en cada caso?
4. ¿Qué sucedería con el líquido si el móvil frena o acelera rápidamente



### A.5.2. ACTIVIDAD II: Procesos de indagación sobre los cambios de movimiento según marcos de referencia lineales acelerados

Supongamos que tenemos dos observadores, David y Aurora, que van a describir una misma situación. Aurora estará ubicada en la calle, y David de pie dentro de un Transmilenio en movimiento con velocidad constante. Si el conductor del Transmilenio oprime el freno rápidamente:<sup>4</sup>

- (a) ¿En qué dirección se moverá David si no se encuentra bien sujeto dentro del Transmilenio? ¿Seguirá alguna trayectoria particular con respecto al conductor?
- (b) ¿Qué quiere decir frenar bruscamente en términos de la aceleración?
- (c) Si usted fuera David, y está dentro del Transmilenio, ¿Cuál creería que es la causa de ese movimiento? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (d) Ahora, suponga que usted es Aurora y está ubicada en la calle observando cuando pasa el Transmilenio, ¿Cómo describiría la situación en términos de la velocidad? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (e) ¿Qué diferencia encuentra entre las velocidades que perciben Aurora y David?

---

<sup>4</sup>Algunas de las preguntas de la Actividades II y III se tomaron y se ajustaron del trabajo Adúriz y cols. (2000)

**A.5.3. ACTIVIDAD III: Procesos de indagación sobre los cambios de movimiento según marcos de referencia en rotación**

Supongamos que Aurora está ubicada en la calle, y David está sentado y durmiendo dentro de un Transmilenio que se mueve a una gran velocidad constante dentro de una glorieta.

- (a) Si usted fuera David y se despierta porque se siente empujado ¿Cuál considera que es la causa de esta sensación? Y ¿Hacia qué dirección es empujado? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (b) Si usted fuera Aurora ¿Cuál considera que es la causa del cambio de dirección de David?

#### A.5.4. ACTIVIDAD IV: Los movimientos dentro de marcos de referencia en rotación

Dejaremos caer una esfera desde un plano inclinado que se encuentra dentro de un carrusel inmóvil, la superficie del carrusel la cubriremos con una hoja blanca y papel carbón, de modo tal, que cuando la esfera termine su recorrido, la trayectoria quede marcada en el papel:

1. ¿Qué trayectoria dejó la marca de la esfera sobre la hoja de papel?

Ahora, dejaremos caer la esfera desde un plano inclinado con el carrusel en rotación, y con Movimiento Circular Uniforme.

2. ¿Qué trayectoria dejó la marca de la esfera sobre la hoja de papel?

Si existe un cambio entre las trayectorias de las situaciones 1 y 2, ¿Cuál sería la causa de ese cambio en la trayectoria?

Aurora y David reciben compañía, se llama Ana. En el borde del carrusel en movimiento se encuentran David y Ana, ubicados en extremos opuestos. El carrusel va girando en el sentido de las manecillas del reloj. Aurora se encuentra fuera del carrusel y le indica a David que lance en línea recta la esfera de un péndulo que se encuentra sostenido en el centro del carrusel, para que la esfera llegue hasta Ana.

- (a) ¿Qué trayectoria sigue la esfera? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.

Finalmente la esfera no llega hasta Ana. Parece que se ha desviado en el recorrido. Así que:

- (b) Si usted es Aurora y afirma que David si lanzó el péndulo en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?
- (c) Si usted es David y afirma que si lanzó la esfera en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?
- (d) Si usted fuera Aurora, ¿En qué dirección debe apuntar y lanzar la esfera para que se encuentre con Ana? Represente mediante un dibujo ese movimiento, indicando posibles causas, efectos y direcciones.

### A.5.5. ACTIVIDAD V: El movimiento de rotación de la Tierra

David quiere explicarle a Aurora cómo se imagina la rotación desde la Tierra. Utilizará las cámaras frontal y trasera del celular. La pantalla siempre estará de cara hacia el techo y en posición horizontal:

#### **Situación I**

David activa la cámara frontal. Aurora dibuja en una hoja pequeñas pero notorias estrellas y ubica la hoja a unos 5 cm de la pantalla. En la pantalla lo único que se observa es la hoja de papel con sus respectivas estrellas, en reposo.

David toma un video que captura la imagen de la cámara frontal mientras rota el celular en el sentido de las manecillas del reloj. La pantalla del celular siempre estará de cara hacia el techo y en posición horizontal. David pregunta, en el video: ¿Las estrellas giran en el sentido horario o anti horario? Dibújelo.

**Situación II** Ahora, David activa la cámara trasera. Aurora coloca nuevamente la misma hoja de papel, con las estrellas dibujadas, a unos 5 cm de la pantalla. David toma un video que captura la imagen con la cámara trasera mientras rota el celular en sentido contrario de las manecillas del reloj. Nuevamente pregunta:

En el video, ¿Las estrellas giran en el sentido horario o anti horario? Dibújelo.

¿Existe alguna diferencia entre el sentido de giro del celular y de las estrellas observadas?

Después de hacer esta actividad, Aurora le comenta a David que está segura de que los sentidos de giro serían iguales a los de las situaciones 1 y 2, si se rota la hoja y se deja inmóvil el celular.

¿Bajo qué condición Aurora tendría razón?

Para verificarlo, veámos las situaciones III y IV que Aurora propone:

David repite las situaciones I (Sentido de giro Horario) y II (Sentido de giro anti horario), pero ahora el celular está inmóvil y Aurora rota la hoja con sus respectivas estrellas.

**Situación III.** La hoja de papel, con las estrellas dibujadas, gira en el sentido horario.

**Situación IV.** La hoja de papel, con las estrellas dibujadas, gira en el sentido anti-horario.

#### **Situación V**

Hacia dónde se percibe que giran las estrellas cuando David se encuentra ubicado en el polo norte? y ¿hacia dónde, cuando se encuentra ubicado en el polo sur? ¿En qué sentido giran las estrellas cuando David se encuentra ubicado en el ecuador? Dibújelo en una tabla:

Con la ayuda del programa Stellarium, visualizaremos el movimiento de los objetos celestes como se si estuviéramos situados en los polos. Nos ubicamos en el polo Norte y luego en el polo sur; en ambos casos dirigimos la vista hacia el Cenit, posterior a esto, aumentamos la velocidad

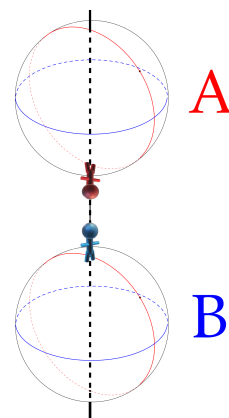
del reloj del programa, para que fuera posible visualizar el movimiento de los cuerpos celestes durante grandes lapsos de tiempo.

Según los sentidos de giro de las estrellas en el programa, responda las siguientes preguntas:

1. ¿Si ubicamos un péndulo en el polo norte, hacia dónde se percibe su desviación?
2. ¿Hacia dónde, cuándo se encuentra ubicado en el polo sur?
3. ¿En qué sentido deduciría que gira el péndulo cuando se encuentra ubicado en el Ecuador?

### A.5.6. ACTIVIDAD VI: Los planetas como sistema de referencia no inercial

**Situación planteada :** Aurora me ha contado que en un viaje espacial pudo observar a dos planetas que comparten un eje imaginario. Los habitantes de cada uno de estos planetas suelen agruparse en los polos, como se muestra en la Figura 45, y han tenido siempre un dilema, ¿Cuál planeta se encuentra en rotación? Los del planeta (A) aseguran que ven girar a los del planeta (B), mientras que los habitantes del planeta (B) aseguran que los que rotan son los del planeta A



**Figura 45:** Experimento mental con planetas

**Fuente:** Propia

**Nota:** Representación de dos planetas con sujetos en los polos mas cercanos

Si usted tuviera que resolver este dilema, ¿Qué propondría para solucionar este dilema y cuáles serían sus argumentos como estudiante de física? Explique en detalle.

**Aclaración:** No tenga en cuenta la translación de los planetas.

**Sugerencia:** Tenga en cuenta las actividades que se han desarrollado en las anteriores sesiones.

## A.6. Anexos sistematización

A continuación presentamos la sistematización faltante de las actividades mostradas a lo largo del trabajo

### A.6.1. Sistematización de la ACTIVIDAD I

#### Cuestionario

2. ¿Se puede establecer alguna relación entre la velocidad del saco y la del barco? Justifique su respuesta

#### Respuestas

#### Compendio da las respuestas dadas por los estudiantes

Tabla 15: Respuestas de los estudiantes para la velocidad del saco y el barco

Respuestas	
Afirman que la fuerza mantiene una velocidad constante y por tal razón, si existe una relación.	(4,5%, N = 1)
Argumentan que tienen la misma velocidad, entonces si se pueden relacionar.	(9,1%, N = 2)
Afirman que la fuerza mantiene una velocidad constante y por tal razón, no existe una relación.	(9,1%, N = 2)
Comparten la velocidad, excepto cuando el saco se encuentra en el aire (no descomponen la velocidad en coordenadas), y por ende, no se pueden relacionar.	(13,6%, N = 3)
No pueden establecer relación alguna, ya que tienen velocidades diferentes	(18,2%, N = 4)
Indeciso o contradictorio dentro de la misma respuestas.	(22,7%, N = 5)
Comparten la velocidad, ya que es constante, excepto cuando el saco está en el aire, y a pesar de que no descomponen la velocidad en coordenadas, si la pueden relacionar.	(27,3%, N = 6)

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Para este numeral, en algunos casos (18,2%, N = 4) el análisis se realizó durante la caída, por lo que hay respuestas en donde establecen que los movimiento son diferentes, como si fueran independientes; también que la existencia de la fuerza para mantener el barco a velocidad constante en algunos casos no permitirá establecer una relación entra la velocidad del saco y la del barco (9,1%, N = 2). Con lo anterior, inferimos que los estudiantes piensan que el estado "natural" de los objetos siempre es en reposo.

Cuando llegan a establecer la relación entre las velocidades, no justifican la respuesta (9,1%, N = 2), aunque en algunos estudiantes si establecen que la relación solo ocurre cuando el saco no está en caída (27,3%, N = 6).

Luego de la anterior actividad, proyectamos el documental “El Universo Mecánico” parte 4 y realizamos preguntas al respecto:

**Numeral 1:** *Una persona que va sujeta en lo alto del mástil de un barco que va a velocidad constante lleva una pelota la cual deja caer hacia el suelo; la cámara la cual toma el video del evento se encuentra en reposo por fuera del barco*

**Numeral 2:** *Una persona que va sujeta en lo alto del mástil de un barco que va a velocidad constante deja caer una pelota que se encuentra en reposo respecto a la cámara (es decir, no va con el sujeto); la cámara la cual toma el video del evento se encuentra en reposo por fuera del barco.*

### **Análisis físico de la situación**

Cuando el sujeto lleva consigo la esfera (numeral 1), la trayectoria de la esfera vista desde la cámara es una semi parábola, mientras que cuando el sujeto no lleva la esfera (numeral 2), es una línea recta.

### **Cuestionario**

- ¿Cómo es la trayectoria de la esfera cuando se lanza en movimiento con el barco?
- ¿Cómo es la trayectoria de la esfera cuando se hace caer fuera del movimiento del barco?
- ¿Encuentra alguna semejanza o diferencia en las trayectorias? Justifique su respuesta



## Respuestas

### Compendio de las respuestas dada por los estudiantes

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 25$ )

Tabla 16: Respuesta de la trayectoria de un objeto en caída en movimiento horizontal

Trayectoria	Curva	Recta vertical	Recta diagonal
Numeral 1	(7,4%, $N = 2$ )	(84%, $N = 21$ )	(12%, $N = 3$ )
Numeral 2	(20%, $N = 5$ )	(52%, $N = 13$ )	(28%, $N = 7$ )

Fuente: Propia

Nota: Se ubica el numeral a la izquierda y a su lado las diferentes trayectorias

Tabla 17: Respuestas de los estudiantes en la semejanza o diferencias de un objeto en caída desde dos perspectivas

Respuestas	
Establecen objetos de referencia para decir que es una recta, en ambos casos.	(4%, $N = 1$ )
Determinan referencias y describe correctamente las trayectorias según los observadores.	(4%, $N = 1$ )
No encuentran semejanzas.	(4%, $N = 1$ )
Asignan referencias y describe incorrectamente las trayectorias según el tipo de observador.	(8%, $N = 2$ )
Afirman que las trayectorias son diferentes y solo se le agrega una velocidad horizontal.	(12%, $N = 3$ )
Aseveran que las trayectorias son iguales y no se ve afectado por la velocidad constante.	(16%, $N = 4$ )
Argumentan que las trayectorias son diferentes, ya que para el numeral 2 aplica una fuerza y esto hace que cambie la trayectoria.	(20%, $N = 5$ )
Aseveran que las trayectorias son iguales y no se ve afectado por la velocidad constante.	(32%, $N = 8$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Al momento de plantear esta situación, se esperaba que las trayectorias fueran siempre desde fuera del movimiento del barco, es decir como lo muestra la cámara, pero para la situación del numeral 1, la descripción de la trayectoria se realizaba como si el observador estuviera dentro del barco o bien si se tomaba el barco como referencia (84%,  $N = 21$ ), pero ellos en ningún momento colocan de manifiesto que la observación de la trayectoria se hace desde dentro del barco.

Algunos afirmaron que las trayectorias son iguales, y solo cambia la forma en la que se arroja la esfera (32%,  $N = 8$ ). No parece extraño para ellos, ya que es común observar los objetos caer cuando el observador y el lanzador se encuentran en reposo entre sí.

Para la trayectoria diagonal y curva, los estudiantes no argumentaron alguna de las dos, sino que era vertical debida a la gravedad (100%,  $N = 25$ ), y horizontal debido a la velocidad del barco

(12%,  $N = 3$ ), o a la fuerza que le imprimía el sujeto en esa dirección (20%,  $N = 5$ ).

Nos parece valioso rescatar el intento de establecer referencias para describir las trayectorias (4%,  $N = 1$ ), ya que en la socialización permitió aclararles las posibles trayectorias.

Al terminar el documental anterior, proyectamos el segundo documental "PSSC" y realizamos preguntas al respecto:

**Situación:** *Una persona sentada con una mesa al lado, donde no se puede distinguir si es el fondo o la persona la que se encuentra en movimiento.*<sup>5</sup>

### **Cuestionario**

*Luego de ver el video, establezca los objetos que se encuentran en movimiento, ¿Cómo es la velocidad de cada uno de ellos?*

---

<sup>5</sup>Al transcurrir el video se observa que una persona mueve el fondo, pero el video se cortó antes de observar dicha persona

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dada por los estudiantes

Tabla 18: Objetos que se encuentran en movimiento en el video "PSSC" según los estudiantes

Objeto	Constante
Fondo o pantalla	12
Presentador	7
Cámara	4
No se puede asegurar	6

**Fuente:** Propia

**Nota:** Objeto que se encuentra en movimiento según cierto numero de estudiante

Tabla 19: Respuesta de los estudiantes argumentando porqué de la velocidad constante

Respuestas	#
La causa de que el movimiento sea constante es debido a una edición por computadora del video, que simula el movimiento del fondo.	1
No se puede asegurar cual objeto se encuentra en movimiento, pero el que si lo hace, va a velocidad constante.	1
La cámara, el presentador y la mesa son los que realmente se mueven, el percibir que el fondo es el que se mueve se trata de una ilusión óptica.	2
Existe la dificultad de establecer que objetos se encuentran en movimiento y la razón es porque van a velocidad constante.	3
Según el punto de referencia, se puede indicar que objeto se encuentra en movimiento.	4

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas con su respectivo número de estudiantes

En algunos momentos, los estudiantes (N=6) afirmaban en sus escritos que se movía cierto objeto debido a unas sombras que percibían, pero intentaban dejar la respuesta abierta al decir que podría ser que los otros objetos se encontraban en movimiento; Por otra parte, era curioso que algunos otorgaran la velocidad solo a la cámara (N=4), ya que de ser así, el fondo no iría en sentido contrario al presentador.

Para todos los estudiantes (100%,  $N = 25$ ), era evidente que se trataba de una velocidad constante, y aunque no pedíamos argumento alguno, ellos trataron de explicar el por qué.

Es interesante como ciertos estudiantes (N=3) explican la dificultad de distinguir cuando un objeto se encuentra en movimiento a velocidad constante, ya que cualquier objeto puede estar desplazándose, de hecho, es muy próximo al objetivo de la actividad, y empieza hacer importante para ellos establecer una referencia para hablar del movimiento (N=4).

Creemos útil la ayuda de los videos, debido a la dificultad de mantener un estado de velocidad constante contrarrestando la fuerza de fricción. Éstos fueron escogidos de tal manera que la velocidad de los objetos pueda ser repetitiva. En la socialización se mostró la totalidad del video para que ellos como estudiantes pudiesen despejar cualquier tipo de duda al respecto.

Al terminar el documental anterior, proyectamos un experimento del programa “Los Cazadores de Mitos” sobre el tema, y realizamos preguntas al respecto:

**Situación:** *En una camioneta que el conductor trata de mantener a velocidad constante y que lleva un cañón en la parte trasera, se dispara en sentido contrario una esfera de boliche en a la misma rapidez con la que va el autor; se muestran las tomas de videos dentro y fuera de la camioneta.*

**Análisis físico de la situación:** La velocidad del carro es constante, la velocidad de la esfera vista desde dentro del auto es en reposo antes de ser disparada, y luego de ser disparada su trayectoria es parabólica, es decir, es acelerada hacia el suelo y lleva una velocidad constante horizontalmente. Vista la esfera desde fuera del auto, ésta va a la misma velocidad del auto antes y después de ser disparada, y su trayectoria es en línea recta hacia el suelo, porque sale a la misma rapidez, pero en sentido contrario a la que va el auto, yendo acelerada hacia el suelo.

**Observaciones:** *El numeral 3 de este video es de gran complejidad y abstracción, ya que para una respuesta cercana al razonamiento físico se debe tener en cuenta que el tercer observador debe encontrarse a velocidad constante como en todos los videos (entre ellos el reposo), y lo que tendrían en común es la aceleración de los objetos, como en el caso de la caída de los cuerpos en los videos “Ágora”, “El Universo Mecánico” y “Los Cazadores de Mitos”.*

### Cuestionario

- ¿Cómo es la velocidad del carro y de la esfera según el conductor? ¿Qué trayectoria cree que sigue la esfera según el conductor?
- ¿Cómo es la velocidad del carro y de la esfera según la cámara que se encuentra afuera? ¿Qué trayectoria cree que sigue la esfera?
- Siendo un mismo evento físico ¿Qué semejanzas podrían llegar a tener los dos observadores en sus descripciones del evento físico? ¿Qué condiciones debe tener un tercer observador para llegar a obtener las mismas semejanzas?

### Nomenclatura:

Obj./Vel.= Objeto con velocidad, Cte= Constante, Conti.= Continua, Discon.= Discontinua, V/ble.= Variable, Acel.= Acelerada, Rep.= Reposo, R.h. y d. = Recta horizontal y diagonal, H. y v.= Horizontal y vertical, S. Parábola= Semi parábola

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes

Tabla 20: Velocidad del carro y la esfera en el programa para el conductor en "Los cazadores de mitos" según los estudiantes

Observador	Obj./Vel.	Cte.	Conti.	Discon.	Vble.	Acel.	Rep.
<b>Conductor</b>	Carro	14	3	0	2	2	6
	Esfera	4	2	3	4	6	3
<b>Cámara</b>	Carro	15	4	0	0	2	0
	Esfera	4	0	4	2	13	0

**Fuente:** Propia

**Nota:** Ubicación del observador seguido del objeto y su velocidad

Tabla 21: Velocidad del carro y la esfera en el programa para la cámara fuera del carro en "Los cazadores de mitos" según los estudiantes

Observador	Obj.	Para.	R.h. y d.	H. y v.	Rec. Vert.	S. Parábola	Diag.
<b>Conductor</b>	Esf.	10	2	2	2	4	3
<b>Cámara</b>	Esf.	4	3	0	15	1	0

**Fuente:** Propia

**Nota:** Ubicación del observador, seguido del objeto y su velocidad

Tabla 22: Semejanza de los dos observadores en la caída de una esfera en "Los Cazadores de Mitos" según los estudiantes

Semejanzas de los observadores	Respuestas comunes	#
La dirección de la esfera		1
No saber, no responde		2
No entiendo la pregunta		2
No existen semejanza		2
Se aleja el conductor de la cámara		2
velocidad del móvil es constante		3
Trayectoria de la esfera		6
La velocidad constante del vehículo y la esfera es acelerada hacia el suelo		7

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas con su respectivo número de estudiantes

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes

Tabla 23: Condiciones para que dos observadores tengan semejanzas según los estudiantes

Condiciones de los observadores	Respuestas comunes	#
Tercer en cuenta un tercer observador		–
Ubicarse detrás del carro		3
Ver al conductor y a la cámara		2
Otra perspectiva (superior)		4
No entiende la pregunta		1

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas con su respectivo número de estudiantes

Al igual que en la actividad de la película "Ágora", no fue posible sacar porcentajes, debido a que no dividen los momentos en antes y después del lanzamiento de la esfera. También disminuyó el número de estudiantes (N=6) que afirmaron que el conductor observaba que la esfera se encontraba en reposo antes del lanzamiento. Creemos que esto es debido a que se observa al conductor quien es el que mantiene el carro a velocidad constante.

Solo en un caso, en medio de la socialización, fue posible establecer que la velocidad continua hacía referencia cuando la esfera se encontraba cayendo y discontinua después de tocar el suelo, por lo que se puede interpretar que continua se refiere al mantener la dirección y discontinua cuando esta cambia. De nuevo, los estudiantes otorgan velocidad constante (N=14 y N=15) al movimiento del carro.

En este caso, para la trayectoria de la esfera se encuentran respuestas como "recta horizontal y diagonal" (N=2), y se cree que esto es debido a que la toma de la cámara por fuera del automóvil es en cámara lenta al inicio de la caída. Para la trayectoria vista por el conductor, si existe un mayor número de estudiantes (N=10), ya que afirman que el movimiento es parabólico, como si esto fuera debido a la acción de imprimirle una fuerza horizontal, más no de un estado de velocidad constante en dirección horizontal.

Aunque la condición de los observadores es tener una velocidad constante, los estudiantes (N=7) lo ubican como una semejanza, es decir, sus observaciones terminan siendo siempre por fuera del estado de movimiento, aun cuando sus descripciones sean dentro de este estado; de la misma forma, establecen la caída de los cuerpos como algo en común, pero no debido a la aceleración, sino al fenómeno de caída que se repite en varios videos, por lo que para ellos no resulta importante la aceleración en sus descripciones.

Debido a que la pregunta estaba dentro de un mismo numeral, los estudiantes realizaron una

sola respuesta, como sí la condición y las semejanzas fueran sinónimos; en consecuencia, solo 10 estudiantes, establecieron condiciones para un tercer observador y todas ellas eran debido a la ubicación, más no a un estado de velocidad constante.

**Registros gráficos ACTIVIDAD I**

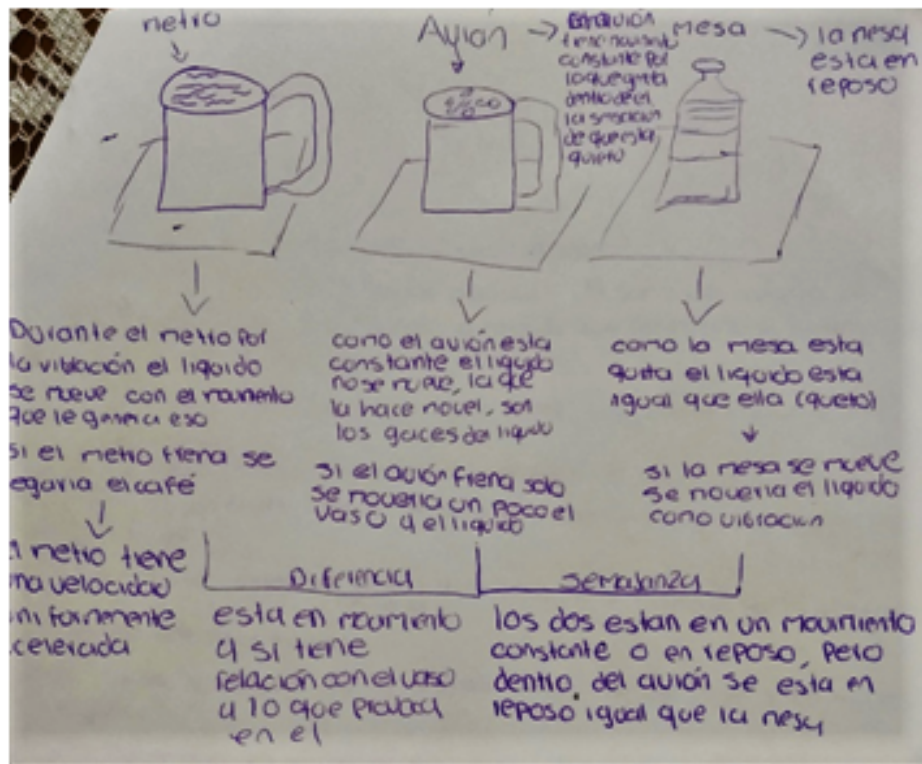


Figura 46: Representación de los líquidos en los 3 casos expuestos de la actividad 1

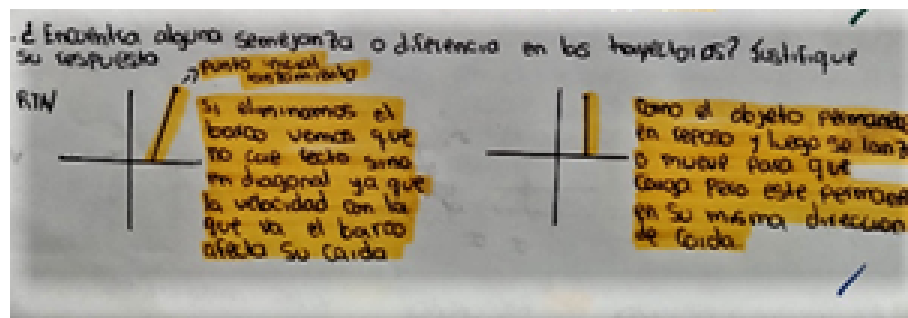



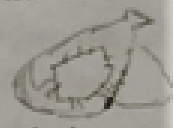
Figura 47: Trayectoria del saco de arena de la película "Ágora" vista por dos observadores

Actividad 0

Primera Parte

1. ¿Cómo es la velocidad del barco y del saco de arena?

R/ Barco = Constante      Saco Antes = Constante  
 Colgado = Caída Libre/Acelerado  
 Después = Constante

2. ¿Se puede establecer alguna relación entre la velocidad del barco y la del saco?

R/ Cuando la velocidad del saco es constante, el saco se mueve a la misma velocidad del barco; cuando el saco cae su velocidad se vuelve independiente del barco, por lo que el saco caerá en una posición diferente a la posición en la que quedaría si el barco no se moviera (Fig 1.)

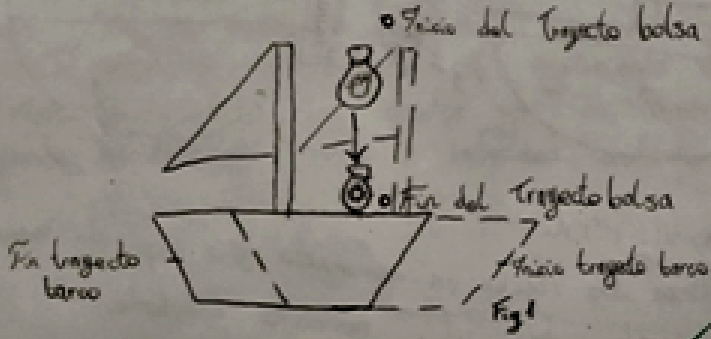


Fig 1

Figura 48: Trayectoria del saco de arena de la película "Ágora"



Documental: El universo mecánico

1. ¿Cuál es la trayectoria de la esfera cuando se lanza en movimiento con el barco?

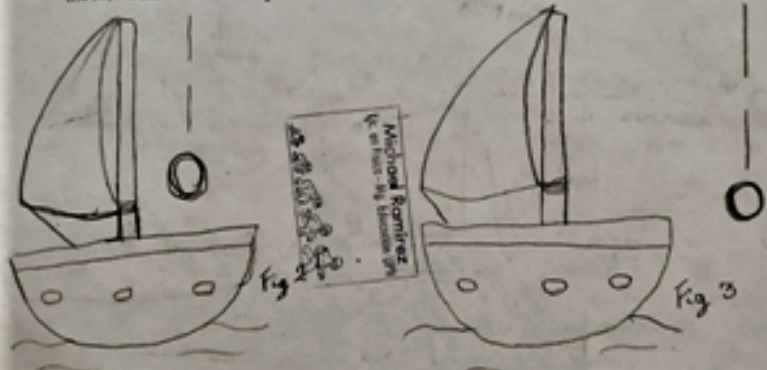
R/ Es una línea recta. Respecto del mástil (fig 2)

2. ¿Cuál es la trayectoria de la esfera cuando se lanza fuera del movimiento del barco?

R/ Es una línea recta. (fig 3)

3. ¿Encuentra alguna semejanza o diferencia de las trayectorias? Justifique

R/ Son trayectorias iguales. Cuando la pelota cae esta fuera del barco por lo que no se ve afectada por su movimiento



Documental: PSSC

1. Establezca los objetos en movimiento y su tipo de movimiento.

R/ El fondo del set, movimiento constante.

Figura 49: Trayectoria de la esfera del documental "El Universo Mecánico", parte 4

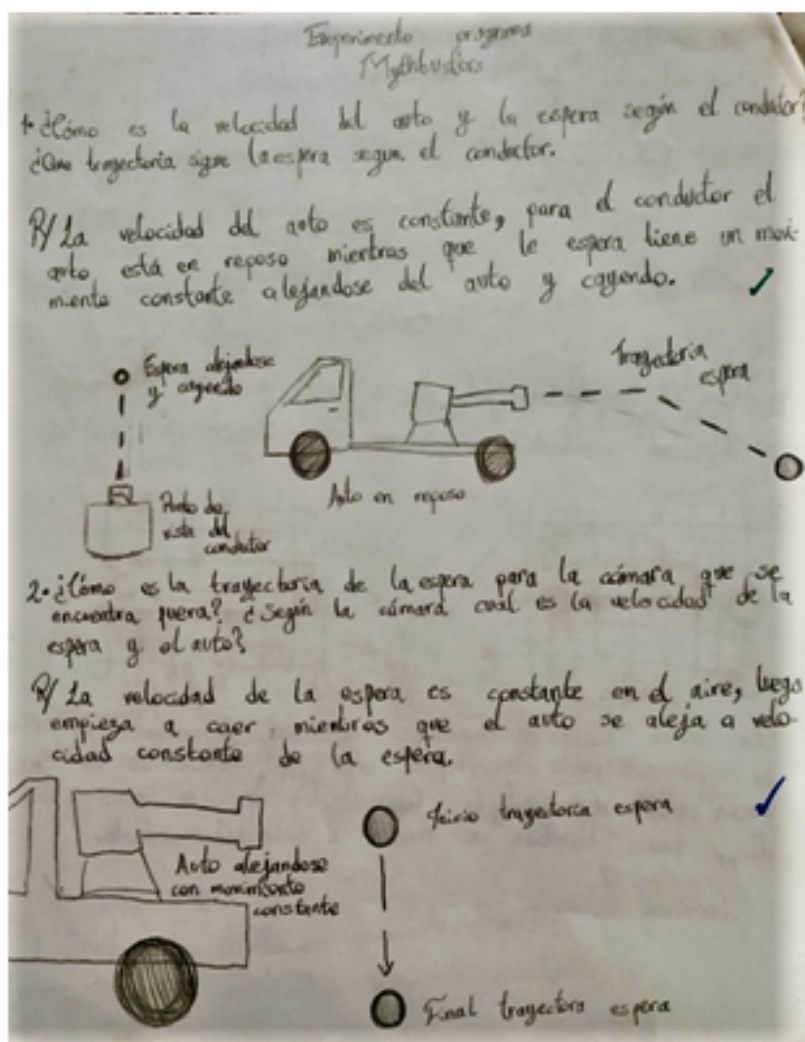


Figura 50: Trayectoria de la esfera del experimento: Programa "Los Cazadores de Mitos"

### A.6.2. Sistematización de la ACTIVIDAD II

#### Cuestionario

- (a) ¿En qué dirección se moverá David si no se encuentra bien sujeto dentro del Transmilenio? ¿Seguirá alguna trayectoria particular con respecto al conductor?
- (b) ¿Qué quiere decir frenar bruscamente en términos de la aceleración?
- (c) Si usted fuera David, y está dentro del Transmilenio, ¿Cuál creería que es la causa de ese movimiento? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (d) Ahora, suponga que usted es Aurora y está ubicada en la calle observando cuando pasa el Transmilenio, ¿Cómo describiría, la situación en términos de la velocidad? Represente mediante un dibujo la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones. ¿Qué diferencia encuentra entre las velocidades que perciben Aurora y David

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

#### **Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista para David**

**Clave de respuesta:** c) David va a la misma velocidad del móvil y la causa de su empuje es la desaceleración de éste, ya que el conductor frena de una manera repentina. David sigue en la misma dirección y con la misma velocidad que se encontraba.

**Análisis físico de la situación:** Cuando se frena se puede apreciar que se tiende a ir hacia adelante, como si algo impulsara. Pero resulta que nada empuja, sino que es un caso de la inercia actuando. Esto quiere decir, que si no actúa una fuerza externa sobre un cuerpo, éste permanecerá en su estado original, ya sea de movimiento o de reposo. David deduce entonces, que se encuentra en reposo y no existe una causa de empuje, ya que ningún cuerpo ejerce alguna fuerza para acelerarlo; en consecuencia, David se encuentra inmerso en un marco de referencia no inercial y le atribuye a esta percepción una pseudofuerza; la dirección de esta pseudofuerza ira siempre en sentido contrario a la aceleración del marco no inercial.

Con respecto al móvil (Transmilenio), David se encuentra en estado de movimiento, porque está en el auto mismo. Pero cuando éste frena, la fuerza del freno se aplica al Transmilenio, y no a David. Entonces cuando la fuerza del freno se aplica al móvil, éste disminuye su movimiento, pero David no, ya que la fuerza es externa y no actúa sobre él. En consecuencia, el movimiento de David tenderá a permanecer como estaba, es decir, con la velocidad del auto antes de frenar. Una vez que el Transmilenio reduce su velocidad, parece que David se “impulsa” hacia adelante,

pero no es más que su inercia, y su movimiento resulta ser mayor que el del Transmilenio que está frenando.

### Respuestas

#### Compendio de las respuestas dada por los estudiantes

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 17$ )

Tabla 24: Respuesta de los estudiantes de la causa de aceleración según la perspectiva de David cuando el Transmilenio cambia de rapidez

Respuestas	
Nombran que existe una fuerza, pero no logran relacionarla a ningún objeto.	(5,9%, $N = 1$ )
Señalan la causa de “salir disparado” a la inercia, argumentando que los cuerpos son independientes, pero sin definir con exactitud la aceleración ni la velocidad de cada cuerpo.	(17,6%, $N = 3$ )
Establecen que los cuerpos son independientes y atribuyen de forma correcta las variables (velocidad y aceleración) .	(17,6%, $N = 3$ )
Asignan el empuje a una fuerza que es propia de David que lo acompaña hasta que se detiene. .	(23,5%, $N = 4$ )
Atribuyen la causa de “salir disparado” a la inercia, pero sin poder dar cuenta de lo que entienden por esta palabra.	(35,3%, $N = 6$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Todo lo anterior nos hace suponer que, las concepciones que tienen los estudiantes sobre los cambios de movimiento en los sistemas de referencia fijos, y que por ende reflejan en sus respuestas, no han sido muy influidas por la enseñanza de la física, sino por sus vivencias en los diferentes medios de transporte y percibido desde fuera de éstos.

Cada uno de los anteriores aspectos reúne apreciaciones importantes de las respuestas de los estudiantes, como refleja la siguiente tabla:

### Compendio de las respuestas dada por los estudiantes

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 25$ )

Tabla 25: Comparación de las respuestas de David y Aurora según los estudiantes para un movimiento a rapidez variable

	Respuestas diferentes perspectiva David	Respuestas diferentes perspectiva Aurora	Respuestas coincidentes en ambas perspectivas
$N_T = 17$	(58,8%, $N = 10$ )	(35,3%, $N = 6$ )	(82,4%, $N = 14$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Comparación de las respuesta y el número de estudiantes

Con respecto al cuadro anterior, podemos llegar a concluir que más del 80% (82,4%,  $N = 14$ ) de los estudiantes piensan de igual manera con respecto a la independencia de cada uno de los objetos contemplados en el experimento (David y el Transmilenio) y según la mirada de los dos observadores (Aurora y David), asignándoles correctamente la velocidad y la aceleración correspondientes.

También coinciden en que actúa una fuerza sobre la partícula (en este caso, sobre David) que hace que ésta mantenga su estado de movimiento (en línea recta) con una rapidez constante hasta que éste se detiene.

Esta actividad deja ver que la mayoría de los estudiantes si llegaron a establecer los objetivos propuestos y esto es evidente con el porcentaje de estudiantes que describieron y establecieron que dos observadores perciben aceleraciones y fuerzas distintas actuando sobre un cuerpo.

#### Cuestionario

- (a) Si usted fuera David y se despierta porque se siente empujado ¿Cuál considera que es la causa de esta sensación? Y ¿Hacia qué dirección es empujado? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento, indicando posibles causas, efectos y direcciones.
- (b) Si usted fuera Aurora ¿Cuál considera que es la causa del cambio de dirección de David?

Nosotros proponemos que los estudiantes puedan desarrollar un análisis como el que presentamos a continuación:

#### Respuesta esperada según el análisis de la situación prevista para Aurora

**Clave de respuesta: b)** Para Aurora, esto se debe a que David al no hacer parte del Transmilenio no tiene la misma aceleración, por lo que debe seguir en línea recta; esto hace que David perciba un desbalance con respecto al móvil.

**Análisis físico de la situación b)** Un observador inercial como Aurora ve que David describe un círculo con una aceleración centrípeta.

### Respuestas

#### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes

**Total de estudiantes en la sesión:** ( $N_T = 34$ )

Tabla 26: Respuesta de los estudiantes según la perspectiva de Aurora para un movimiento en cambio de rapidez

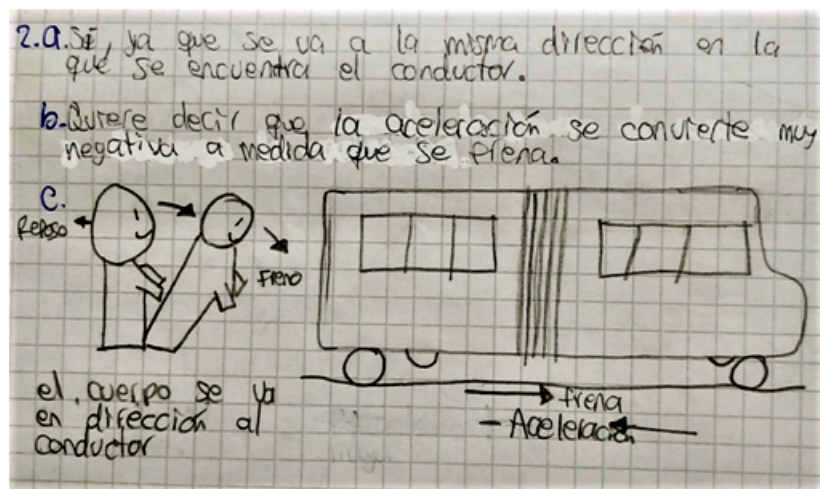
Respuestas	
Otorgan tanto a David como al móvil la misma dirección y velocidad.	(2,9%, $N = 1$ )
Establecen que el conductor es el causante del cambio de dirección del objeto.	(2,9%, $N = 1$ )
Determinan que la causa es la fuerza de inercia, sin argumentar el porqué de ésta.	(5,9%, $N = 2$ )
Atribuyen el cambio en la dirección del móvil a la variación en la rapidez de éste, argumentando que su fuerza centrípeta desvía los objetos y estos pierdan su curso.	(5,9%, $N = 2$ )
No sabe / No responde	(29,4%, $N = 10$ )
Asignan la causa del cambio de dirección del objeto a una fuerza que lo empuja hacia el lado contrario al que gira el móvil.	(53%, $N = 18$ )

**Fuente:** Propia

**Nota:** Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Esta actividad prueba, que la mayoría de los estudiantes no llegó a establecer el objetivo propuestos y esto es evidente con el porcentaje de estudiantes que llegaron a describir y establecer que como no hay ninguna causa aparente que de origen a esta aceleración según su sistema de referencia, y para llegar a justificarla, la llegan a representar como una fuerza ficticia que da lugar al mismo resultado, pero sin interiorizar el porqué de ésta y así justificarla.

## Registros gráficos ACTIVIDAD II



**Figura 51:** Descripción de la aceleración y comportamiento del cuerpo cuando el móvil en el que se encuentra frena

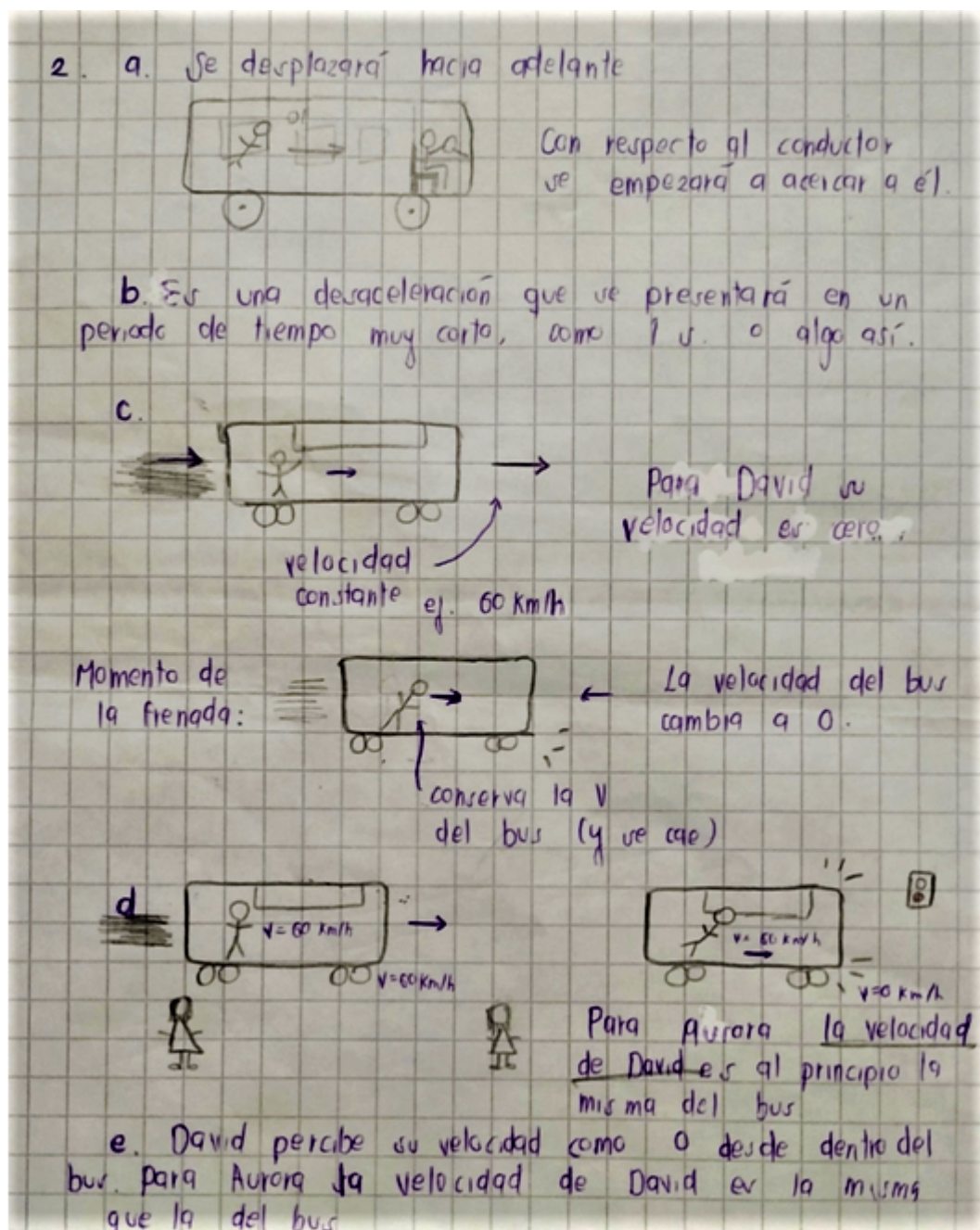


Figura 52: Descripción del comportamiento del cuerpo cuando el móvil en el que se encuentra cambia de rapidez



A.6.3. Sistematización de la ACTIVIDAD III

La sistematización completa de las respuestas de los estudiantes se encuentra en el Capítulo 3

Registros gráficos ACTIVIDAD III

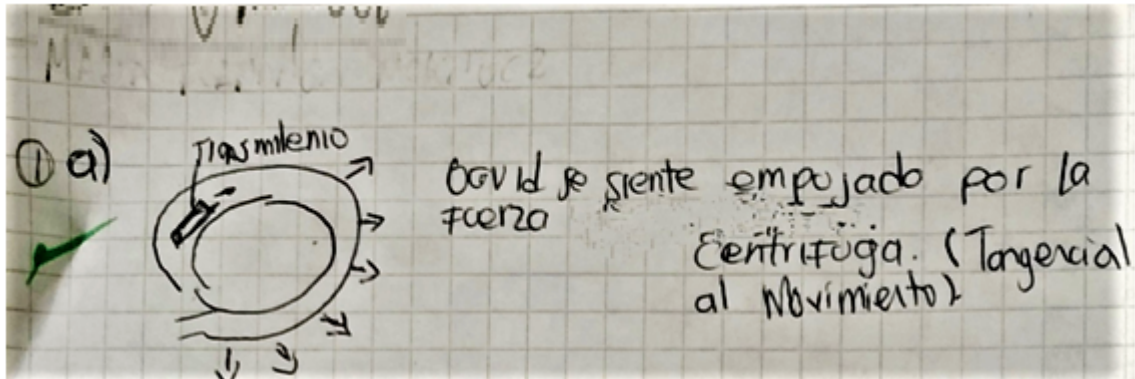


Figura 53: Descripción de la "fuerza centrífuga" para un movimiento circular

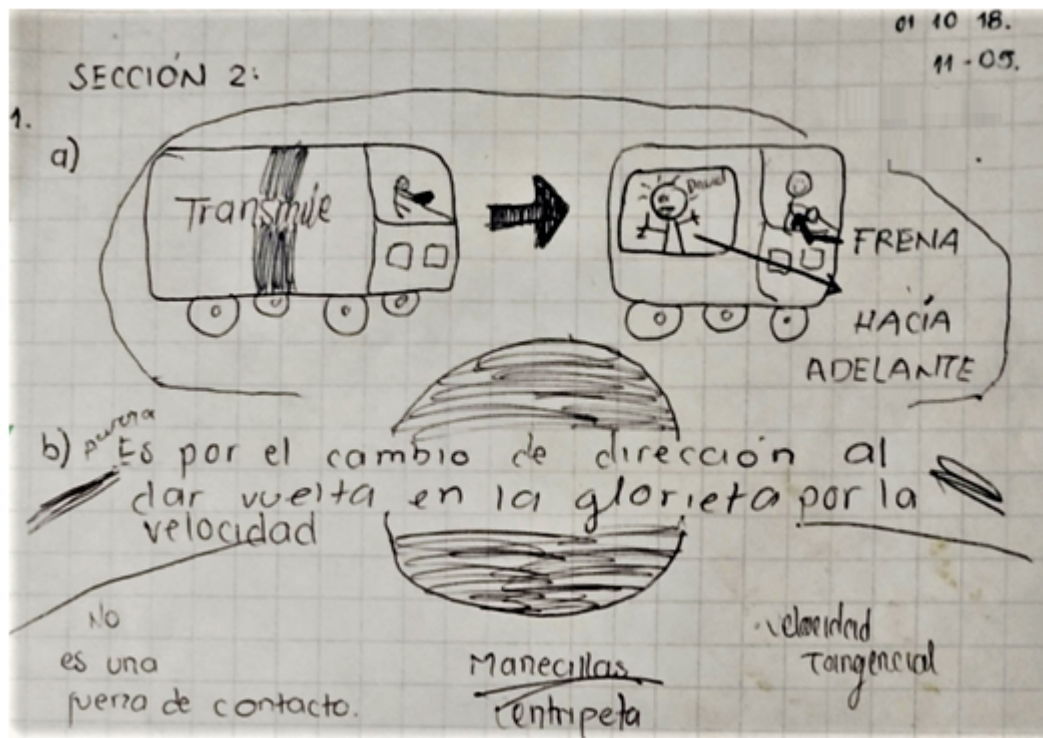
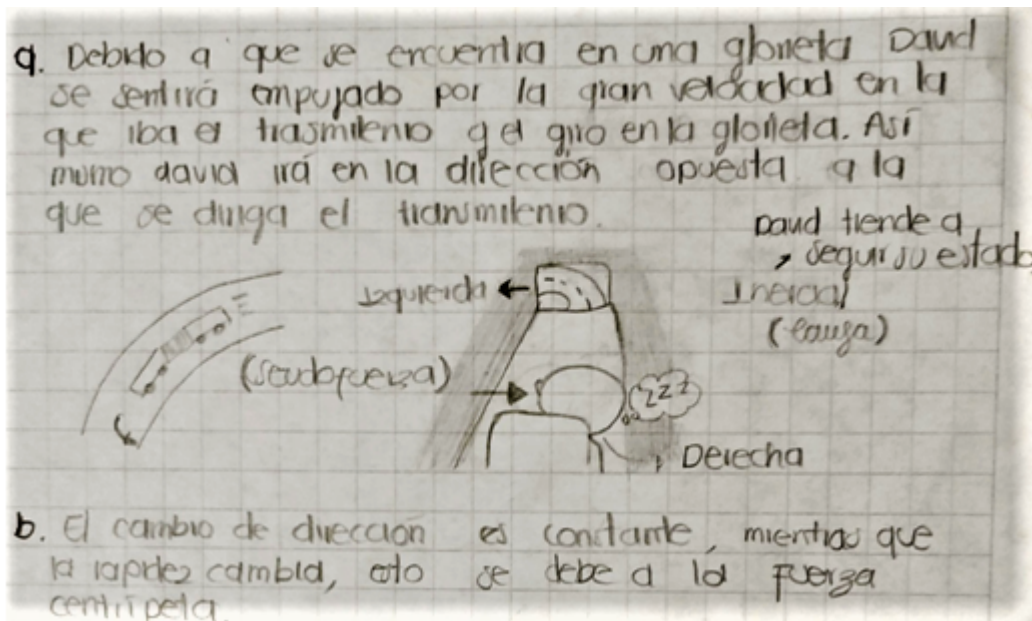


Figura 54: Descripción de un móvil que cambia de dirección



**Figura 55:** Descripción de la pseudofuerza que siente un pasajero que se encuentra dentro de un movimiento circular

#### A.6.4. Sistematización de la ACTIVIDAD IV

##### Cuestionario

- ¿Qué trayectoria sigue la esfera? Represente mediante un dibujo, la evolución de todo el movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones. Finalmente, la esfera no llega hasta Ana. Parece que se ha desviado en el recorrido. Así que:
- Si usted es Aurora y afirma que David si lanzó el péndulo en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?
- Si usted es David y afirma que si lanzó la esfera en línea recta ¿Por qué causas la esfera no llegó a Ana?
- Si usted fuera Aurora, ¿En qué dirección debe apuntar y lanzar la esfera para que se encuentre con Ana? Represente mediante un dibujo, ese movimiento indicando posibles causas, efectos y direcciones

## Respuestas

### Compendio de las respuestas dadas por los estudiantes

Total de estudiantes en la sesión: ( $N_T = 17$ )

Tabla 27: Respuesta de los estudiantes acerca de la trayectoria de la esfera dentro de un carrusel en movimiento

Trayectoria de la esfera en el carrusel (inciso a)	#
“Como el carrusel va en dirección de las manecillas del reloj, una fuerza (centrípeta) hace que se desvíe la esfera y que se describa el movimiento mostrado. Trayectoria curva”.	(17,7%, $N = 3$ )
“Carrusel en movimiento en dirección a las manecillas del reloj. Si David lanza la esfera en línea recta debido al movimiento del carrusel, la esfera tomará una curva en llegar a Ana”	(23,5%, $N = 4$ )
“Si desde el carrusel es lanzada la esfera, y este estuviera inmóvil, no describiría una trayectoria curva, sino una línea recta.”	(29,4%, $N = 5$ )
“El movimiento genera una desviación en sentido contrario a las manecillas del reloj (fuerza centrípeta), debido a la rotación del carrusel y a la fuerza de Coriolis”	(29,4%, $N = 5$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Tabla 28: Respuesta de los estudiantes a las razones porque la esfera no le llego a Ana

Trayectoria de la esfera en el carrusel (inciso b)	#
“La esfera llegará a Ana, ya que si se lanza a la misma dirección en la que rota el carrusel, no se afectará la dirección de ésta” .	(29,4%, $N = 5$ )
“El movimiento de rotación del carrusel en dirección de las manecillas del reloj hará que la esfera llegue a Ana, si el lanzamiento es hacia la izquierda”	(70,6%, $N = 12$ )

Fuente: Propia

Nota: Consolidado de respuestas con su respectivo porcentaje

Los estudiantes tuvieron en cuenta que si ese fuera un sistema de referencia inercial, el péndulo no trazaría una curva sino una línea recta, porque no habría fuerzas presentes. De la misma manera, el mismo porcentaje argumentó que la fuerza presente que hace que siempre se desvíen los objetos en un sistema en rotación es la fuerza de Coriolis, y diferenciaron ésta de la pseudofuerza centrípeta (29,4%,  $N = 5$ ).

Los grupos discutieron que si el péndulo del problema anterior se coloca en el carrusel y este último va rápido, el péndulo tiene un aumento en su velocidad (es decir, la misma del carrusel) y que las fuerzas que actúan sobre el péndulo cambian. Además, que el observador que se encuentra en el carrusel ve que los objetos se desvían de una manera lateral, debido a que actúan fuerzas

ficticias adicionales (70,6%,  $N = 12$ ).

Registros gráficos de la ACTIVIDAD IV

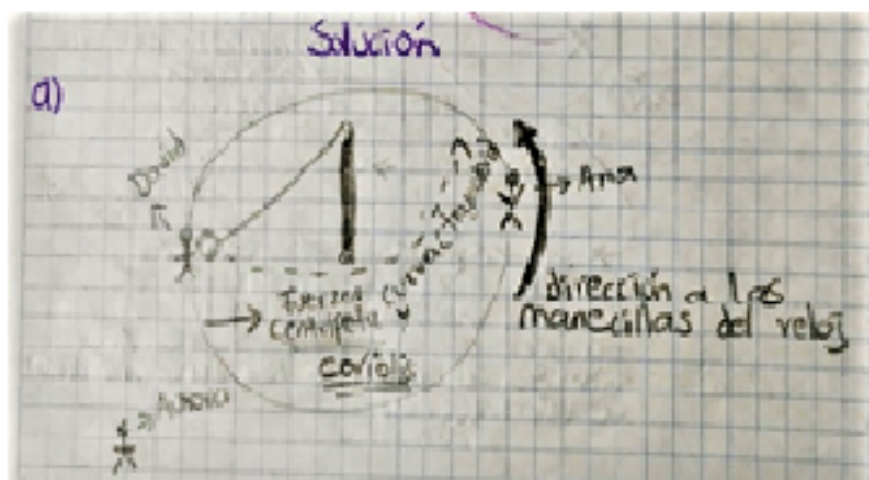


Figura 56: Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo con el sentido de giro

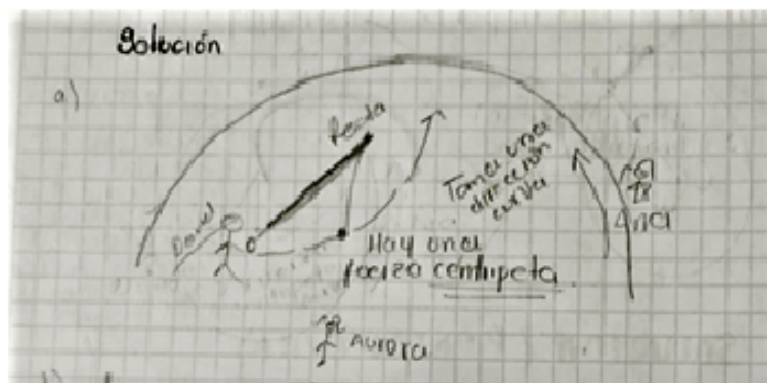
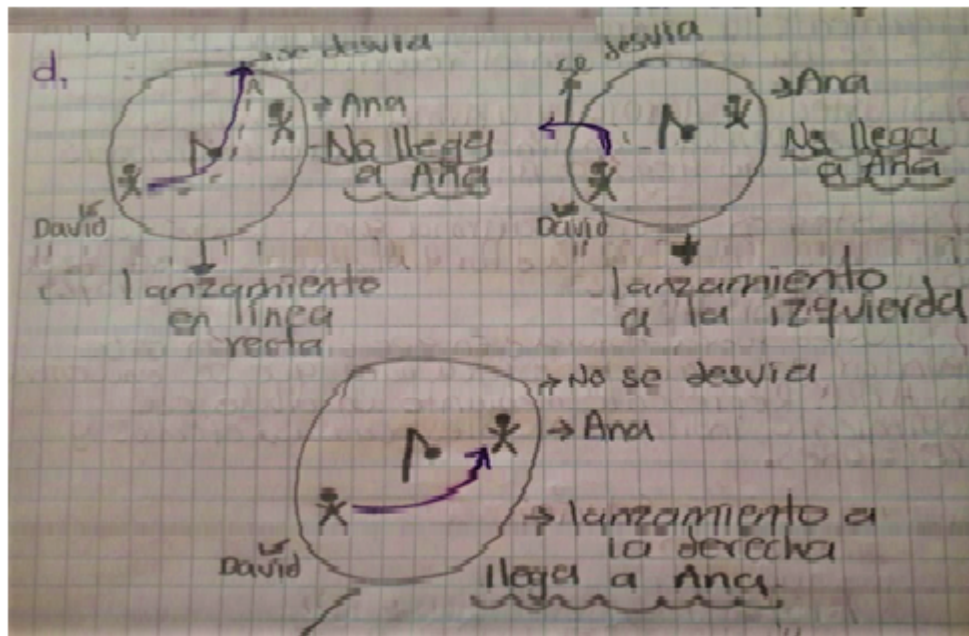


Figura 57: Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo



**Figura 58:** Descripción de un observador en rotación de la desviación del péndulo para que éste llegue hasta la otra persona

### A.6.5. Sistematización de la ACTIVIDAD V

La sistematización completa de las respuestas de los estudiantes se encuentra en el Capítulo 5

#### REGISTROS GRÁFICOS DE LA ACTIVIDAD V

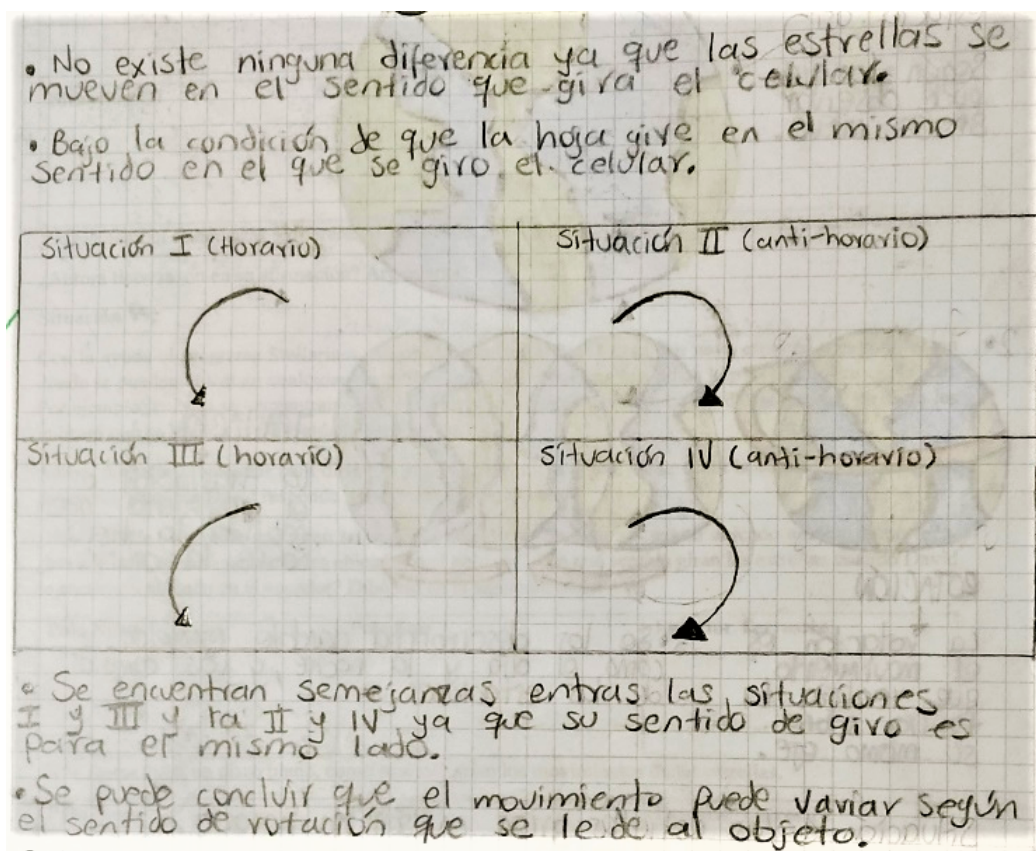


Figura 59: Sentido de giro de las estrellas de la actividad con el celular

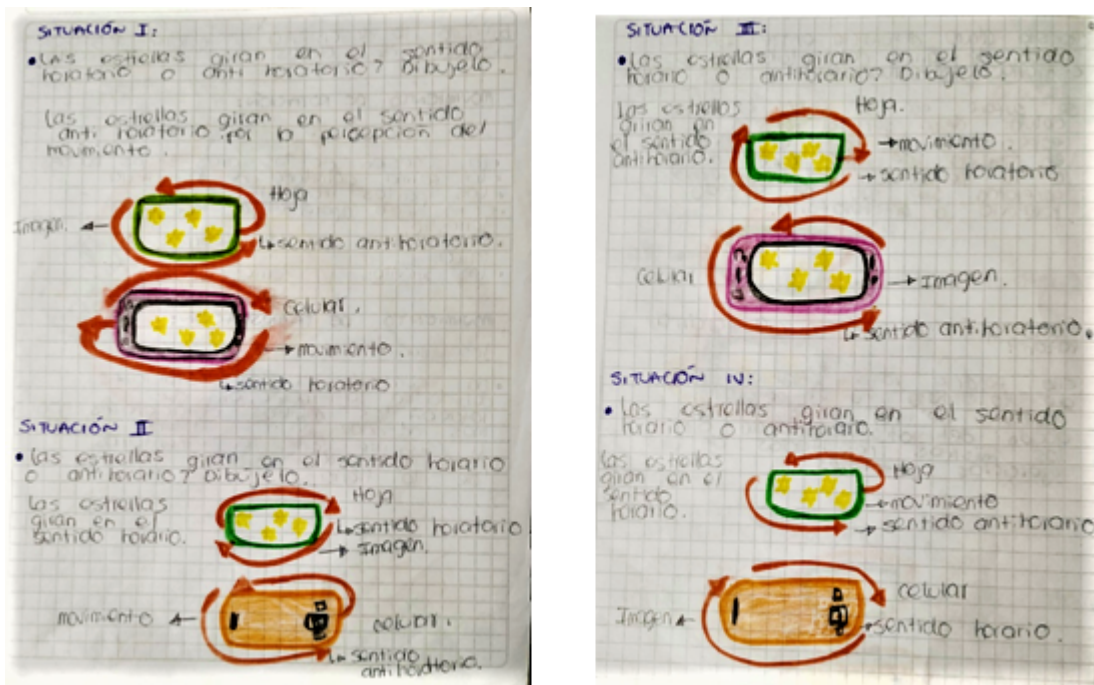


Figura 60: Sentido de giro de las estrellas según el movimiento del celular

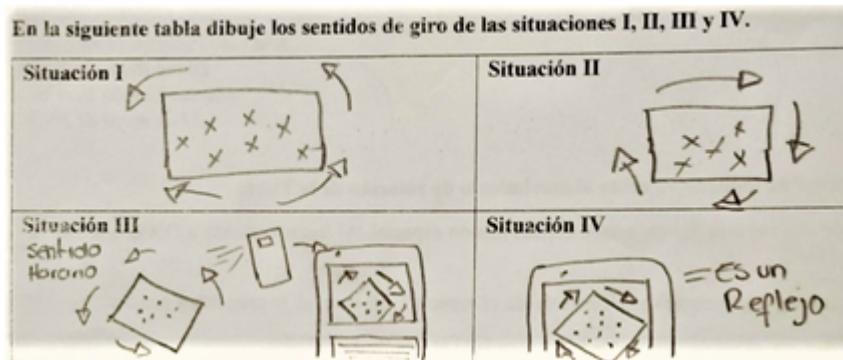


Figura 61: Descripción del sentido de giro de las estrellas en la pantalla del celular en rotación

**A.6.6. Sistematización de la ACTIVIDAD VI**

La sistematización completa de las respuestas de los estudiantes se encuentra en el Capítulo 6

**REGISTROS GRÁFICOS DE LA ACTIVIDAD VI**

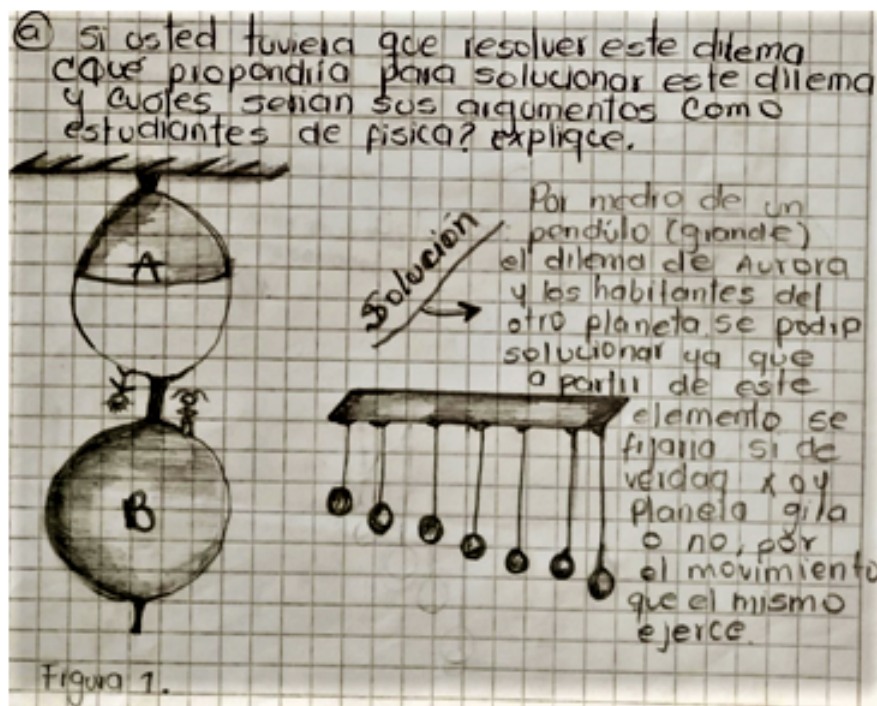


Figura 62: Utilización de un péndulo para establecer que un planeta se encuentra en rotación

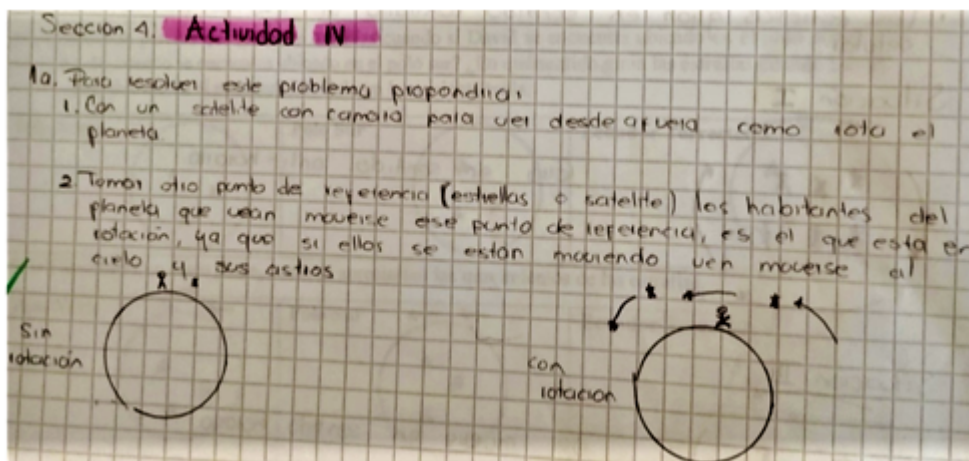


Figura 63: Descripción del movimiento aparente de las estrellas para definir la rotación del planeta



# Referencias Bibliográficas

Adúriz, A., Bonán, L., Ure, C., y Garea, M. (2000). Trabajo de aula y trabajo de laboratorio. propuesta para repensar los planos. teórico y práctico a través del péndulo de foucault. *REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA*.

Alexandre, M. (s.f.). *Tracker - video analysis and modeling tool*. Descargado 2019-07-24, de <https://journals.openedition.org/bibnum/731?lang=en>

BBCmundo. (2016). *Por qué hay gente que aún cree que la tierra es plana*. Descargado 2018-03-2, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37954365>

Beamonte, P. (2018). *Chileno rechaza vacunarse por ideología y muere de fiebre amarilla*. Descargado 2018-07-5, de <https://hipertextual.com/2018/02/chileno-rechaza-vacunarse-ideologia-muere-fiebre-amarilla>

Benoît, P. C. (s.f.). *Lavabos, coriolis et rotation de la terre*. Descargado 2003-02-21, de <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/modelisation-coriolis.xml>

Copérnico, N., y Nacional, I. P. (1999). *Revoluciones de las orbitas celestes: Tomo i* (n.º v. 1). Instituto Politécnico Nacional.

Coriolis, M. G. (1831). *Académie mémoires -mémoires - sur le prencipe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines*. Impr. Nationale.

Focucault, L., y Trad. (1848). *Sur divers signes sensibles du mouvement diurne de la terre*.

Giancoli. (1989). *Fisica general vl1*. Prentice Hall (a Pearson Education company).

Hazen, W. E., y PIDD, R. W. (1969). *Física*.

Ibarra, E. (2010). *Péndulo paramétrico de foucault* (Master en Ciencias Matetámicas).

Icordonm. (s.f.). *Transformaciones de galileo y lorentz*.

- Landau, L., y Rumer, Y. (1995). *¿qué es la teoría de la relatividad?* Ediciones Akal.
- Mach, E. (1948). *Conocimiento y error*. Espasa Calpe.
- Malagón, M., Ayala, M., y Sandoval, S. (2011). *El experimento en el aula : comprensión de fenomenologías y construcción de magnitudes*. Bogotá, D. C: Universidad Pedagógica Nacional.
- Moatti, A. (2011). *Gaspard-gustave de coriolis (1792-1843) : Un mathÉmaticien, thÉoricien de la mÉcanique appliquÉE* (Tesis Doctoral no publicada). Université Paris I Panthéon-Sorbonne.
- Newton, I., y García, E. (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Alianza Editorial.
- RAE. (2015). *p. 1*. Descargado 2018-01-15, de <http://lema.rae.es/dpd/srv/search?id=KKIXcZ6vMD6UiQB0EW>
- Ripa, P. (1996). *La increíble historia de la malentendida fuerza de coriolis [archivo de computador]*. Fondo De Cultura Economica USA.
- Rubio, J. (2018). *La tierra plana, una teoría de la conspiración construida con memes y grupos de facebook*. Descargado 2018-08-21, de [https://verne.elpais.com/verne/2018/01/30/articulo/1517320204\\_628910.html](https://verne.elpais.com/verne/2018/01/30/articulo/1517320204_628910.html)
- Sagan, C., y Abelló, D. (2017). *El mundo y sus demonios: La ciencia como una luz en la oscuridad*. Grupo Planeta.
- SPIEGEL. (2011). *Analisis vectorial schaum 2ed*. McGraw Hill.
- Stellarium. (s.f.). *Catalogo de estrellas*.
- Stepanyants, Y. A., y Yeoh, G. H. (2008). Stationary bathtub vortices and a critical regime of liquid discharge.
- Tipler, P. (1985). *Física*. Barcelona: Reverte.
- Tobin, W. (2012). *Léon foucault*. EDP Sciences.
- Veritasium. (s.f.). *The truth about toilet swirl*. Descargado 2015-06-03, de <https://www.youtube.com/watch?v=aDorTBEhEtk-https://www.youtube.com/watch?v=ihv4f7VMeJw>
- Viennot, L. (2003). *Razonar en fisica (spanish edition)*. Antonio Machado Ediciones.