



# SEARA DA CIÊNCIA

## CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### A Força de Coriolis e os Ventos.

Em 1730, o matemático suíço Daniel Bernoulli (1700-1782) escreveu uma carta ao matemático russo Christian Goldbach (1690-1764) na qual descreveu seus estudos sobre o fluxo de fluidos em tubos horizontais, e que lhe permitiu descobrir o seguinte teorema, mais tarde conhecido como **Princípio de Bernoulli**: - *Quando a velocidade do fluxo dos fluidos aumenta, sua pressão diminui*. Em notação atual, esse **Teorema de Bernoulli** é traduzido pela expressão:

$$P_1 + (\rho/2) (v_1)^2 = P_2 + (\rho/2) (v_2)^2,$$

onde  $P_1$  e  $P_2$  e  $v_1$  e  $v_2$ , representam, respectivamente, as pressões hidrostáticas (força/área) e as velocidades de um fluido de densidade constante  $\rho$  se movimentando em um tubo horizontal de secção reta variável.

Uma das primeiras aplicações práticas do **Teorema de Bernoulli** foi realizada pelo engenheiro francês Henri Pitot (1695-1771) ao inventar, em 1732, um dispositivo para medir a velocidade do fluxo de um fluido. Esse dispositivo consiste de dois tubos, um com uma extremidade aberta na direção do fluxo e um outro com uma extremidade também aberta, porém na direção perpendicular a esse mesmo fluxo. Esses tubos são conectados aos lados opostos de um **manômetro** de modo que a diferença entre a **pressão dinâmica** ( $P_2$ ) no primeiro tubo e a **pressão estática** ( $P_1$ ) no segundo tubo pode então ser medida. Portanto, a velocidade ( $v$ ) do fluxo de um fluido incompressível de densidade ( $\rho$ ) é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}.$$

Em 1734, Daniel Bernoulli concluiu seus estudos sobre o movimento dos fluidos e os reuniu no manuscrito intitulado **Hydrodynamica, sive de Viribus et Motibus Fluidorum Commentarii**. Neste manuscrito, estudou o fluxo estacionário de um fluido incompressível em um tubo horizontal fixo e, ao relacionar a pressão que o mesmo exerce sobre as paredes desse tubo e a sua própria velocidade ( $v$ ), obteve a seguinte relação:

$$v (dv/dx) = (a - v^2)/2c,$$

onde  $\sqrt{a}$  é uma velocidade de referência,  $dv$  é o incremento da  $v$  do fluido ao atravessar uma distância  $dx$  no tubo e  $v (dv/dx)$  representa a pressão, e  $c$  é uma constante.. Nessa equação, as unidades são escolhidas de tal maneira que  $g = 1/2$ , sendo  $g$  a aceleração da gravidade. Tal expressão traduzia o resultado que Daniel obtivera em 1730.

Um novo resultado para o estudo do movimento dos fluidos foi conseguido pelo matemático francês John (Johann, Jean) Bernoulli (1667-1748), em 1740, em seu manuscrito intitulado **Hydraulica, nunc Primum Detecta ac Demonstrata ex Fundamentis Pure Mechanice**, feito com o objetivo de criticar o livro **Hydrodynamica**, escrito por seu filho Daniel, em 1734. Nesse seu trabalho, John estudou o movimento das águas separando cuidadosamente a cinemática da dinâmica do fluxo líquido. Além do mais, ele introduziu uma “força interna” atuando nas secções retas do fluido em movimento no conduto (mais tarde foi visto que se tratava de uma **pressão interna**), ideia essa que não foi considerada por Daniel. Com isso, generalizou o teorema que o filho havia demonstrado em 1734. Hoje, o **Teorema de Bernoulli** é traduzido pela expressão:

$$P_1 + (\rho/2) (v_1)^2 + \rho g h_1 = P_2 + (\rho/2) (v_2)^2 + \rho g h_2,$$

onde  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $v_1$  e  $v_2$ , representam, respectivamente, as pressões hidrostáticas (força/área), as velocidades em dois pontos (distantes  $h_1$  e  $h_2$  de um determinado referencial) do fluido de densidade  $\rho$  constante (fluido

incompressível), e  $g$  é a aceleração da gravidade. Observe-se que  $\rho g h_1(h_2)$  representa a **pressão de Stevin** (1586)-**Pascal** (1647) (vide verbete nesta série).

O **Teorema de Bernoulli** (TB) visto acima explica a afirmação usada na Meteorologia: - *Quanto maior for o gradiente de pressão (variação de pressão) maior será o vento*. Assim, na prática meteorológica, essa afirmação significa que quanto mais apertadas estiverem as **isóbaras** (curvas de mesma pressão), maior será o **vento**, definido como o componente horizontal do movimento do ar, na direção tangente à **isóbara** correspondente. Note-se que um dos dispositivos para medir a velocidade do **vento** é o **tubo de Pitot**, como acontece, por exemplo, nos aviões.

Registre-se que o TB também foi usado pelo engenheiro italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822), em 1797, para construir um dispositivo para medir a velocidade do fluxo de um fluido. O **tubo de Venturi** consiste de um tubo no qual em determinada parte há uma redução de seu diâmetro. Esse estreitamento provoca um aumento de velocidade do fluxo com uma respectiva diminuição de pressão. Essa queda de pressão pode ser medida por intermédio de **manômetros** colocados em três seções do tubo: dois colocados antes e depois do estreitamento, e o terceiro colocado no próprio estreitamento. [Francis Weston Sears, **Física: Mecânica, Calor e Acústica** (Ao Livro Técnico, 1956)].

Ainda para o estudo dos **ventos** é importante destacar dois trabalhos. O primeiro deve-se ao astrônomo inglês Edmund Halley (1656-1724) ao demonstrar, em 1686 [*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1686-1687) **16**, p. 153], a **lei exponencial da pressão atmosférica**:

$$P = P_0 \exp(-z/H),$$

onde  $z$  é a altura na atmosfera correspondente a  $P$ ,  $P_0$  é a pressão na superfície terrestre que é praticamente constante em todo o nosso planeta, e  $H = k T/mg$ . Nesta expressão,  $k$  é a **constante de Boltzmann**,  $T$  é a temperatura absoluta,  $m$  é a massa e  $g$  a aceleração da gravidade. Por essa lei, verifica-se que em regiões quentes do globo terrestre a pressão em grandes alturas é maior do que em regiões mais frias, isto é, existe um **gradiente (variação) de pressão**. Ora, como em média, a temperatura diminui do equador para os polos, devem existir **forças de pressão** em consequência desse gradiente, dirigidas do equador para os polos. Dessa maneira, o **vento geostrófico** (veja definição abaixo) será dirigido para o leste. É por isso que se observam **ventos** predominantes em nosso planeta vindos do oeste: os famosos **ciclones**.

O outro trabalho foi o realizado pelo físico francês Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843), iniciado em 1829 e apresentado em 1835, com o título **Sur les Equations du Movement Relatif des Systèmes de Corps** ("Sobre as Equações de Movimento dos Sistemas de Corpos"), quando observou que a célebre Segunda Lei de Newton [ $F_N = m a$  (em módulo)] deveria ser modificada ao ser aplicada ao movimento de corpos (com massa  $m$ , velocidade  $v$  e aceleração  $a$ ) relacionados com um sistema de referência com velocidade angular ( $\omega$ ), para incluir as **forças de inércia**, como, por exemplo, a **força de Coriolis** [ $F_C = 2 m \omega v$  (em módulo)], que atua na direção perpendicular ao movimento. É interessante registrar que, em linguagem atual, a **Lei de Newton-Coriolis**, para sistemas não-inerciais girantes e dependentes do tempo [ $\vec{\omega}(t)$ ], é dada por:

$$\vec{F}' = m\vec{a}' = m\vec{a} - m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - 2m\vec{\omega} \times \vec{v}' - m(d\vec{\omega}/dt) \times \vec{r},$$

onde o segundo e o terceiro termos representam a expressão geral, respectivamente, da **força centrífuga** e da  $\vec{F}_C$ , sendo  $m\vec{a} = \vec{F}_N$ .

Observe que a  $\vec{F}_C$  é importante para entender o **ciclone**. Neste, há um equilíbrio (denominado de **geostrófico**, na Meteorologia) entre a **força de pressão** (decorrente do **gradiente de pressão**) e a **força de Coriolis** ( $\vec{F}_C$ ) em cada curva **isóbara**. O sentido da  $\vec{F}_C$  depende de como se olha o vetor rotação ( $\vec{\omega}$ ). Assim, no caso da Terra, o **ciclone** roda no sentido horário no hemisfério sul, e no sentido anti-horário (**anticiclone**) no hemisfério norte. [Paul A. Tipler, **Física 1** (Guanabara Dois, 1978)].



ANTERIOR

SEGUINTE