SOBRE EL VERANEO PORTEÑO, EL DESAGÜE DE LA BAÑADERA Y LA METEOROLOGÍA

Divagaciones en torno al efecto Coriolis y cómo explicar el tema en un curso elemental de Física.

CLAUDIO HORACIO SANCHEZ

Fac. de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires

Cada vez que paseo por la Costanera, esencialmente durante el verano, no puedo evitar comparar la barrosa margen derecha del Río de la Plata con las doradas playas al otro lado del charco. Envidio a los montevideanos por tener templadas playas a pocos minutos de su lugar de trabajo o estudio.

¿Por qué ellos tanta playa arenosa y nosotros tanta barranca barrosa? ¿Tendrá algo que ver en esto el famoso "efecto Coriolis"?

Este asunto tiene el raro privilegio de ser uno de los principales productores de dolores de cabeza entre los alumnos que tratan de internarse en los recovecos de la mecánica. Ellos se lo imaginan como una cosa de torre de marfil: parece que una vez por año los profesores sacamos de la vitrina el efecto Coriolis, se lo mostramos a los alumnos y, cuando están suficientemente confundidos, lo volvemos a guardar hasta el próximo año. O hasta el examen final.

Veamos un poco cómo es esto del efecto Coriolis.

Imaginemos una plataforma giratoria con una senda de dirección radial trazada sobre su superficie. Imaginemos también que, con la plataforma en rotación, pretendemos caminar a lo largo de la senda.

Nos encontraremos entonces ante un típico problema de cinemática: la composición de movimientos (figura 1). Habrá un movimiento de arrastre (la rotación de la plataforma) y un movimiento relativo (nuestra marcha a lo largo de la senda), los cuales pueden componerse dando un movimiento resultante más bien complicado.

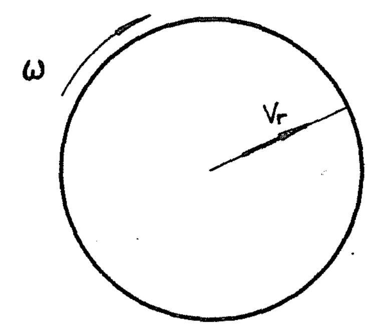

Figura 1. Un problema de composición de movimientos.
ω = velocidad angular (movimiento de arrastre)
V_r = velocidad radial (movimiento relativo)

La velocidad absoluta de ese movimiento resultante, es decir, la velocidad que llevaremos respecto de un observador fijo y exterior a la plataforma, resultará de sumar (vectorialmente, por supuesto) la velocidad de arrastre y la relativa. Se trata de la conocida Fórmula de adición de velocidades.

Podríamos pensar que algo parecido debiera ocurrir con las aceleraciones: la aceleración absoluta resultaría de sumarle vectorialmente la aceleración de arrastre a la relativa.

Pero no.

En 1835 el ingeniero y matemático francés Gaspard Gustav de Coriolis (1792-1843) publicó en la revista de su universidad un ensayo titulado "Sobre las ecuaciones del movimiento relativo de los sistemas materiales" en donde demostró, con matemática elegancia, que una supuesta "Fórmula de adición de aceleraciones" requeriría de un término complementario al cual llamó, modestamente, "aceleración de Coriolis".

Los recursos matemáticos empleados por Coriolis están más allá de los alcances del estudiante de los primeros cursos de física. Pero podemos hacerles comprender el efecto mediante razonamientos más pedestres.

Volvamos a nuestra marcha sobre la plataforma.

Tenemos por un lado que si mantenemos una trayectoria radial, nuestra velocidad estará cambiando continuamente de dirección pues el radio sobre el cual marchamos gira junto a la plataforma. Por otra parte, además del movimiento radial (movimiento relativo), llevaremos una velocidad tangencial que nos imprime la plataforma (movimiento de arrastre). Esta velocidad es tanto mayor cuanto más lejos estemos del centro de giro. Y, si caminamos hacia afuera, irá aumentando continuamente. La figura 2 muestra los vectores velocidad antes y después de un giro $\Delta\alpha$ que (más allá de las necesidades de claridad del dibujo) supondremos infinitamente pequeño.

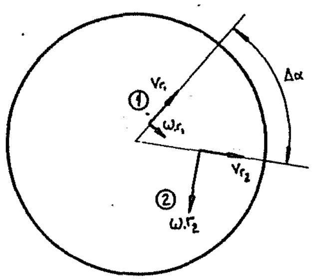

Figura 2. Las dos componentes de velocidad de arrastre y relativa) antes y después del giro $\Delta\alpha$.

Contabilizamos por lo tanto dos efectos:

a. La velocidad radial cambia de dirección.

b. La velocidad tangencial cambia de intensidad[1].

Ambos cambios de velocidad implican la existencia de aceleraciones. Encontremos el valor de cada una de esas aceleraciones.

En la figura 3 hemos puesto los vectores velocidad relativa antes y después del giro $\Delta\alpha$. Si

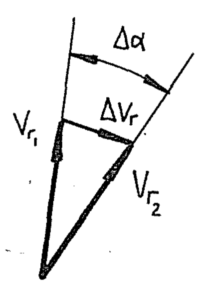

Figura 3. Los vectores Velocidad relativa antes y después del giro $\Delta\alpha$.

consideramos, según lo dicho, que $\Delta\alpha$ es muy chico, resulta que la diferencia de los dos vectores es:

$$\Delta V_r = V_r \,.\, \Delta\alpha$$

Y la aceleración media durante el giro será:

$$a_1 = V_r \,.\, \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$ es igual (en el límite) a la velocidad angular nos queda:

$$a_1 = V_r \,.\, \omega$$

La dirección y el sentido de esta componente de la aceleración de Coriolis están dados por los del vector: tangencial y a favor de la rotación.

Pasemos a la velocidad tangencial.

La velocidad al comienzo del giro es $\omega . r_1$ y luego del mismo, $\omega . r_2$. La diferencia será:

$$\Delta V_t = \omega (r_2 - r_1)$$

Si ahora dividimos por el tiempo transcurrido durante el giro, tendremos la aceleración media:

$$a_2 = \omega \frac{r_2 - r_1}{\Delta t}$$

Si de nuevo recordamos que el tiempo transcurrido es muy pequeño, encontramos que la expresión

$$\frac{r_2 - r_1}{\Delta t}$$

es, en el límite, igual a la velocidad relativa de nuestro movimiento sobre la plataforma. En resumen, el segundo efecto considerado por Coriolis vale:

$$a_2 = V_r \,.\, \omega$$

La dirección y el sentido de esta segunda componente también es tangencial y a favor de la rotación.

Ninguna de estas aceleraciones aparecía en las fórmulas usuales de cinemática pues no son de arrastre ni relativas. Requieren de la existencia de los dos movimientos componentes: desaparecen tanto si la plataforma se detiene como si dejamos de caminar[2]. Acabamos de demostrar que estas dos aceleraciones tienen igual dirección (tangencial en nuestro caso), igual sentido (a favor de la rotación) e igual valor ($\omega . V_r$). En definitiva, la aceleración de Coriolis es igual a la suma de estas dos componentes:[3]

$$a_{Coriolis} = 2\omega . V_r$$

La aceleración de Coriolis implica la existencia de una fuerza (¿fuerza de Coriolis?).

Nosotros, caminando sobre la plataforma, nos sentimos tironeados en sentido contrario al de la rotación (y al de la aceleración) de la misma forma que nos vamos hacia adelante cuando el colectivo en que viajamos frena, o hacia atrás cuando acelera.

Es razonable pensar que el agua del río de la Plata se encuentra en una situación similar a la de nuestra caminata. También ella marcha (léase fluye) sobre una plataforma giratoria (léase la Tierra). Y, sometida a la acción de la fuerza de Coriolis, debería tratar sus dos orillas de modo diferente. Pero no tengo datos suficientes como para asegurar que sea esta la causa de la asimetría a que hacíamos referencia al principio. Por otra parte, el tema de la arena está relacionado con el hecho de ser el río Uruguay quien lleva la mayor parte. Los hidrólogos tienen la palabra.

Existe otra manifestación importante del efecto Coriolis.

Volvamos una vez más a nuestra plataforma, la que supondremos girando en sentido horario, y caminemos hacia el centro. Si no estuvieramos bien afirmados (por ejemplo, si la superficie de la plataforma fuera resbaladiza) bajo los efectos de la fuerza de Coriolis nos desviaríamos continuamente hacia la izquierda de modo que, aunque pretendiéramos caminar directamente hacia el centro, iríamos describiendo una trayectoria en espiral en el sentido de las agujas del reloj. En principio, esto es lo que le ocurre al agua que se va por el desagüe formando el familiar remolino.

Antes de correr hacia el baño, tengamos presente que muchos efectos perturbadores (movimientos adicionales en la superficie del agua, irregularidades en la forma del desagüe, etc.) pueden hacer que el remolino se forme indistintamente en un sentido o en el otro, mal que le pese a Coriolis. Incluso, algunos autores sostienen que el efecto Coriolis debido a la rotación terrestre es demasiado débil como para hacerse evidente en tan pequeña escala.

A mayor escala, en cambio, el efecto sí es observable. Por ejemplo, los ciclones que forman las masas de aire atmosférico al dirigirse hacia un centro de baja presión forman remolinos que giran siempre en el sentido predicho por la teoría de Coriolis.

De modo que si quieren tener a su alcance las templadas playas del río de la Plata, consíganse algún cargo en la Universidad de Montevideo. O a llorarle a Coriolis.

1. Por supuesto que la velocidad tangencial también cambia de dirección, pero ese efecto ya está considerado en las fórmulas usuales: se trata de la aceleración centrípeta, que es una aceleración de arrastre.
2. Para que la aceleración de Coriolis no sea nula debe cumplirse, además, que la velocidad relativa no sea paralela al vector velocidad angular.
3. Sólo hemos deducido la expresión del módulo de la aceleración de Coriolis y a partir de un caso muy simple. La fórmula general es algo más compleja y requiere tratamiento vectorial.