

# ENTENDENDO A FORÇA DE CORIOLIS

David J. Van Domelen<sup>1</sup>

Traduzido por Maria Elisa Siqueira Silva<sup>2</sup> e Bruno Vitório dos Santos<sup>2</sup>

## Resumo

A maioria das pessoas conhece a força de Coriolis, mas poucas a entendem. É oferecida uma explicação simples e independente da noção de momento angular. As escalas em que a força de Coriolis é relevante também são discutidas.

## 1 Introdução e motivação

Em algum instante de suas vidas a maioria das pessoas já ouviu falar da força de Coriolis, quer seja em referência aos padrões climáticos, correntes marítimas, ou de forma mais prosaica, sobre o sentido em que a água gira ao descer pelo ralo da pia. Infelizmente, enquanto muitos já ouviram falar desta força, poucos a entendem suficientemente bem para explicá-la sem recorrer a equações vetoriais. Claro que a maioria dos livros de Física que abrange a cinética angular apresentam a seguinte equação, relacionando a força de Coriolis a um objeto com massa  $m$ , à sua velocidade num sistema rotacional,  $v_r$ , e à velocidade angular deste sistema em rotação,  $\omega$ :

$$F_{\text{Coriolis}} = -2 m (\omega \times v_r)$$

Contudo, na maioria das vezes o texto ou explica a força de Coriolis em termos das medidas angulares, como a conservação do momento de inércia ou se utiliza da força de Coriolis para ilustrar a cinética angular. Infelizmente, a maioria de nós se sente desconfortável com a mecânica angular e não seria exagero dizer que alguns estudantes têm pavor dela. Ao mesmo tempo, não podemos esperar que os alunos entrem na classe já entendendo a força de Coriolis. Deste modo, usando física para explicar o fenômeno, ou ainda, usando o fenômeno para explicar a física, acabaremos por assustar os estudantes de qualquer jeito. Então, o que fazer? Este artigo tenta desenvolver meios de se explicar a força de Coriolis para as pessoas que ainda não entenderam a mecânica angular. A explicação é baseada em medidas lineares e raramente usa conceitos rotacionais.

## 2 Premissas básicas

---

<sup>1</sup> The Ohio State University. Department of Physics. Physics Education Research Group.

<sup>2</sup> Departamento de Geografia Física da FFLCH-USP, [elisasiq@usp.br](mailto:elisasiq@usp.br)

Os seguintes princípios são necessários antes que iniciemos a parte principal da explicação:

1. A **Primeira Lei de Newton** na forma de componentes - Objetos em movimento tendem a permanecer em movimento a menos que sejam impulsionados por uma outra força. Uma componente vetorial da velocidade não será alterada por força perpendicular a esta componente.
2. A **Geometria Esférica da Terra** – “X” graus de longitude geram diferentes distâncias entre meridianos (em quilômetros) em diferentes latitudes.
3. **Gravidade** - Objetos sob a influência da gravidade da Terra serão atraídos para (e, portando, orbitarão) o centro de massa da Terra.

A premissa 2 é provavelmente a mais facilmente aceita pelos alunos, uma vez que com um desenho do globo é fácil demonstrar que dez centímetros são  $15^\circ$  de longitude em uma latitude e são  $30^\circ$  em alguma outra latitude. Ter uma bola ou globo pode facilitar as coisas durante essa explicação. As premissas 1 e 3 requerem algum conhecimento de ciências, mas devem ser aceitáveis para estudantes em cursos de mecânica.

### 3 Explicação da força de Coriolis

Enquanto todas as deflexões baseadas na força de Coriolis podem ser explicadas usando conceitos rotacionais, uma explicação linear é mais simples desde que os efeitos na direção Norte-Sul sejam separados daqueles na direção Leste-Oeste. A deflexão em objetos movendo-se na direção Norte-Sul pode ser explicada sem que se fale sobre a aceleração centrípeta, como veremos a seguir.

#### 3.1 Sinto a Terra mover-se sob meus pés: movimento Norte-Sul

Primeiramente, note que todos os pontos da Terra têm a mesma velocidade angular,  $\omega$  (eles completam uma volta por dia). Note também que lugares em latitudes diferentes têm velocidades lineares diferentes. Um ponto próximo ao Equador pode girar a milhares de quilômetros por hora, enquanto um ponto próximo ao Pólo Norte pode se mover a apenas algumas dezenas de quilômetros por hora.

Normalmente, objetos em contato com o chão viajam com a mesma velocidade que o chão sobre o qual eles se encontram. Como resultado, a força de Coriolis não tem um efeito perceptível para pessoas fixas no chão; a velocidade do ponto (do globo) em que você está e a velocidade do ponto para onde você se desloca são muito próximas para que você perceba qualquer diferença. Olhando de novo para a equação da força de Coriolis, se a velocidade em relação ao sistema rotacional (Terra) é zero, a força de Coriolis também é nula.

Por outro lado, quando um objeto se move para sul ou para norte e não está firmemente conectado ao solo (ar, projéteis balísticos etc), então, ele mantém sua velocidade inicial em direção a leste enquanto se move. Isto é apenas uma aplicação da Primeira Lei de Newton. Um objeto se movendo para leste continua a se mover para leste com a mesma velocidade (tanto a direção como a magnitude se mantêm) até que seja exercida uma força sobre ele, mudando sua velocidade. Objetos lançados do equador para o norte mantêm a componente de leste da velocidade em direção a leste da mesma forma que os objetos "parados" sobre o Equador. Mas se eles se distanciam o suficiente do equador, não mais estarão se movendo para leste com a mesma velocidade que o chão sob eles.

O resultado é que um objeto que se afasta do equador, na verdade, move-se para leste mais rapidamente do que o chão debaixo dele, parecendo ter sido forçado para leste por alguma força misteriosa. Objetos se movendo em direção ao equador acabarão por se mover mais lentamente do que o chão sob eles e serão aparentemente forçados para oeste. Na verdade, não existe nenhuma força envolvida; simplesmente o chão está se movendo em uma velocidade diferente daquela em que se movia o chão quando do lançamento do objeto.

Considere a Figura 1. A seta amarela 1 representa um objeto enviado do equador para o norte. No momento em que atingir a latitude marcada ao norte, ele foi mais longe ao leste do que um ponto similar no chão àquela latitude, uma vez que ele manteve a velocidade na direção leste com que saiu do equador. Do mesmo modo, a seta verde 2 partiu de um ponto ao sul do equador, que possui uma velocidade na direção do leste inferior à do equador, sendo aparentemente defletida para oeste do ponto de vista do chão.

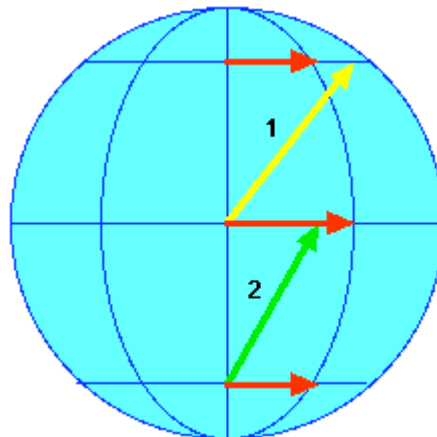


Figura 1: Deflexão aparente de um objeto numa trajetória meridional. As setas 1 e 2 representam o deslocamento dos objetos quando se deslocam do equador para norte e do sul para o equador, respectivamente. As setas vermelhas indicam a velocidade de deslocamento em cada um dos paralelos.

### 3.2 Movimento Leste-Oeste

Ao explicar como a Força de Coriolis afeta objetos que se movem para leste ou oeste, é útil desprezar a gravidade por enquanto. Ela será considerada num momento futuro.

Considere estar sobre uma esfera que roda sem gravidade. Um observador que está fixo à esfera lança uma bola na direção do leste do globo, na direção de rotação. Uma vez que nenhuma força esteja atuando sobre a esfera, ela viajará em linha reta, pela tangente mostrada na Figura 2, em  $t = 0$ .

O tempo passa e a bola continua em sua linha reta, mas o observador, que está fixo no globo, gira para uma nova posição. Nessa nova posição, a definição de leste do observador mudou, e não é mais a mesma que era em  $t = 0$ . A bola não está mais viajando na direção leste-oeste do observador e, na verdade, parece ter desviado para fora. Se o globo está movendo-se lentamente o suficiente de forma que o observador não sinta a rotação, sua conclusão natural será que alguma força misteriosa tirou a bola de seu caminho, fazendo com que ela tenha se afastado do eixo de rotação mais rapidamente do que se ela ainda estivesse indo “corretamente” para leste.

Da mesma forma, se um observador lança uma bola para o oeste em um tempo  $t = 0$ , esta aparentemente seria puxada para o eixo de rotação porque a linha da direção oeste se moveu.

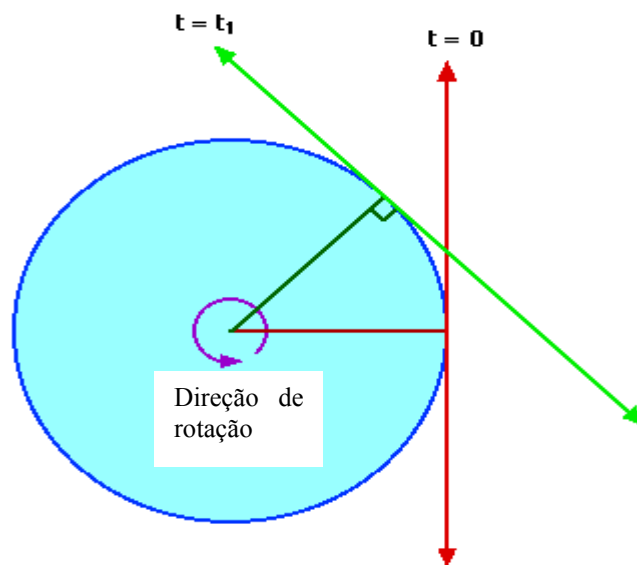


Figura 2: Variação da direção leste num sistema em rotação.

Agora, consideremos a gravidade. A gravidade puxa os objetos em direção ao centro de massa da Terra, o que significa que ela não pode afetar a velocidade de um objeto nas direções perpendiculares à vertical. Em outras palavras, ela não afetará as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da velocidade de um objeto.

A Figura 3 mostra um corte da Terra em que o leste aponta para fora da folha. As linhas de cor forte apontam nas direções em que projéteis lançados a leste e a oeste pareceriam ter se movido devido à força de Coriolis, na ausência de gravidade. O projétil lançado a leste (vermelho) pareceria se afastar do eixo, enquanto que o supostamente lançado a oeste (verde) pareceria aproximar-se do eixo de rotação da Terra. Ambas as linhas foram decompostas em componentes, com uma componente vertical e outra no plano Norte-Sul. A gravidade age contra qualquer componente vertical para cima e a presença do chão anula as componentes verticais para baixo. Sendo assim, projéteis devem ficar dentro da faixa azul claro da atmosfera.

Como resultado da gravidade puxar os objetos para baixo e do chão os sustentar, o efeito resultante da força de Coriolis em objetos que se dirigem para leste ou oeste é sua deflexão para sul ou para norte. No hemisfério Norte, objetos que se deslocam para leste são defletidos para sul, por exemplo. A força de Coriolis os "empurra" para longe do eixo e a gravidade os puxa de volta para o chão, de forma que o efeito resultante é uma deflexão aparente para sul.

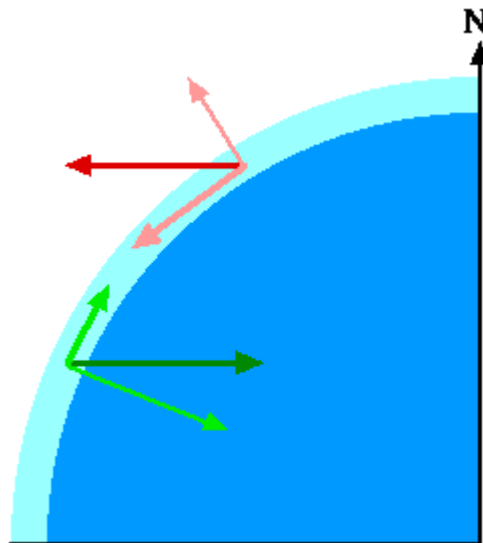


Figura 3: Deflexão da força de Coriolis dividida em componentes radial e tangencial (Norte-Sul). Seção transversal da Terra com as setas fortes apontando para fora ou na direção do eixo de rotação.

#### 4 Juntando tudo: sistemas de baixa pressão

Até agora nós explicamos como as coisas rumando para os pólos se desviam para leste, coisas se afastando dos pólos se desviam para oeste, coisas rumando leste se desviam para o equador e coisas se movendo para o oeste se desviam para os pólos. Em outras palavras, o ar (ou qualquer coisa) movendo-se

livremente no hemisfério Norte desvia-se para a direita, e o ar se movendo no hemisfério Sul é defletido para a esquerda. Isto é o que diz também o resultado do produto vetorial na equação da força de Coriolis em sua abreviação matemática.

O que isto significa para os sistemas de tempo? Pegue, por exemplo, um centro de baixa pressão, onde existe menos ar do que na área ao redor. Se existe menos ar em um lugar do que no seu entorno, o ar tentará se mover de modo a balancear as coisas.

Ar começando do repouso em relação ao chão se moverá em direção ao centro de baixa pressão. Este movimento no hemisfério Norte será defletido para a direita, como mostrado na figura 4. Entretanto, as forças que puseram o ar em movimento ao redor do centro de baixa pressão ainda existem e o resultado será um vórtice de ar girando no sentido anti-horário. O ar tentará girar para a direita, o centro de baixa o atrairá em sua direção, e o resultado é que o ar é mantido em um círculo que gira na verdade no sentido anti-horário. Sem a força de Coriolis, um fluido que avançasse para um ponto poderia ainda assim formar um vórtice, mas a direção seria aleatória ou dependente apenas das condições iniciais do fluido.

O olho do furacão é um claro exemplo de ventos velozes curvados em um círculo, movendo-se tão rapidamente que eles não podem ser sugados para o centro. A baixíssima pressão no centro do furacão significa que existe uma força forte puxando o ar para o centro, mas as altas velocidades dos ventos dão a eles força de Coriolis suficiente para que as duas forças atinjam um certo equilíbrio. A força resultante na parede do olho é uma força centrípeta grande o suficiente para manter o ar afastado em um raio determinado por sua velocidade.

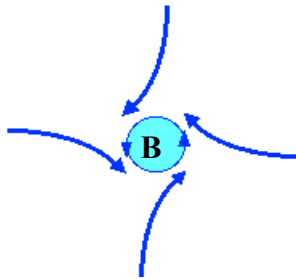


Figura 4: Vórtice criado num sistema de baixa pressão (B) no HN. A circulação de um sistema de baixa pressão no HS seria horária devido à deflexão do ar para a esquerda pela força de Coriolis.

## 5 Outros resultados e não-resultados

"Legal", você poderia dizer: "isto explica as tempestades, mas, e quanto à água na pia?" Na verdade, esta questão é um bom gancho para despertar o interesse dos alunos pela força de Coriolis.

Como a velocidade angular da Terra é muito baixa ( $360^\circ$  por dia, ou aproximadamente  $7,2 \times 10^{-5}$  radianos por segundo), a força de Coriolis não é muito

significativa em distâncias pequenas (como a equação mostra, alta velocidade também pode fazer a diferença, mas para as intenções deste artigo efeitos de pequena distância e alta velocidade serão desconsiderados). Então, o que é afetado pela força de Coriolis de modo significativo?

### **5.1 Lá em cima no ar**

O simples ato de olhar para a previsão de tempo no noticiário noturno dá um exemplo do que já foi tratado. Os grandes sistemas atmosféricos são protagonizados por massas de ar e umidade que viajam centenas de quilômetros e cujos ventos podem ultrapassar 100 quilômetros por hora nas piores tempestades.

Outro exemplo de objeto que se move velozmente no céu por centenas de quilômetros é o avião. Todos os pilotos precisam estar familiarizados com os efeitos da força de Coriolis, uma vez que aviões podem atingir velocidades muito superiores à dos piores ventos de furacão. No curso de uma viagem de várias horas de duração, um avião poderia ser bastante defletido caso o piloto não compensasse a força de Coriolis.

Em terceiro lugar, numa consideração mais militar, mísseis e projéteis de artilharia atirados ao horizonte podem errar por centenas de metros se a força de Coriolis não for levada em consideração. Se você tiver a disposição uma mesa giratória, pode deixar que os estudantes lancem projéteis através da mesa para que eles vejam como estes são defletidos.

Então, coisas velozes que se movem por grandes distâncias podem ser defletidas significativamente pela força de Coriolis, mas e quanto à pia?

### **5.2 Água girando para o lado errado na pia**

Na pia da cozinha, é claro, as escalas de tempo e velocidade são muito inferiores a horas e quilômetros. Água vazando pelo ralo flui a velocidades da ordem dos metros por segundo na maioria das pias, que possuem normalmente menos do que um metro de largura. Qualitativamente não parece haver muita chance para a deflexão. Quantitativamente, aplicando estes valores na equação resulta em uma variação da direção estimada em apenas uma fração de grau por segundo, e uma fração bem pequena... menos de um segundo de arco ( $1/3600^\circ$ ) por segundo ao longo de todo o escoamento na pia, ignorando-se efeitos adicionais de conservação de momento angular e afins. Sob condições extremamente controladas, isto pode causar o escoamento da água em um continente no sentido anti-horário, no hemisfério Norte, e no sentido horário, no hemisfério Sul, mas a pia da sua cozinha não possui este grau de controle. Coisas como rotação residual do processo de enchimento da pia (mesmo quando a água parece parada, ela está rodando lentamente por um longo período de tempo após a parada aparente), irregularidades na construção da pia, correntes de convecção se a água está mais quente ou mais fria do que a pia e, ainda, outras possibilidades podem afetar a direção em que a água gira ao escoar. Qualquer um destes efeitos costuma ser o suficiente para sobrepujar a pequena contribuição da força de Coriolis na sua pia ou banheira. Pesquisas desenvolvidas nos anos 60

mostraram que com cuidado adequado na eliminação destes fatores, a influência da força de Coriolis pode ser observada<sup>34</sup>.

A água na pia não vai longe o suficiente para ativar deflexão Norte-Sul notável. Na maior parte das vezes, ela simplesmente escorre girando no mesmo sentido em que girava quando a pia foi cheia, e o mesmo é verdade em coisas como a famosa "demonstração" da força de Coriolis mostrada nas armadilhas para turistas ao longo do equador. Talvez exista uma conspiração para que se fabriquem pias destrás no Hemisfério Norte e pias canhotas no Hemisfério Sul? De qualquer modo, não ponha a culpa na força de Coriolis a não ser que sua pia seja do tamanho de um pequeno oceano.

**Agradecimentos** - Aos leitores dos grupos de novidades *Usenet alt.fan.cecil-adams e misc.education.science* por fazerem as perguntas que levaram o autor a desenvolver uma explicação para a força de Coriolis. Obrigado também a Donald Shakbie que apontou a importância da força de Coriolis para aviadores após ler esta explicação *online* e, a Steven Carson que indicou as referências na *Nature*. Finalmente, o trabalho neste artigo foi em parte sustentado por auxílios NSF, NSF GER-9553460 e NSF DUE-9396205.

## 6. Referência Bibliográfica

<http://www.physics.ohio-state.edu/~dvandom/Edu/newcor.html>, acessado em 01/10/2003.

---

<sup>3</sup>Shapiro,1962, Bath Tube Vortex, *Nature*, v. 196, pp 1080-81 (Hemisfério Norte).

<sup>4</sup>Trefethen *et al.*,1965, Bath Tube Vortex in the Southern Hemisphere, *Nature*, v. 207, pp 1084-85.