

7

Vento

O vento é um elemento meteorológico diferente das demais grandezas escalares por se tratar de uma grandeza vetorial para a qual são necessários dois dados para sua caracterização: velocidade e direção. Denomina-se vento ao componente horizontal do vetor velocidade do ar, já que as massas de ar podem se deslocar também verticalmente, sendo chamadas de correntes ascendentes e descendentes.

Tanto a velocidade como a direção do vento são grandezas instantâneas e pontuais, e com grande variação espaço-temporal. O transporte de calor associado aos deslocamentos horizontais é chamado de advecção, em oposição à convecção promovida pelos movimentos verticais.

Convencionou-se exprimir a direção do vento como a direção de onde provem o vento e não a direção para onde o vento sopra. Ela é quantificada a partir do norte geográfico, medido no sentido horário, de forma que o vento proveniente do leste terá direção de 90° , 180° de sul, e o vento de oeste terá direção de 270° .

O sentido de deslocamento do vento é resultado da diferença de pressão atmosférica entre dois pontos e é influenciado pelos efeitos locais como orografia (relevo) e rugosidade do solo entre outros obstáculos (vegetação e edificações, por exemplo.). Essas diferenças locais de pressão atmosférica são devidas a um diferencial de aquecimento do ar, relacionado diretamente à radiação solar.

7.1 Dinâmica da Atmosfera

A proporção de cada um dos gases constituintes da atmosfera (Tabela 1, do Capítulo 1) reflete a média de diversas

medições da concentração de cada um desses gases, realizadas em diferentes altitudes da atmosfera e pontos geográficos do globo. No observatório instalado na Ilha de Mauna Loa, no Havaí (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2008), por exemplo, pela distância de todos os grandes centros emissores de gases, mede-se ininterruptamente, desde 1958, a concentração de dióxido de carbono. Essa medida é tomada como referência mundial, servindo à análise das oscilações temporais da concentração desse gás.

É graças à dinâmica da atmosfera que os gases produzidos naturalmente, ou por ação antrópica, ao invés de ficarem aprisionados sob os centros emissores, são carregados a grandes distâncias, mantendo a concentração local em níveis suportáveis. Isso pode ser constatado em grandes centros urbanos, tal como a cidade de São Paulo, onde aglomerados industriais e enormes frotas de veículos despejam toneladas de CO_2 diariamente na atmosfera.

É o contato entre o ar e a superfície terrestre aquecida pela radiação solar que impulsiona o movimento atmosférico vertical. A transferência energética superfície-ar promove seu aquecimento com redução da sua densidade e, uma conseqüente, convecção dessa parcela de ar. O vazio deixado pela parcela de ar que ascendeu é preenchido por outra parcela de ar, mais frio, que irá se aquecer, tornar-se menos densa e, assim, continuar o movimento atmosférico vertical (Fig. 1). Esse processo induz o transporte dos gases produzidos na superfície às camadas mais elevadas da atmosfera.

Há, ainda, um segundo movimento das massas de ar, no sentido horizontal, que é o vento. Esse movimento se dá em resposta a diferença de pressão atmosférica entre duas regiões. Regiões com maior disponibilidade de energia radiante apresentam ascensão de massas de ar formando os chamados centros de baixa pressão. Regiões mais frias, com menor disponibilidade energética, apresentam estagnação das massas de ar junto à superfície formando os centros de alta pressão. O vazio deixado pela massa de ar aquecido, que ascende e forma um centro de baixa pressão, é sempre preenchido pelo ar oriundo dos centros de alta pressão, impulsionando o deslocamento horizontal do ar (Fig. 1).

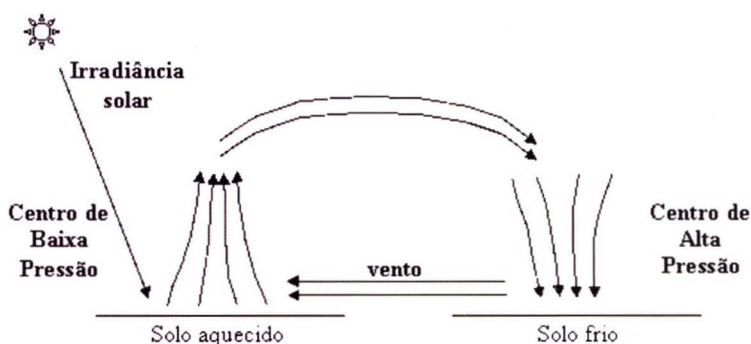


Fig. 1. Ilustração dos movimentos vertical e horizontal da atmosfera.

Ao se analisar o vento em alturas maiores, há uma redução no atrito ou resistência ao deslocamento horizontal das massas de ar em contato com a superfície terrestre. A velocidade do vento é exponencialmente aumentada de acordo com a altura, com ventos de mais de 125 km/h, chegando até 350 km/h em determinadas circunstâncias em altitudes superiores aos 10.000 m

87

7.2 Formação dos Ventos

Na alta atmosfera, é possível prever com boa exatidão a direção do deslocamento das massas de ar. Já nas camadas atmosféricas mais próximas à superfície, a turbulência formada pelo choque das moléculas com diversos obstáculos (atrito com a superfície) e o aquecimento da superfície, acaba reduzindo a velocidade do vento e modificando sua direção de deslocamento.

Em princípio, o vento deveria dirigir-se de um ponto de alta pressão para outro com pressão menor, perpendicularmente às isóbaras, que são linhas de mesma pressão traçadas em mapas meteorológicos. A rotação da Terra, entretanto, é um elemento importante que torna essa análise um pouco mais complexa.

Um engenheiro francês chamado Garpard de Coriolis demonstrou que a força aparente responsável pelo desvio do vento entre dois pontos com pressões diferentes é proporcional à velocidade angular de rotação da Terra (15° por hora), à velocidade do

vento e ao seno da latitude do local (no Equador, a latitude é zero e $\sin 0^\circ = 0$; nos pólos tem-se que $\sin 90^\circ = 1$) (AYOADE, 1996). Assim, esta força não age no Equador, mas é de grande importância na definição da direção dos ventos nos pólos.

Esta força, conhecida como força de Coriolis, é a responsável pelo desvio no deslocamento dos fluidos em movimento sobre a Terra, especialmente a água e o ar, para a direita no hemisfério norte e para a esquerda no Hemisfério Sul.

Segundo Viers (1975), como a ação da força de Coriolis é contínua e seu efeito é cumulativo, se a distância percorrida pelo vento é grande, ele tende a tomar direção paralela às isóbaras e perpendicular ao gradiente de pressão nas latitudes distantes do Equador e nas camadas mais altas da atmosfera, onde a velocidade é maior, deixando assim o centro de alta pressão a sua direita no Hemisfério Norte e a sua esquerda no Hemisfério Sul.

Com base nesses conceitos, é possível estabelecer os seguintes padrões: “a redução na velocidade dos ventos nas camadas mais baixas da atmosfera faz com que sua direção tenha ângulo aproximado em relação às isóbaras de 10° sobre os oceanos e de 30° no continente; ventos fracos, ventos situados em baixas latitudes e ventos locais com curtos deslocamentos não são desviados”.

A circulação atmosférica é formada por um campo de pressão atmosférica que aumenta sua complexidade conforme se aproxima da superfície. A Fig. 2 é utilizada comumente para elucidar a variação do vento com a altitude nas camadas mais próximas à superfície do solo. Devido à viscosidade do ar e ao atrito da superfície sobre a parcela de ar que se desloca, a redução da velocidade do vento é tanto mais efetiva quanto mais próxima da superfície esteja a molécula de ar que se desloca.

É evidente que quanto mais rugosa for a superfície, maior sua interação com as moléculas de ar e, conseqüentemente, mais intenso será o atrito e a redução da velocidade nas camadas mais próximas à superfície. A premissa envolvida na Fig. 2 é muito utilizada nos estudos dos processos de trocas gasosas entre a superfície e a atmosfera, e a turbulência causada pela rugosidade da superfície deve ser considerada por constituir um importante elemento de promoção da mistura das camadas de ar em alturas diferentes.

Outro fator que incrementa a turbulência é o movimento ascendente das parcelas de ar que, ao entrar em contato com a superfície do solo aquecido, provoca uma movimentação desordenada, misturando as camadas da atmosfera.

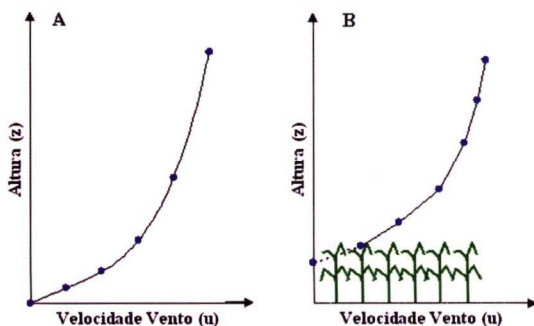


Fig. 2. Variação exponencial da velocidade do vento (u) em superfícies sem (A) e com vegetação (B).

Este tipo de análise se aplica convenientemente para os ventos locais e, como mencionado, próximos à superfície. Nas camadas mais altas da atmosfera, contudo, o que se observa são os ventos regionais e zonais, além daqueles que compõem a circulação planetária. Esta circulação de macroescala é decorrente, principalmente, do aquecimento desuniforme do globo terrestre que, com isso, forma zonas de pressão atmosférica desiguais.

Apesar da grande variabilidade no tempo e no espaço, é possível identificar padrões relativamente estáveis de circulação da atmosfera, entre faixas de alta e baixa pressão. Na região do Equador, existe uma faixa de baixas pressões por causa do forte calor. Em torno da latitude 30° , tanto no hemisfério norte como no sul, existe uma faixa de altas pressões, sendo que, na faixa entre 60° e 70° , há outra zona de baixa pressão. A última zona de pressão é constituída pelos pólos, com alta pressão, sendo que nas faixas intermediárias entre cada uma dessas zonas formam-se células de circulação, cujos ramos superiores têm sentido contrário aos ramos próximos à superfície (Fig. 3). Nas regiões de transição das células de circulação é normal a ocorrência de calmarias. Nas zonas tropicais, onde os ventos alísios dos dois hemisférios se encontram, forma-se a zona de convergência

intertropical (ZCIT⁹), responsável por chuvas intensas e frequentes na região equatorial.

Na América do Sul, as massas de ar polar se movimentam em direção ao Equador, atraídas pelos centros de baixa pressão. A força de Coriolis desloca as massas em direção oeste e a presença de massas quentes tende a retardar ou mesmo impedir o avanço das frentes frias.

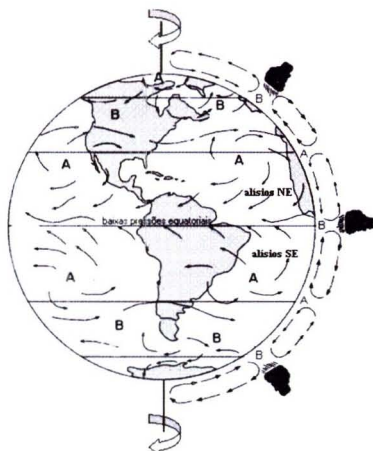


Fig. 3. Circulação geral da atmosfera, ilustrando a formação dos ventos alísios e das células de circulação.
Fonte: Tavares (2008).

7.3 Medida da Velocidade e Direção do Vento

Os anemômetros de sensores mecânicos registram a velocidade do vento através do movimento de um conjunto de três ou quatro canecas (conchas) ou de uma hélice (Fig. 4). Cada rotação gera um pulso elétrico que é captado por um sistema de aquisição eletrônica de dados. Como cada pulso corresponde à distância (d) de um giro, conhecendo-se o número de pulsos registrados em certo tempo (t), é possível obter a equação 1:

$$v = \frac{d}{t} \left(\text{expresso em } \frac{\text{km}}{\text{hora}} \text{ ou } \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1)$$

⁹Região de elevação do ar quente e úmido, pouco vento e formação de um denso cinturão de nuvens convectivas. Além da região tropical, o encontro dos ventos de leste e oeste forma zonas de convergência extratropical (ZCET), caracterizadas pelo contato de uma massa de ar frio e seco com outra quente e úmida, originando sistemas frontais que causam chuvas em boa parte do Brasil.

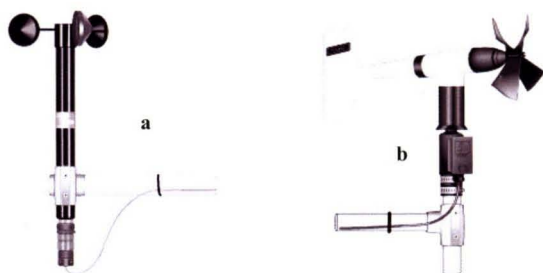


Fig. 4. Anemômetro de canecas (a) e a anemômetro de hélice (b).
Fonte: Campbell Scientific Inc. (2008a, b).

De acordo com a Escala de Beaufort (Tabela 1), as velocidades dos ventos podem ser estimadas de acordo com o efeito provocado por eles através de observação visual, sem necessariamente fazer uso de aparelhos.

Tabela 1. Escala de Beaufort, com a designação, faixas de velocidades e efeitos visuais decorrentes da movimentação do ar.

Designação	km/h	m/s	Efeitos em terra
Calmaria	<2	<1	Fumaça sobe na vertical
Bafagem	2 a 6	1 a 2	Fumaça indica direção do vento
Aragem	7 a 11	2 a 3	As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar
Fraco	13 a 19	4 a 5	As folhas agitam-se e as bandeiras desfraldam ao vento
Moderado	20 a 30	6 a 8	Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores
Fresco	31 a 39	9 a 11	Movimentação de árvores pequenas; superfície dos lagos ondula
Muito Fresco	41 a 50	11 a 14	Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter guarda-chuva aberto
Forte	52 a 61	14 a 17	Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento
Muito Forte	63 a 74	17 a 21	Quebram-se galhos de árvores; circulação de pessoas difícil
Duro	76 a 87	21 a 24	Danos em árvores; impossível andar contra o vento
Muito Duro	89 a 102	25 a 28	Árvores arrancadas; danos na estrutura de construções
Tempestade	104 a 117	29 a 32	Estragos abundantes em telhados e árvores
Furacão	>119	>33	Grandes estragos

No Sistema Internacional, a velocidade do vento é expressa em metros por segundo (m.s^{-1}) ou quilômetros por hora (km.h^{-1}), mas há, também, o knot (kt) (pronuncia-se nó), unidade muito utilizada em alguns ramos de atividade como unidade de expressão da velocidade do vento ($1\text{knot}=0,514\text{m.s}^{-1}$).

7.4 Potencial Eólico

Quando se estudam os ventos, uma aplicação que ganha importância é a conversão energia eólica - energia cinética dos ventos - em energia elétrica renovável, limpa e prontamente utilizável, como utilizada há centenas de anos pelo homem, para impulsionar suas embarcações e movimentar moinhos de bombeamento de água ou moagem de grãos. Segundo WWF-Brasil (2006), o mercado de energia elétrica é o que mais cresce no mundo dentre as chamadas fontes alternativas, com taxas médias em torno de 40%.

Hoje, a principal finalidade da energia eólica é a geração de energia elétrica através dos aerogeradores. Eles são grandes turbinas em forma de cata-ventos movidos por hélices e agrupados em grande número nas regiões com boa disponibilidade de vento, sendo seu uso imprescindível para se ter rentabilidade na produção de eletricidade.

A Fig. 5 ilustra um parque de produção de energia eólica instalado no município de Osório no Rio Grande do Sul, com capacidade instalada de 150 MW, que poderia suprir uma cidade de 700 mil habitantes se todo esse potencial fosse utilizado.



Fig. 5. Vista aérea do Parque Eólico de Osório no Rio Grande do Sul.
Fonte: Rio Grande do Sul (2008).

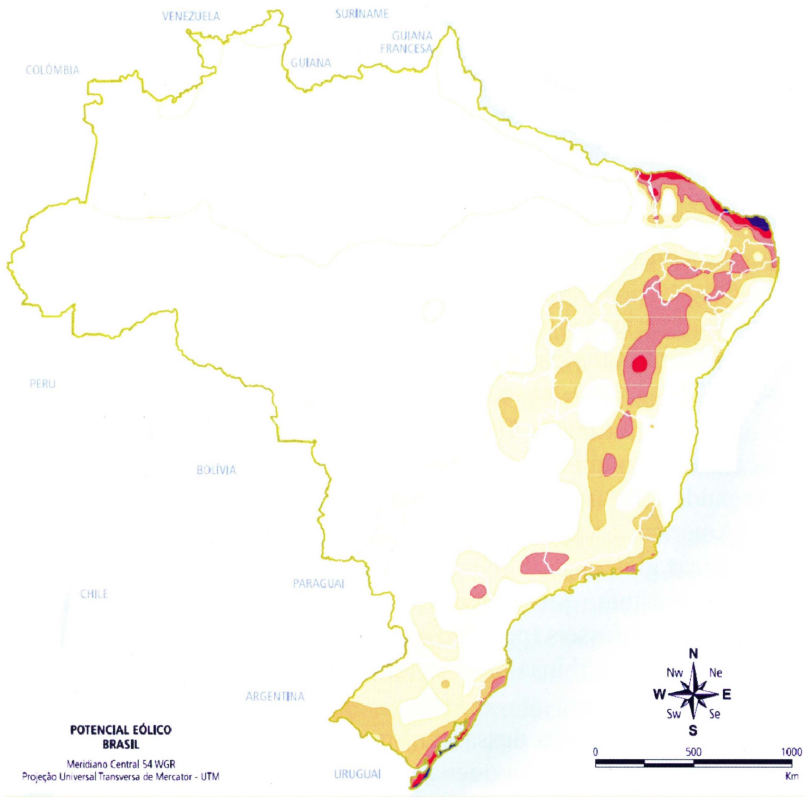
Em países como a Alemanha, Espanha e Estados Unidos, uma fração expressiva da energia elétrica já é produzida a partir dos aerogeradores. O Brasil ainda conta com poucas usinas eólicas, perfazendo uma capacidade de apenas 22 MW (megawatts), frente a um potencial que gira ao redor de 60.000 MW, segundo relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) divulgado em 2003.

Para se avaliar o potencial eólico de uma determinada região são necessários trabalhos sistemáticos de coleta e análise dos dados de velocidade e regime dos ventos. Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W.m^{-2} , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m.s^{-1} (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005).

Conforme a Organização Mundial de Meteorologia, em média, essa condição é atendida em apenas 13% da superfície terrestre, chegando a 32% na Europa Ocidental, 23% na América do Norte e 10% na América Latina. Frente à atual problemática das mudanças climáticas globais, decorrência do aumento da concentração dos gases de efeito estufa, que tem como causa principalmente a queima de combustíveis fósseis (petróleo e carvão), a geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas apresenta-se como alternativa para diversas demandas.

A instalação dessas turbinas isoladamente ou em pequeno número pode suprir pequenas localidades distantes das redes de transmissão. Já as usinas de grande porte, conhecidas como parques eólicos, fornecem parcela importante de energia aos sistemas nacionais, contribuindo com a redução da emissão de poluentes, principalmente CO_2 , em substituição às usinas movidas a carvão ou óleo, reduzindo, também, a influência da sazonalidade hidrológica sobre a produção em hidroelétricas.

Com base na Fig. 6, pode-se observar que o potencial para produção de energia eólica no Brasil aponta para a região do semi-árido e litoral do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. Há, também, condições para o uso de geradores de energia nas regiões mais elevadas do Estado de São Paulo, Paraná e em boa parte do Rio Grande do Sul, com potencial de velocidade do vento maior que 6 m.s^{-1} .



Velocidade média do vento (m/s) 50 m acima do nível da superfície					
Classes de energia	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	 > 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	 4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	 3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	 < 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

NOTAS:

Mata indica áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas.

Campo aberto refere-se a áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas.

Zonas costeiras são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente no sentido mar-terra.

Morros são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo e de pouca vegetação ou pasto.

Montanhas representam áreas de relevo complexo com altas montanhas. O potencial eólico é dado para locais nos topos das montanhas em condições favoráveis para o fluxo de vento.

Fig. 6. Velocidade média do vento a 50 m de altura no Brasil.
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2005).

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Energia eólica. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). *Atlas de energia eólica do Brasil*. Brasília, DF, 2005. p. 93-110. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2008.

AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 332 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. 014A – L: *Met One anemometer*. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com/014a>>. Acesso em 15 jul. 2008a.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. 05305 – L: *R. M. Young wind monitor-AQ*. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com/05305-l>>. Acesso em 15 jul. 2008b.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (Estados Unidos). *Carbon dioxide trends*. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 01 jul. 2008

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. *Parque eólico de Osório*. Disponível em <<http://www.rs.gov.br/master.php?capa=1&inc=governo/fotos.php&abaVig=maisf&mes=05&dia=16&ano=2007&codFoto=1908>>. Acesso em: 15 jul. 2008.

TAVARES, C. *O Círculo do Geógrafo*. Disponível em <<http://clientes.netvisao.pt/carlhenr/7ano.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2008.

VIERS, G. *Climatologia*. Barcelona: Oikos-Tau, 1975. 309 p.

WWF-BRASIL. *Agenda elétrica sustentável 2020: estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo*. Brasília, DF, 2006. 84p. (Série técnica, v. 9).