

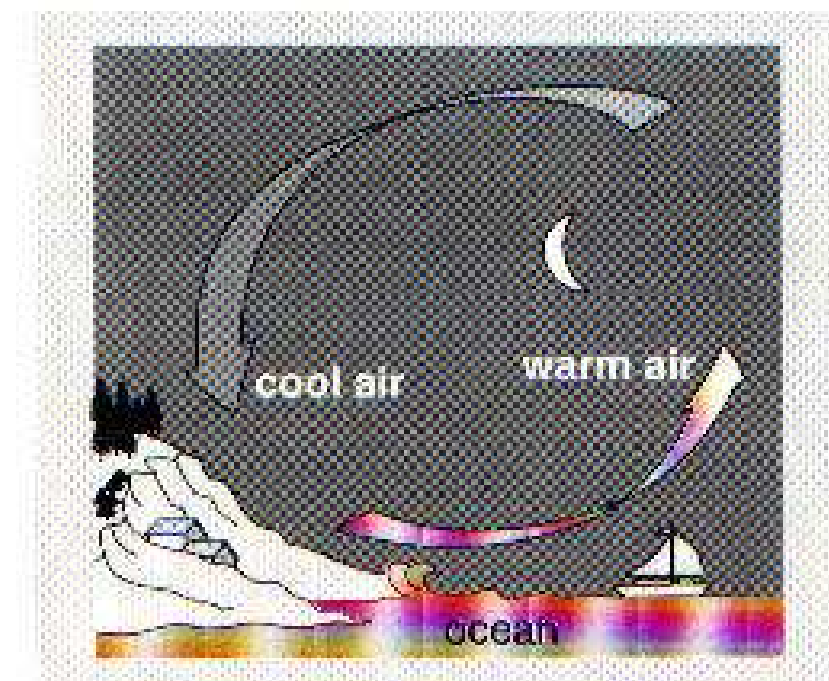
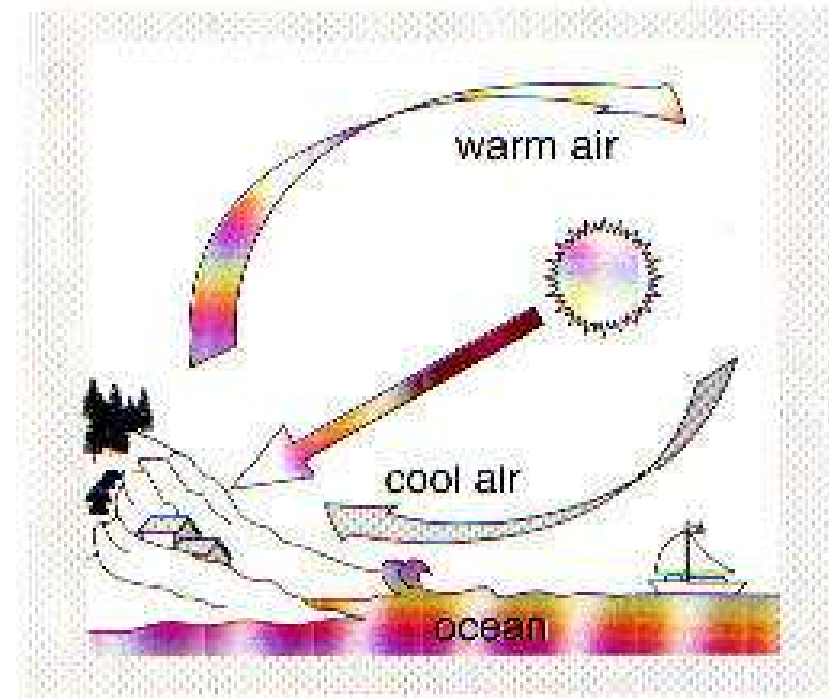
PEN 5002: Recursos e Oferta de Energia

Prof. Célio Bermann

5ª aula - Energia Eólica

- . aspectos tecnológicos e socioambientais
- . aplicações da energia eólica
- . Grupo de alunos: potenciais estimados/ usinas eólicas em operação (mundial, ALC e Brasil)

A energia eólica é originada pelo deslocamento do ar (ventos) na atmosfera próxima à superfície da Terra, devido a diferenças de pressão (centros de alta e de baixa), provocadas pelo aquecimento diferenciado do ar pela energia solar e também pelo movimento de rotação da Terra.

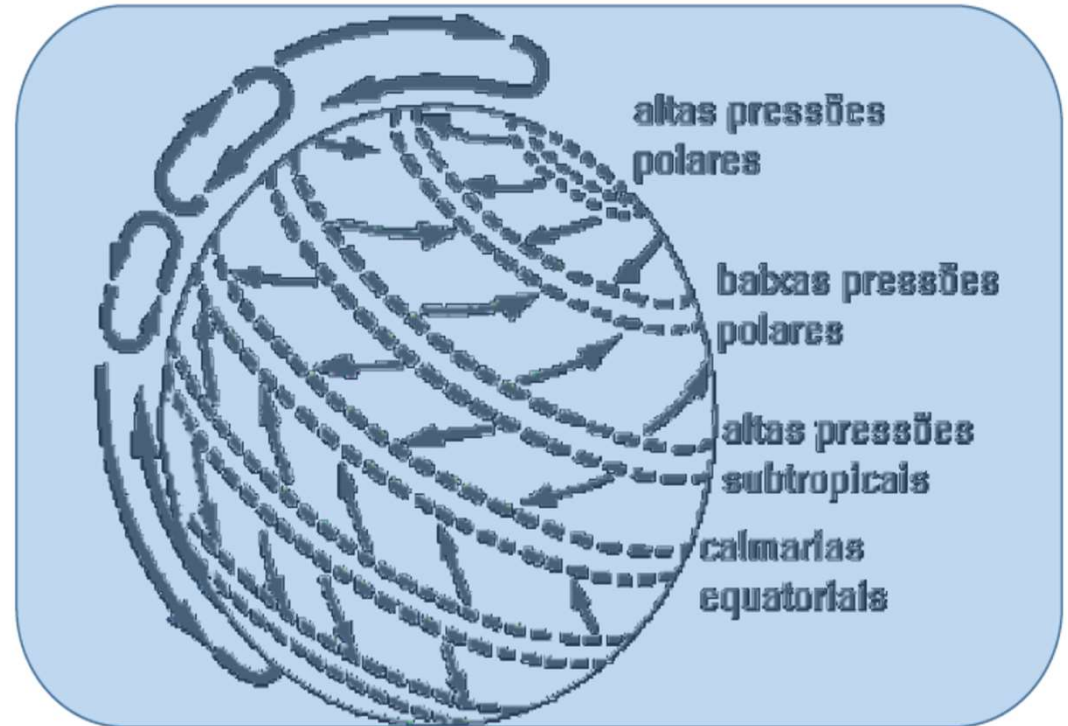


O Mecanismos de Geração dos Ventos

- ➔ A não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores a:

- ➔ orientação dos raios solares e
- ➔ aos movimentos da Terra

- ➔ As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares.



- ➔ Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares.
- ➔ O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos.

Ventos planetários ou constantes

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de "soprar", pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza.

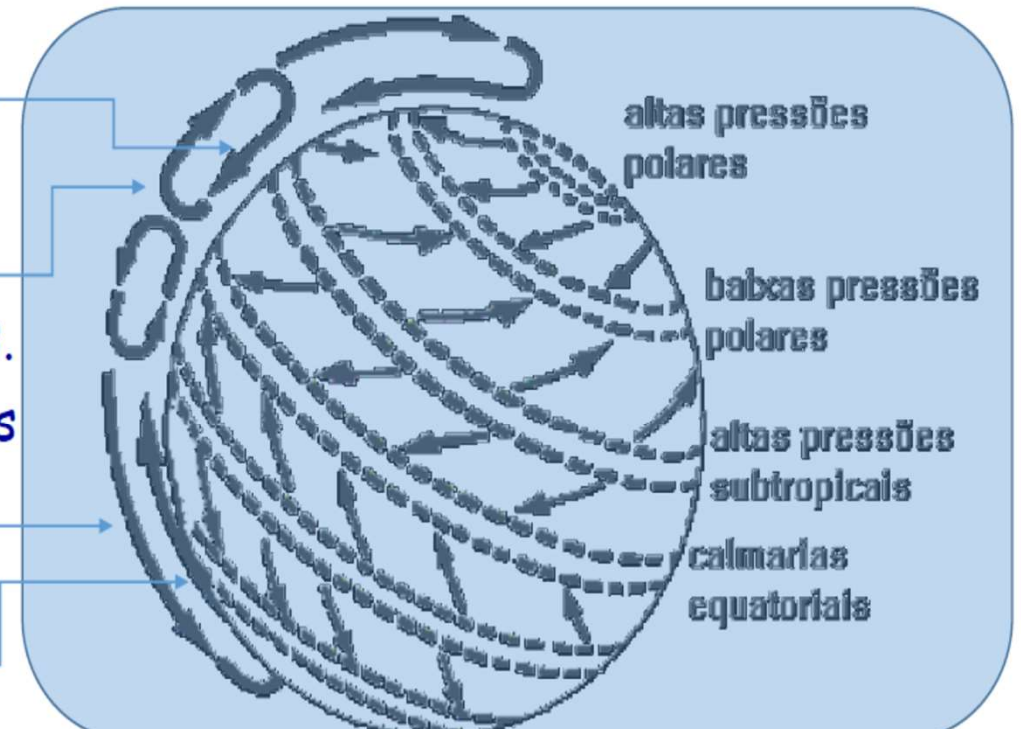
Esses são os chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.

Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.

Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.

Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.



Ventos periódicos ou continentais (monções e brisas)

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de 23,5° em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre.

Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

→ As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

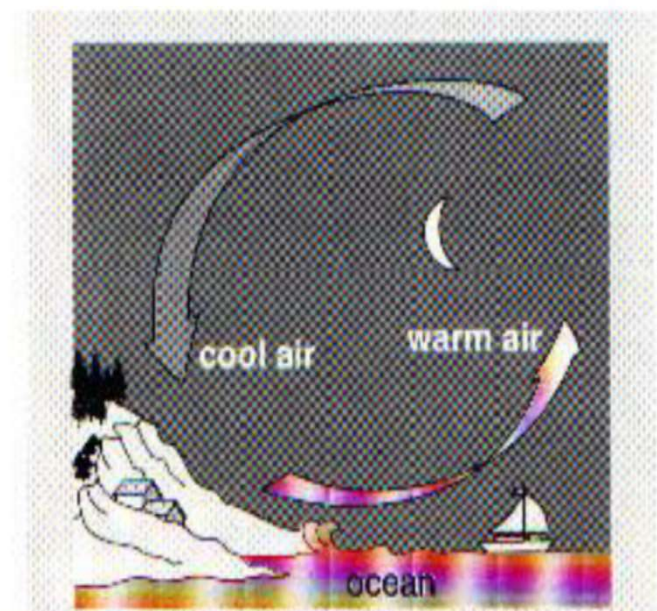
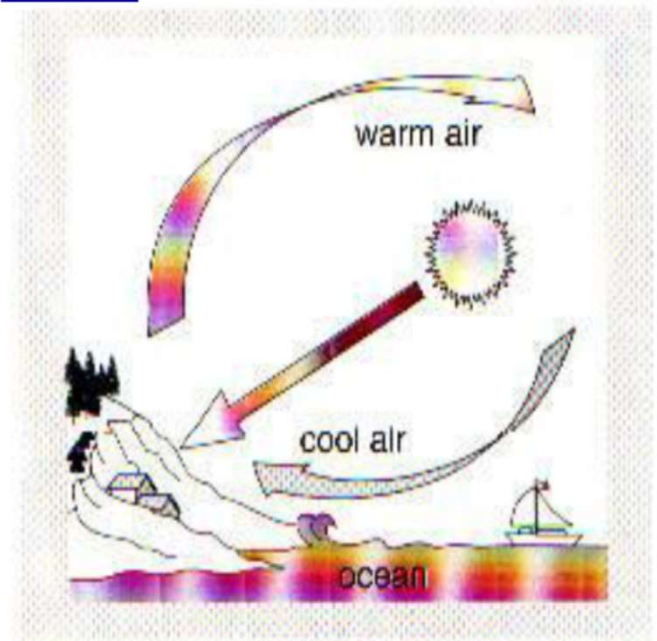
Ventos periódicos: monções e brisas

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa.

No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima).

À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar.

Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.



Outros fatores de influência sobre os ventos (ventos locais)

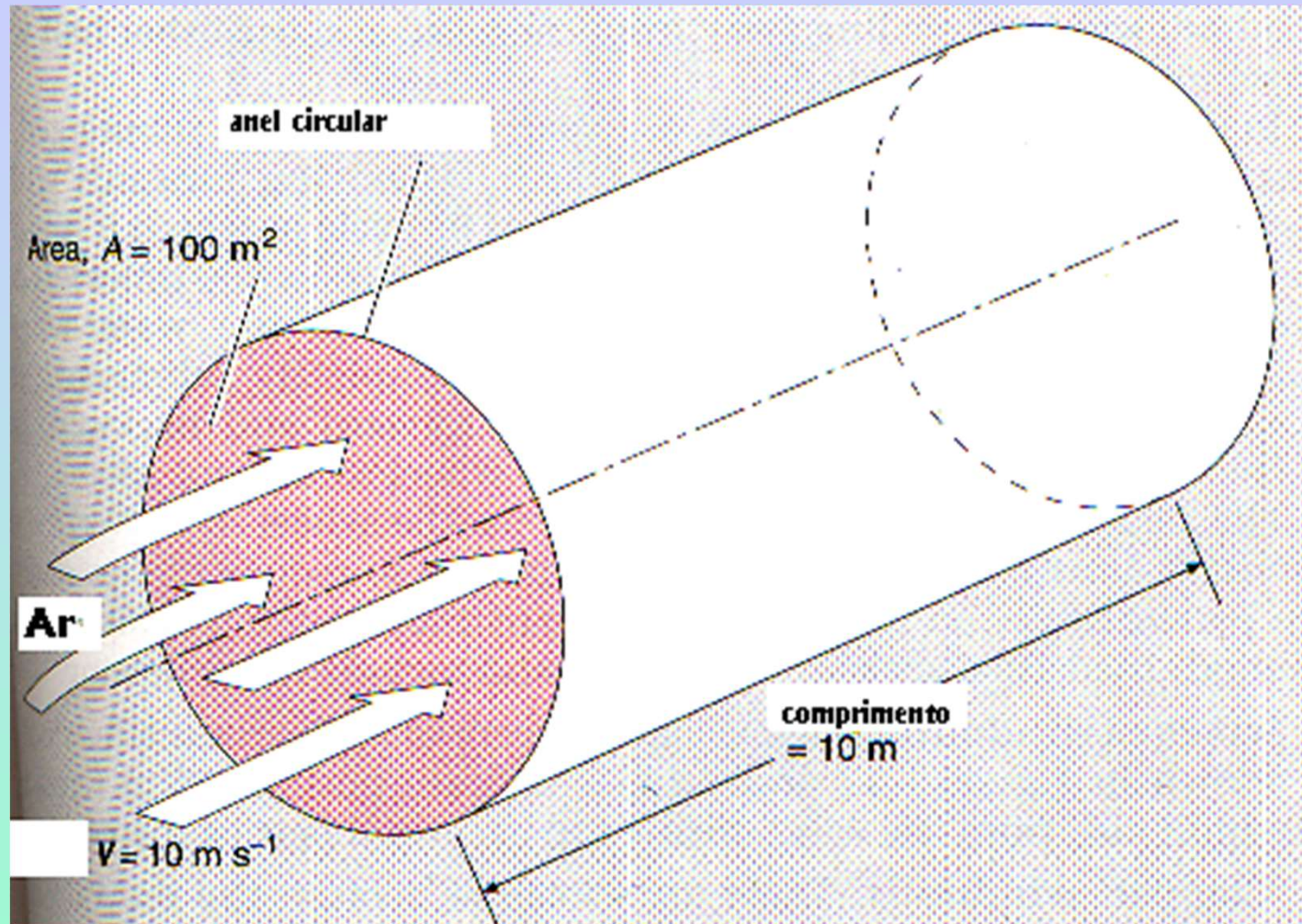
Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito anteriormente, encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos.

São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados.

A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

Os ventos, quaisquer que sejam, também são influenciados por diferentes aspectos entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

Cálculo da Potência do Vento



Potência: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

Energia cinética = $\frac{1}{2} mv^2$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

onde:

E = energia cinética, em Joules;

m = massa de ar, em kg;

v = velocidade do vento, em m/s

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade de vento v :

$$P(\text{Watts}) = \frac{1}{2} \rho A_r v^3 C_p \eta$$

ρ = densidade do ar em kg/m^3

$A_r = \pi \cdot D^2/4$, em que D é o diâmetro do rotor

C_p = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor

η = eficiência do conjunto gerador/transmissão

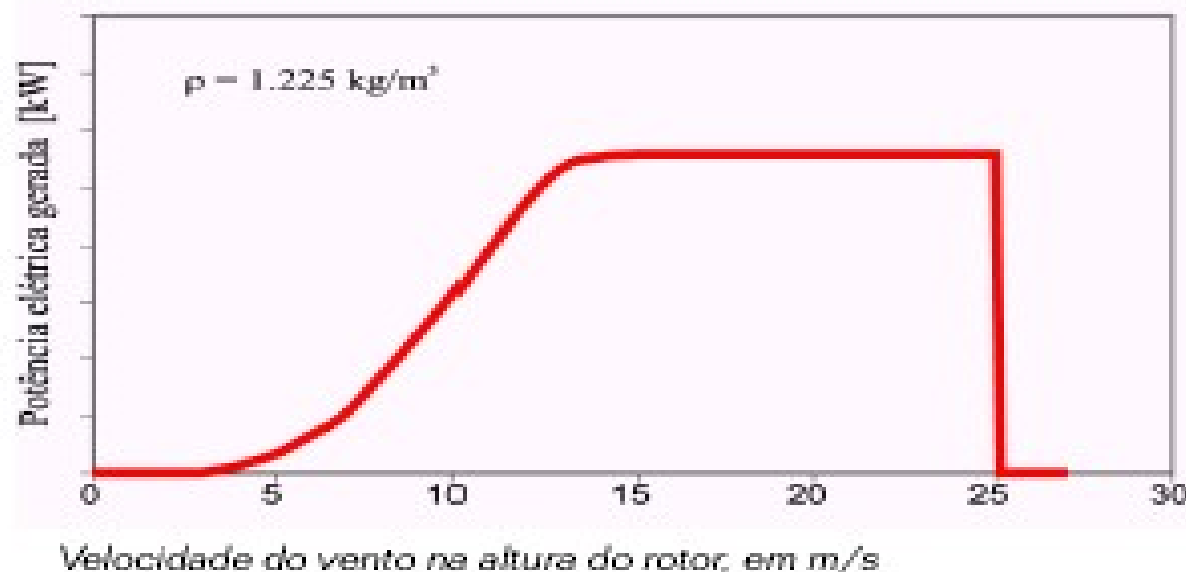


Figura 2.4 – Curva típica de potência de turbinas eólicas

$$E = \frac{1}{2} m V^2$$

Assumindo que o aerogerador possua pás de raio R . A massa de ar que atravessa a área circular descrita pela rotação das pás, ocorre através de um escoamento ideal, sem levar em consideração qualquer tipo de perturbação é:

$$m = \rho S V = \rho \pi R^2 V$$

A potência teórica P correspondente à energia cinética E do vento será;

$$P = \frac{\rho}{2} \pi R^2 V^3 = \frac{\rho}{2} S V^3$$

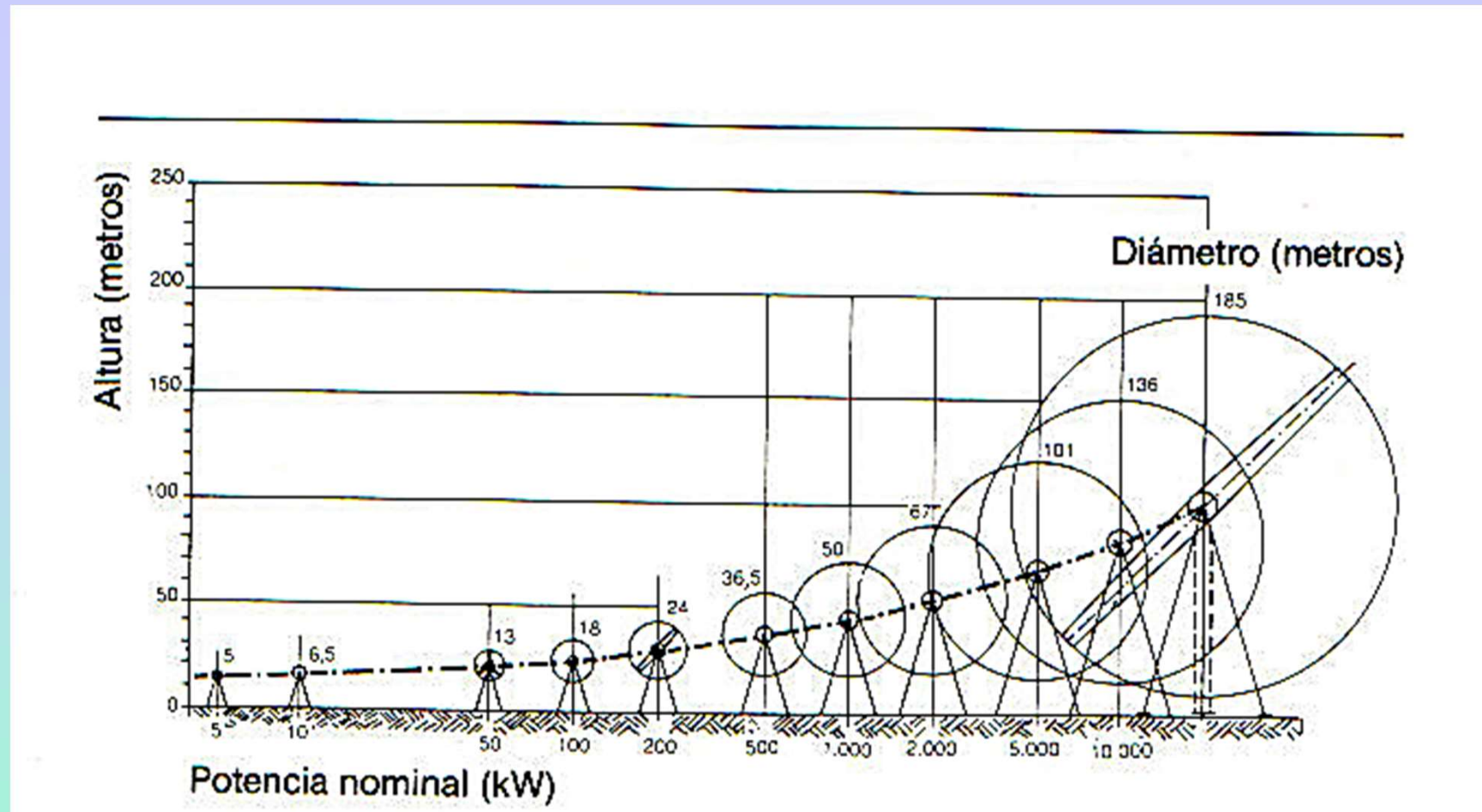
$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} S V^3$$

A grandeza $16/27 = 0,5926$ foi designada por Betz com o nome de coeficiente de potência e é representada por C_p .

$$C_p = \frac{2P_{\max}}{\rho V^3}$$

A potência máxima aproveitável pelo aeromotor corresponde teoricamente a 59,26% da potência total cedida pelo vento, isto é, a $C_p = 0,5926$. Na realidade, a potência total cedida pelo vento é ainda menor, devido às perdas aerodinâmicas e mecânicas nos aerogeradores.

Cálculo da Potência de Aerogeradores



$$\text{Fórmula de Betz: } P_{\text{máx}} = \frac{8}{27} \rho S v^3$$

$$S = \pi r^2$$

$$P_{\text{máx}} = \frac{8}{27} \rho \pi r^2 v^3$$

Esta expressão pode ser usada para o pré-dimensionamento de um gerador eólico. Na prática os aerogeradores, em geral, não superam 0,7 do valor de $P_{\text{máx}}$ da fórmula de Betz.

Dependência dos Ventos

- Velocidades Médias:

> 6.0 m/s (bons sítios a 20m)

- Distribuição Estatística:

Weibull (parâmetros c e k)

- Curva de Potência:

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$\eta < 60\%$ (eficiência máx.)

Influência da Altura

Expressão simplificada

$$V(z) = V(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^n$$

Descrição do terreno	Fator n
Superfície lisa, lago ou oceano	0.10
Gramma baixa	0.14
Vegetação rasteira (~ 0.3 m) poucas árvores	0.16
Arbustos, árvores ocasionais	0.20
Árvores, construções ocasionais	0.22 – 0.24
Áreas residenciais	0.28 – 0.40

onde:

$V(z)$ = Velocidade na altura z

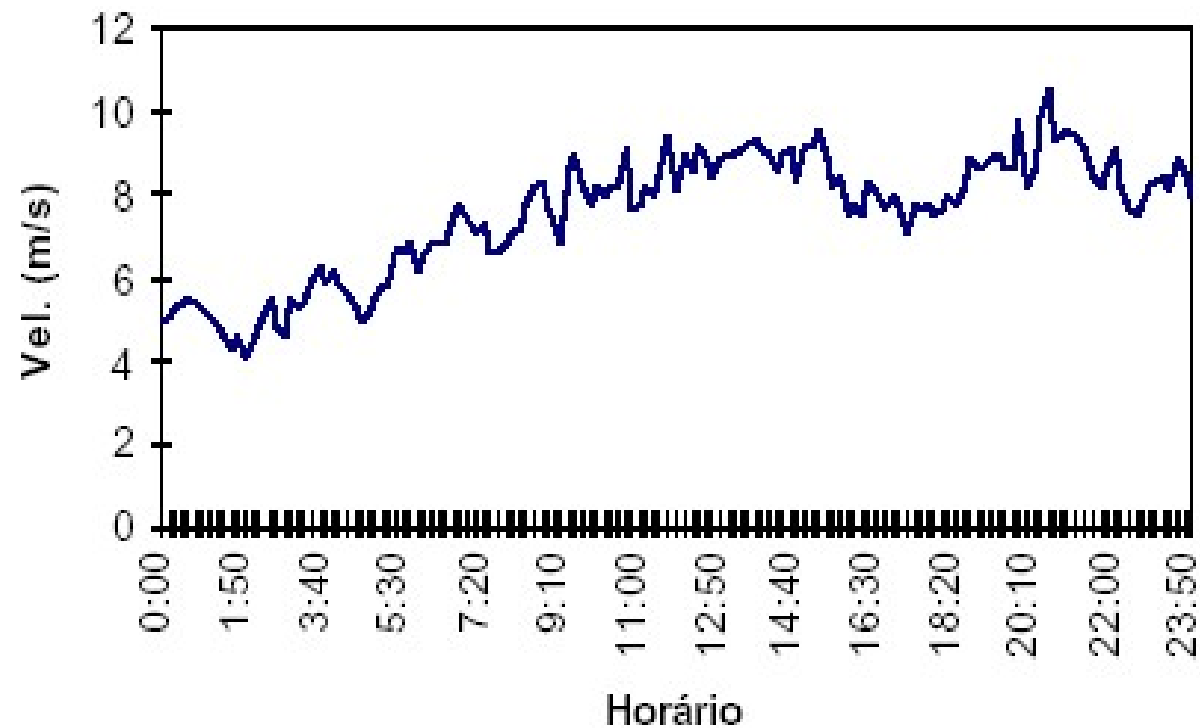
$V(z_r)$ = Velocidade na altura de referência z_r

z = Altura desejada

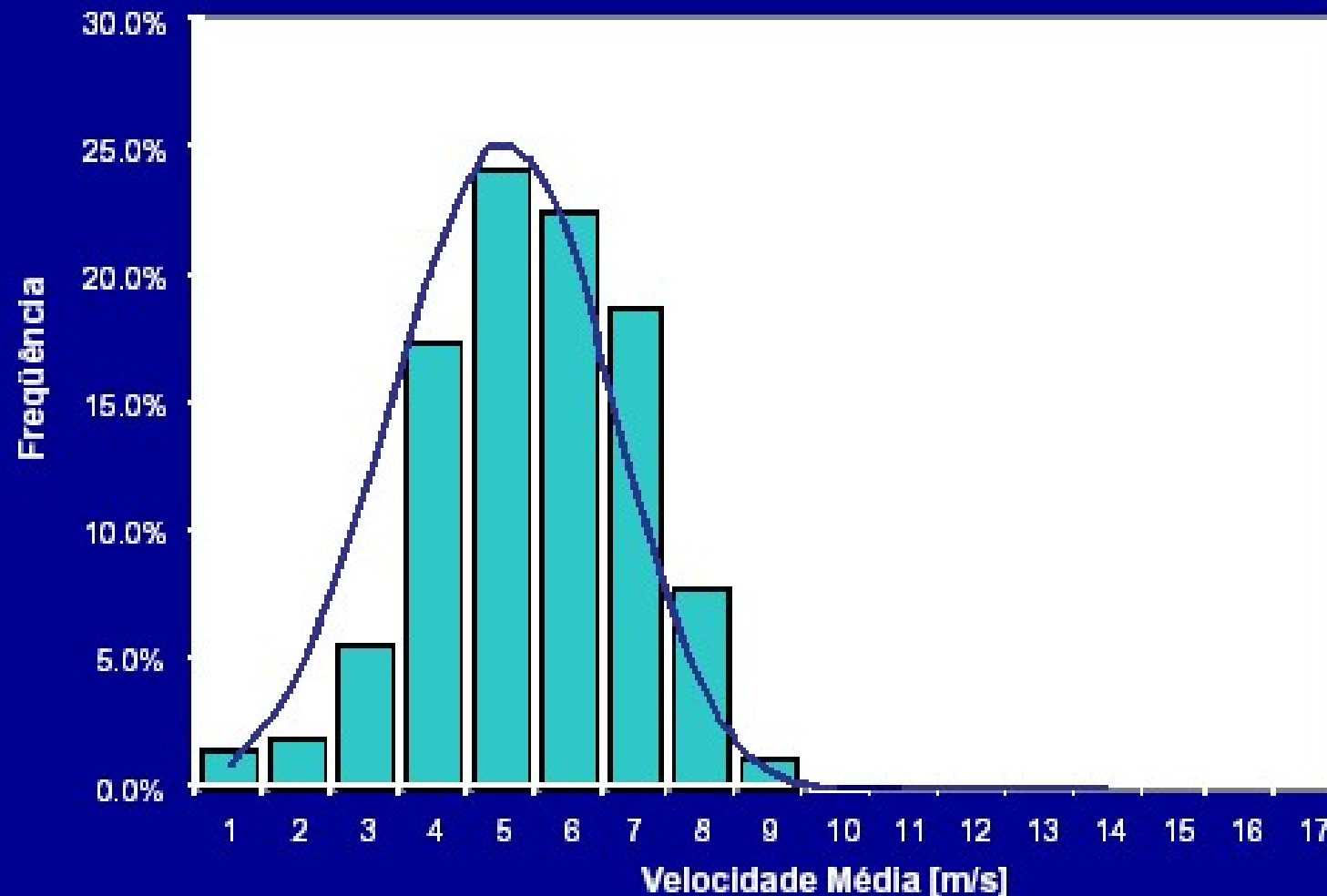
z_r = Altura de referência

n = Parâmetro diretamente associado à rugosidade da superfície

Comportamento do vento em um dia típico



Histograma de dados de vento

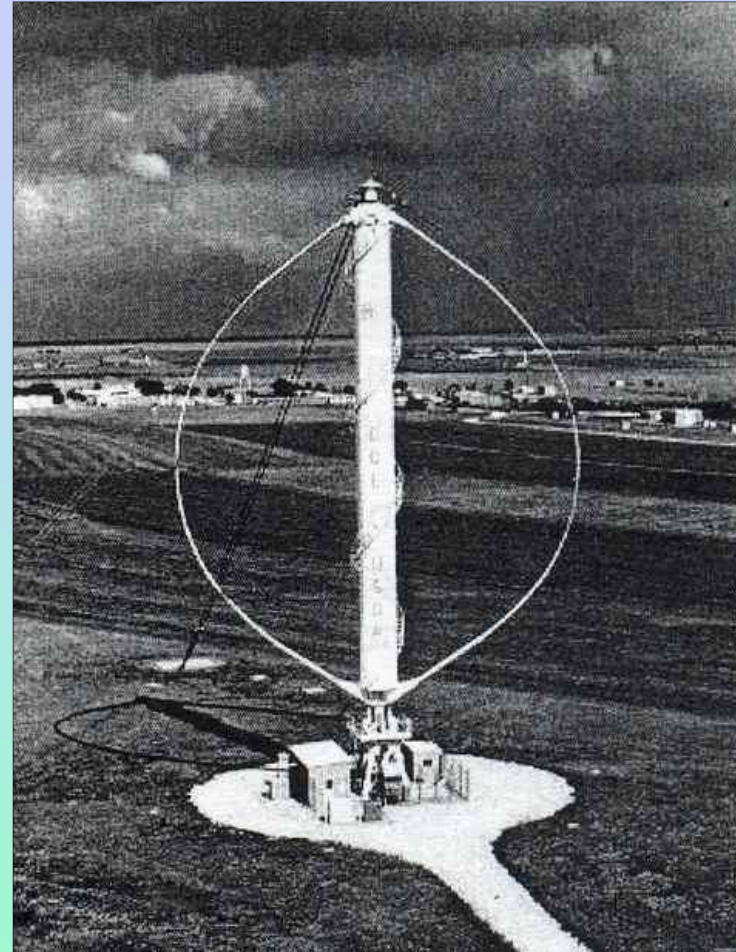


Tipos de turbinas eólicas:



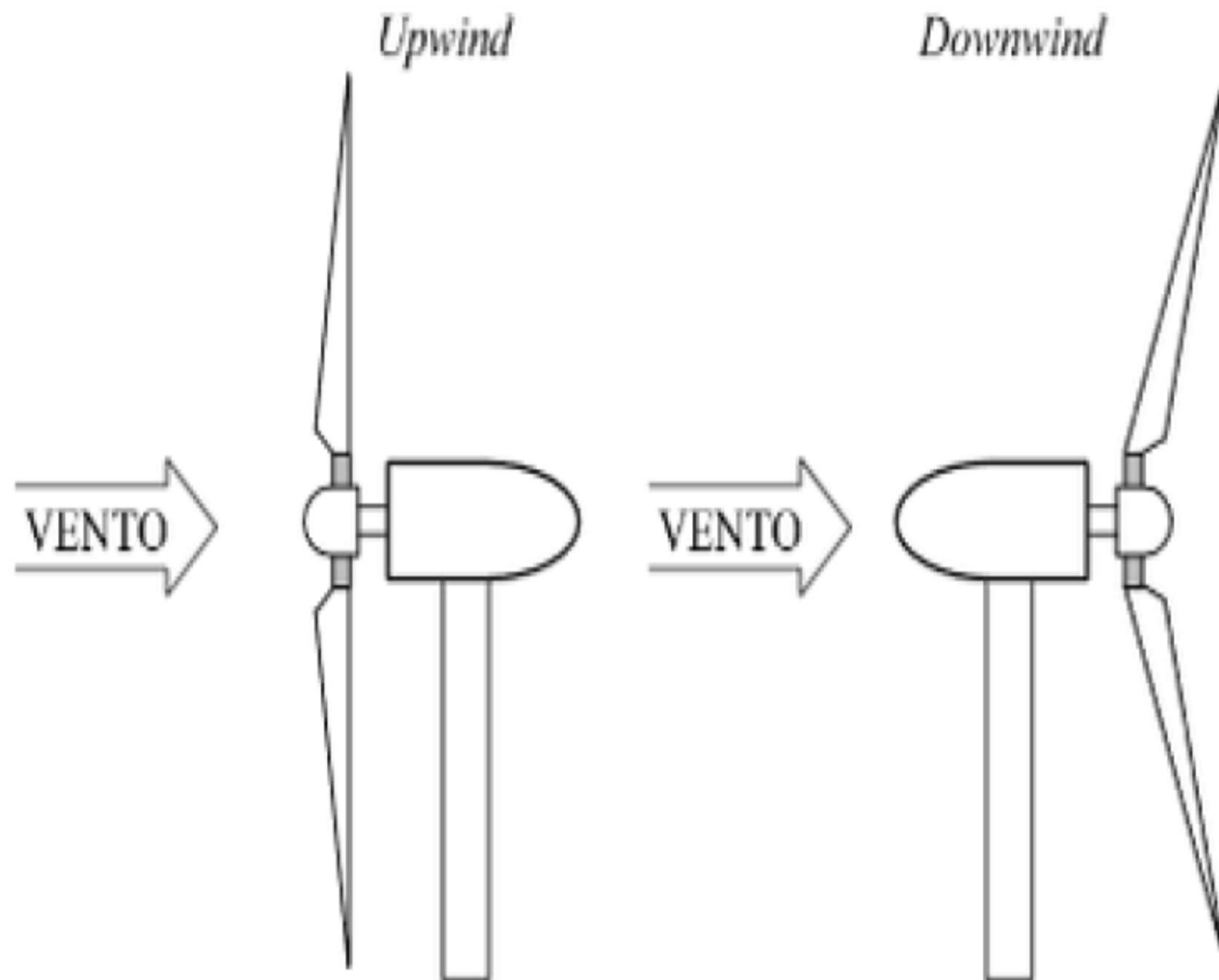
(a)

(a) Turbina eólica de eixo horizontal

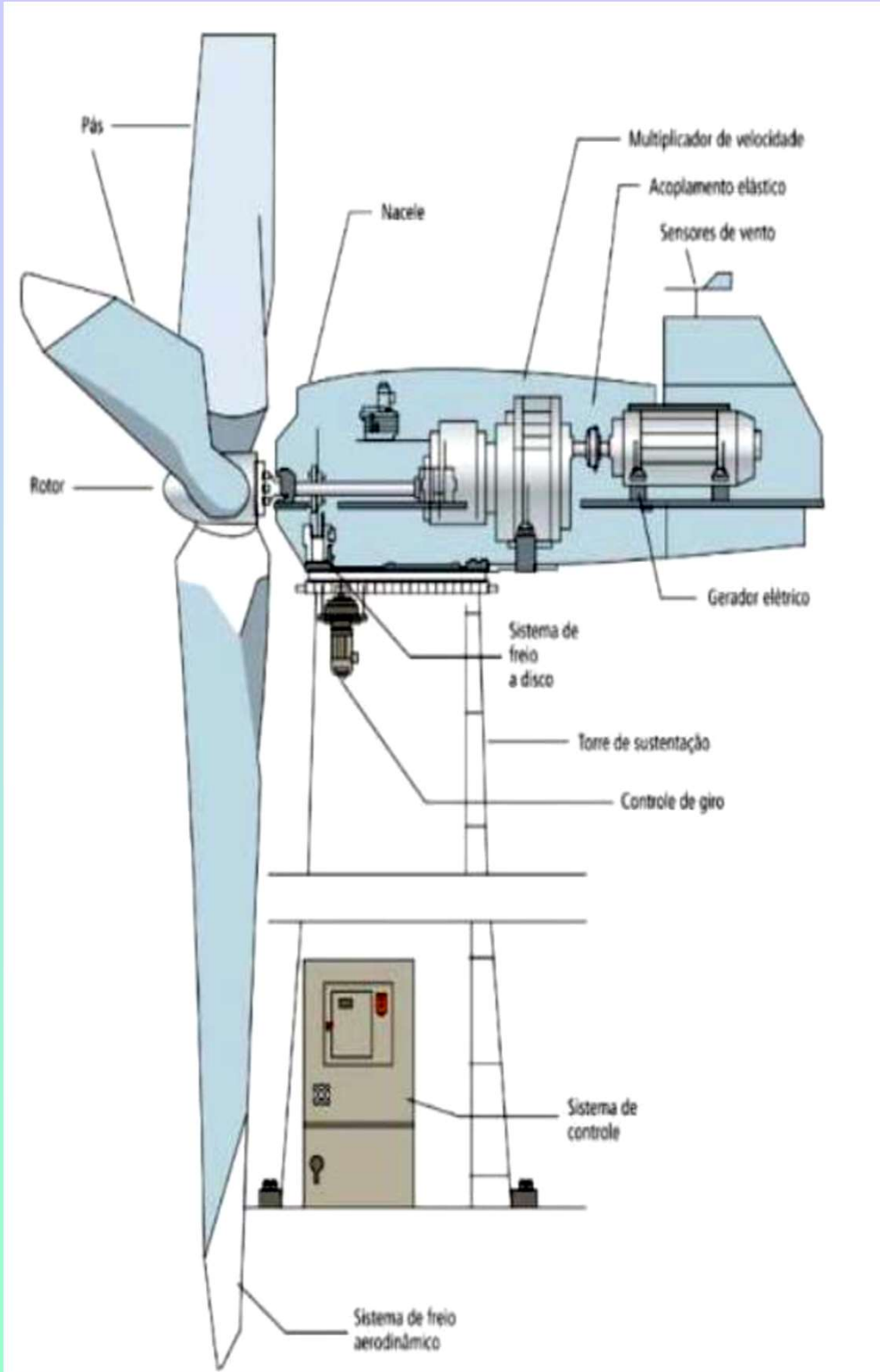


(b)

(b) Turbina eólica de eixo vertical.

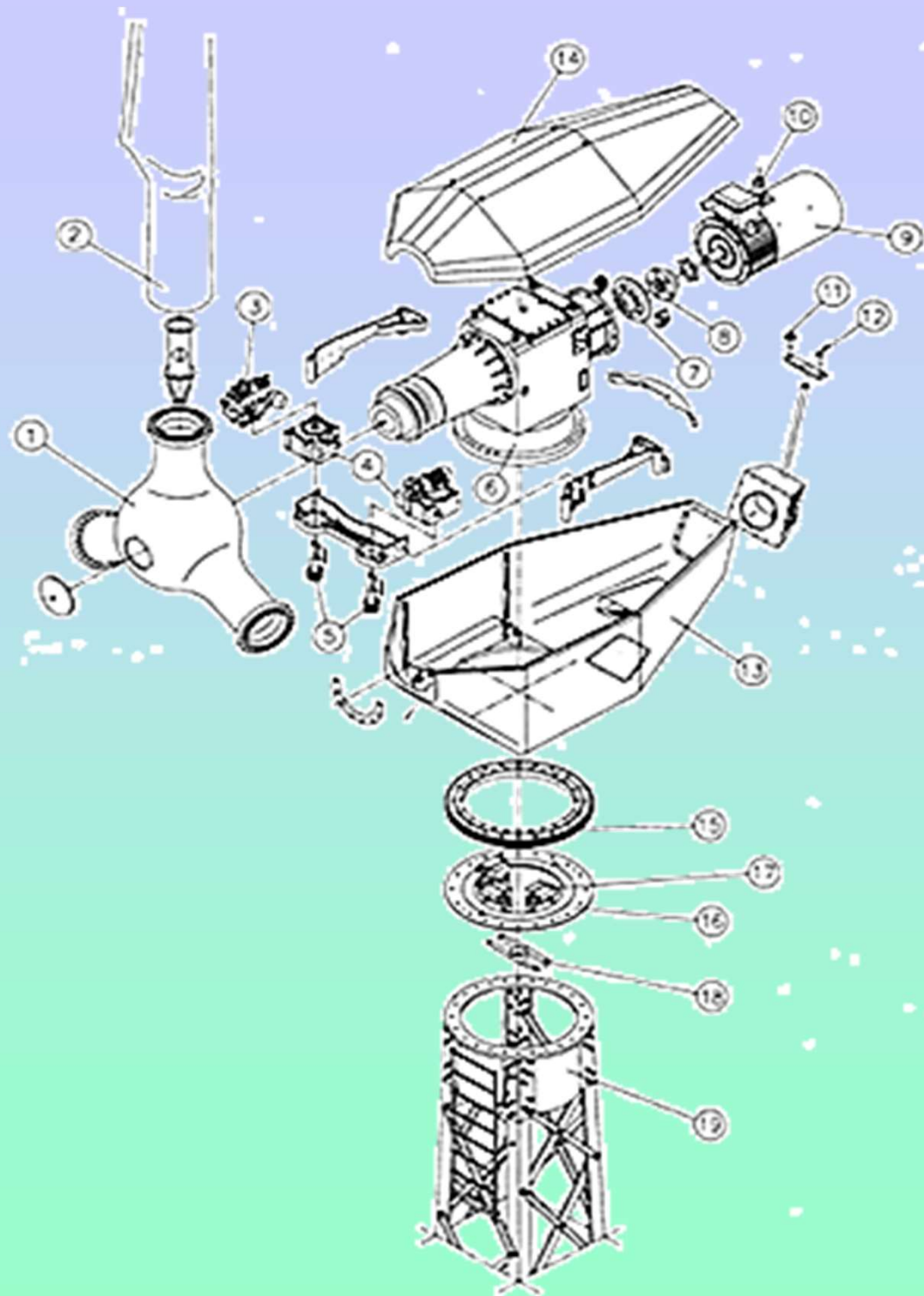


- **UPWIND:** Os ventos sopram pela parte da frente das pás, onde sua estrutura é rígida e o rotor é direcionado segundo a direção do vento através de mecanismo motor.
- **DOWNWIND:** Os ventos sopram pela parte de trás das pás, o rotor é flexível e auto-orientável.



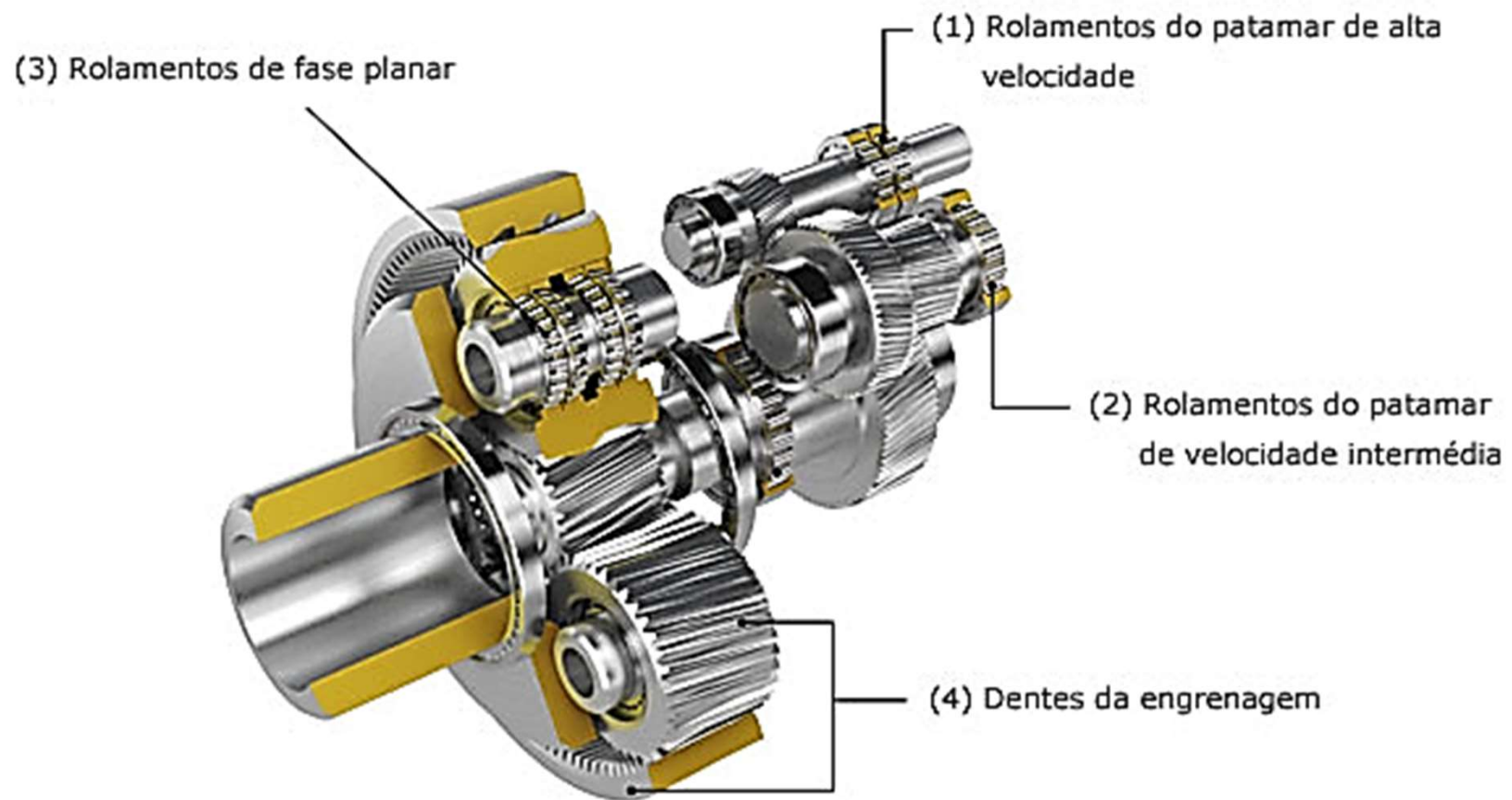
- Pás do rotor: capturam energia produzida pelos ventos e converter em energia de rotação no eixo;
- Eixo: transfere a energia de rotação para o gerador;
- Nacele: carcaça onde são abrigados os componentes;
- Gerador: converte energia de eixo em energia elétrica;
- Pás do rotor: capturam energia produzida pelos ventos e converter em energia de rotação no eixo;
- Eixo: transfere a energia de rotação para o gerador;
- Nacele: carcaça onde são abrigados os componentes;
- Gerador: converte energia de eixo em energia elétrica;

Fonte: Rocha Filho, R.C. et al. (2018). Estudo da turbina eólica convencional e com levitação magnética. Mossoró (RN), Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, 9 p.



Partes de um sistema eólico:

- 1- Cubo do rotor
- 2- Pás do rotor
- 3- Sistema hidráulico
- 4- Sistema de posicionamento da nacele
- 5- Engrenagem de posicionamento
- 6- Caixa multiplicadora de rotação
- 7- Disco de freio
- 8- Acoplamento do gerador elétrico
- 9- Gerador elétrico
- 10- Sensor de vibração
- 11- Anemômetro
- 12- Sensor de direção
- 13- Nacele, parte inferior
- 14- Nacele, parte superior
- 15- Rolamento do posicionamento
- 16- Disco de freio do posicionamento
- 17- Pastilhas de freio
- 18- Suporte do cabo de força
- 19- Torre



Detalhe do multiplicador de velocidade

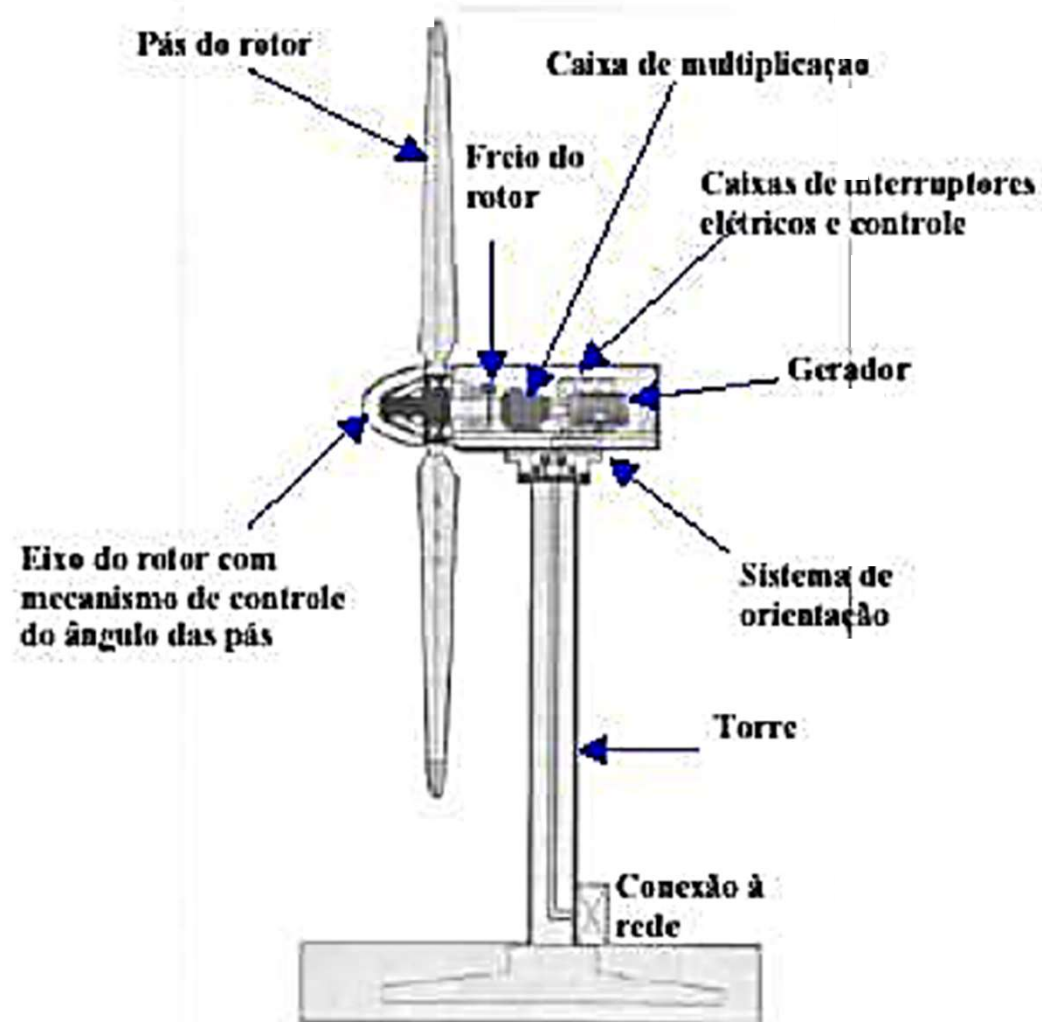
Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente, utiliza-se telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos/manutenção.

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro D . Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é:

$$\text{rpm} = 1150/D$$

À medida que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação reduz-se: os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40m e 80m, o que resulta em rotações da ordem de 30rpm a 15rpm, respectivamente. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em voo. Quanto aos níveis de ruído, turbinas eólicas satisfazem os requisitos ambientais mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração na ordem de gigawatts.

Seção de uma turbina típica conectada à rede



De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro **D**, se instalada a jusante, e 5 vezes **D**, se instalada ao lado, em relação ao vento predominante.

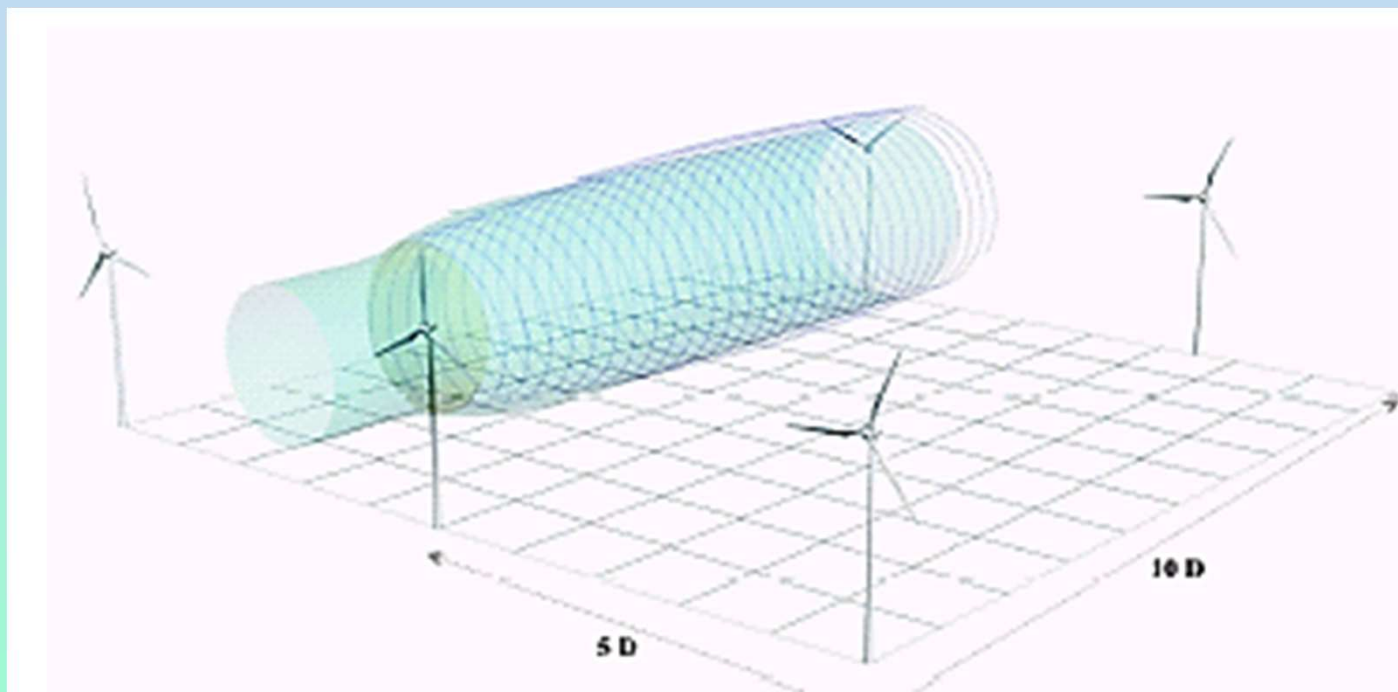
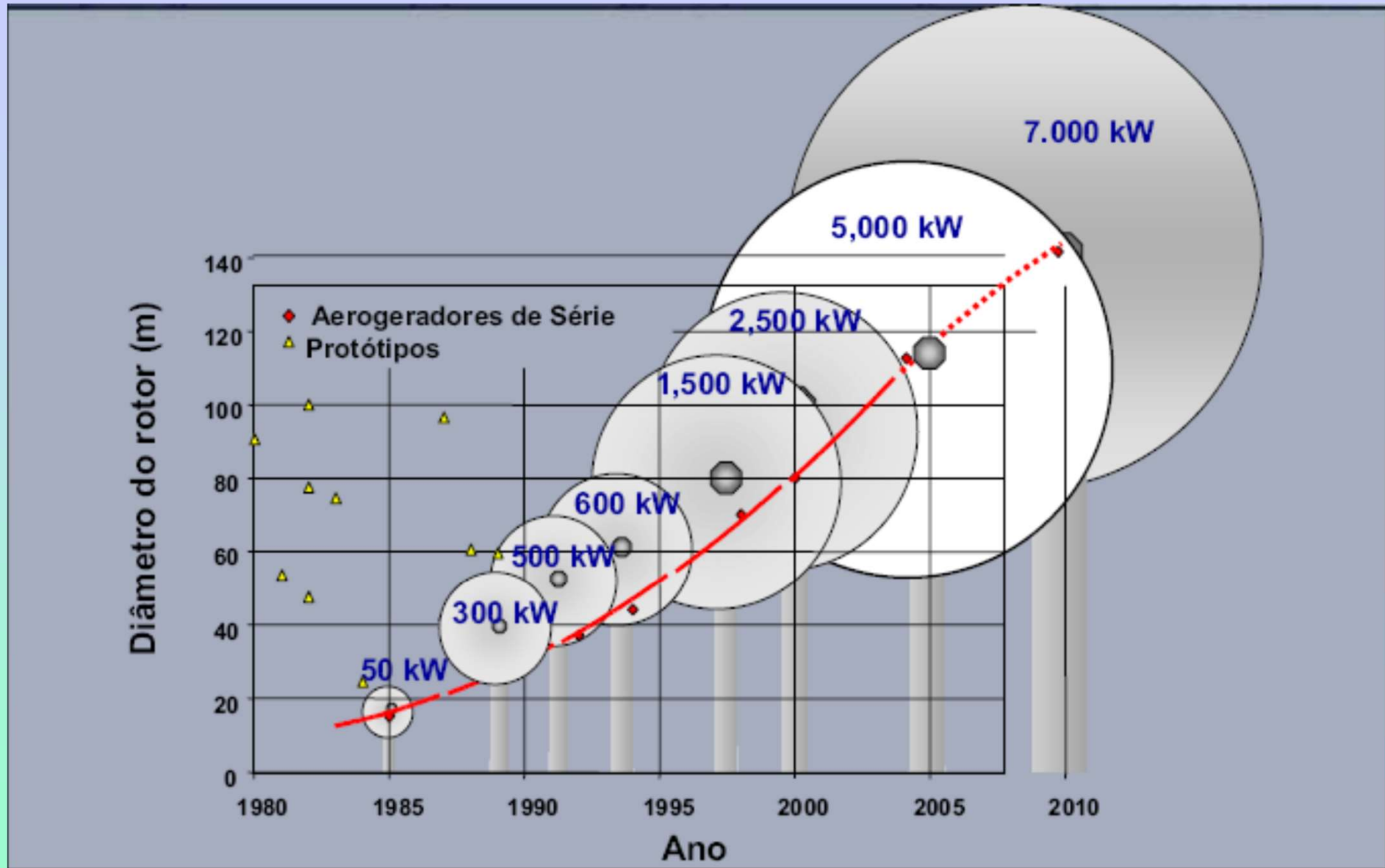
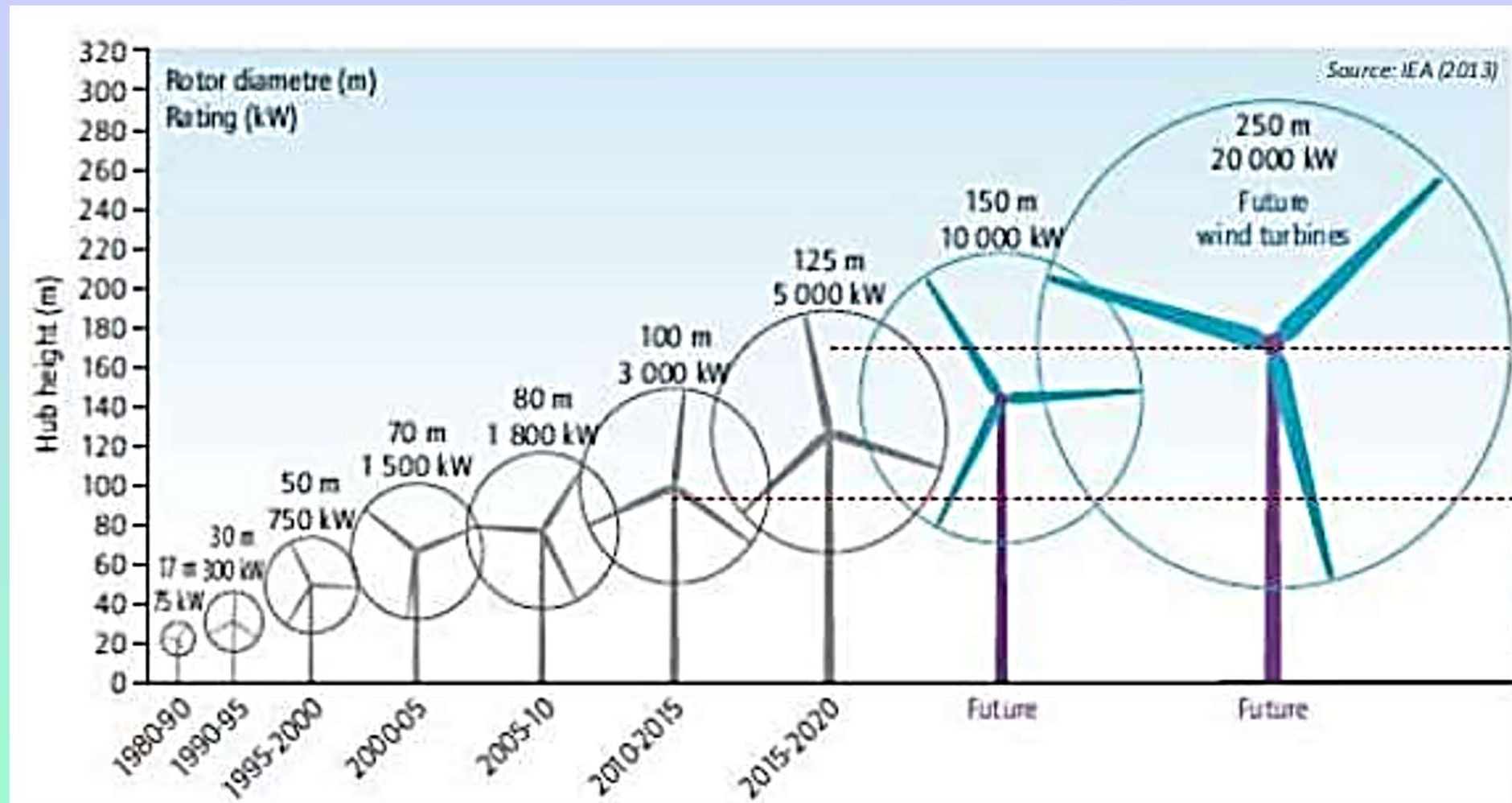


Figura 2.2 – Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas

Desenvolvimento tecnológico:



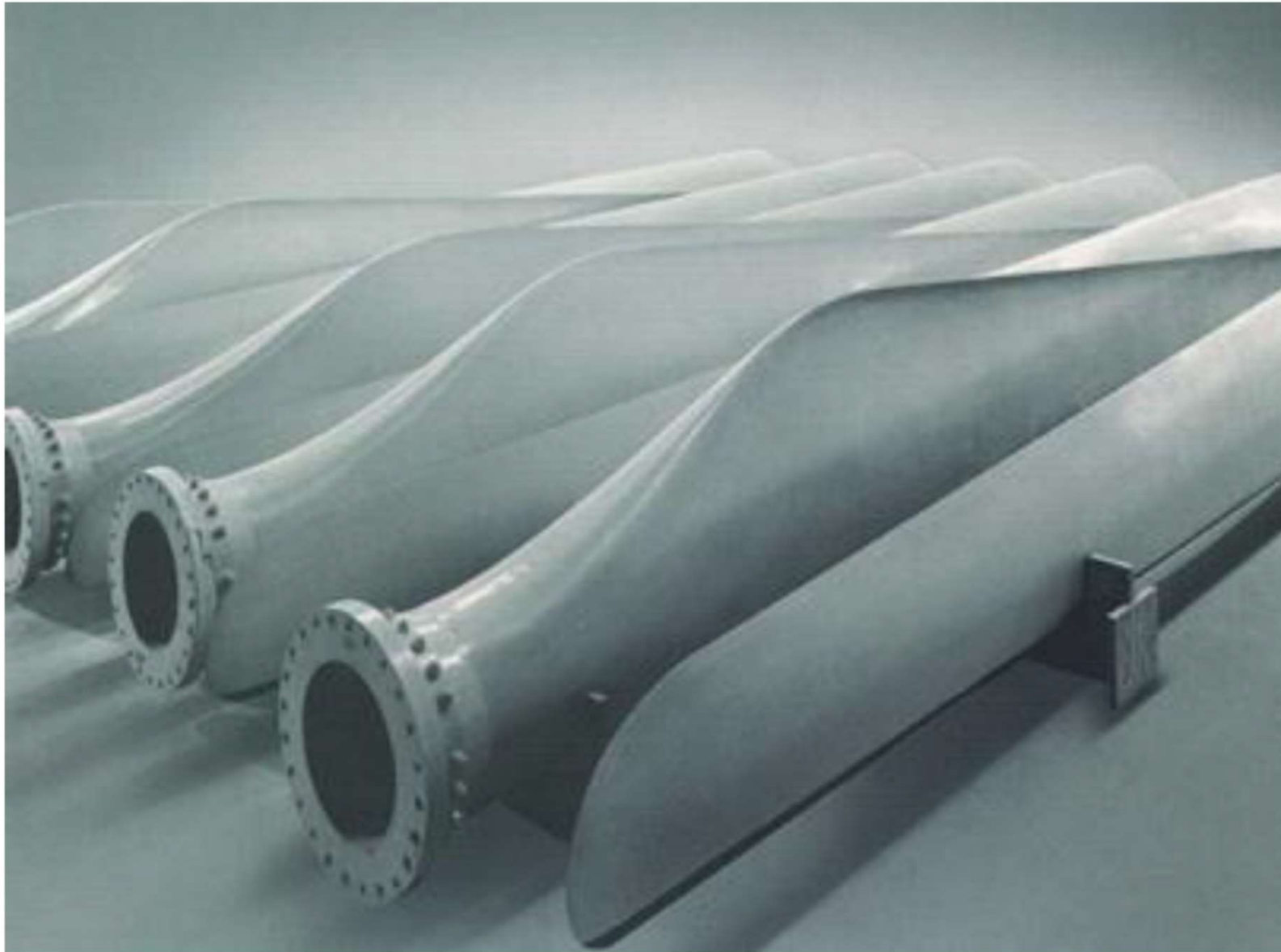


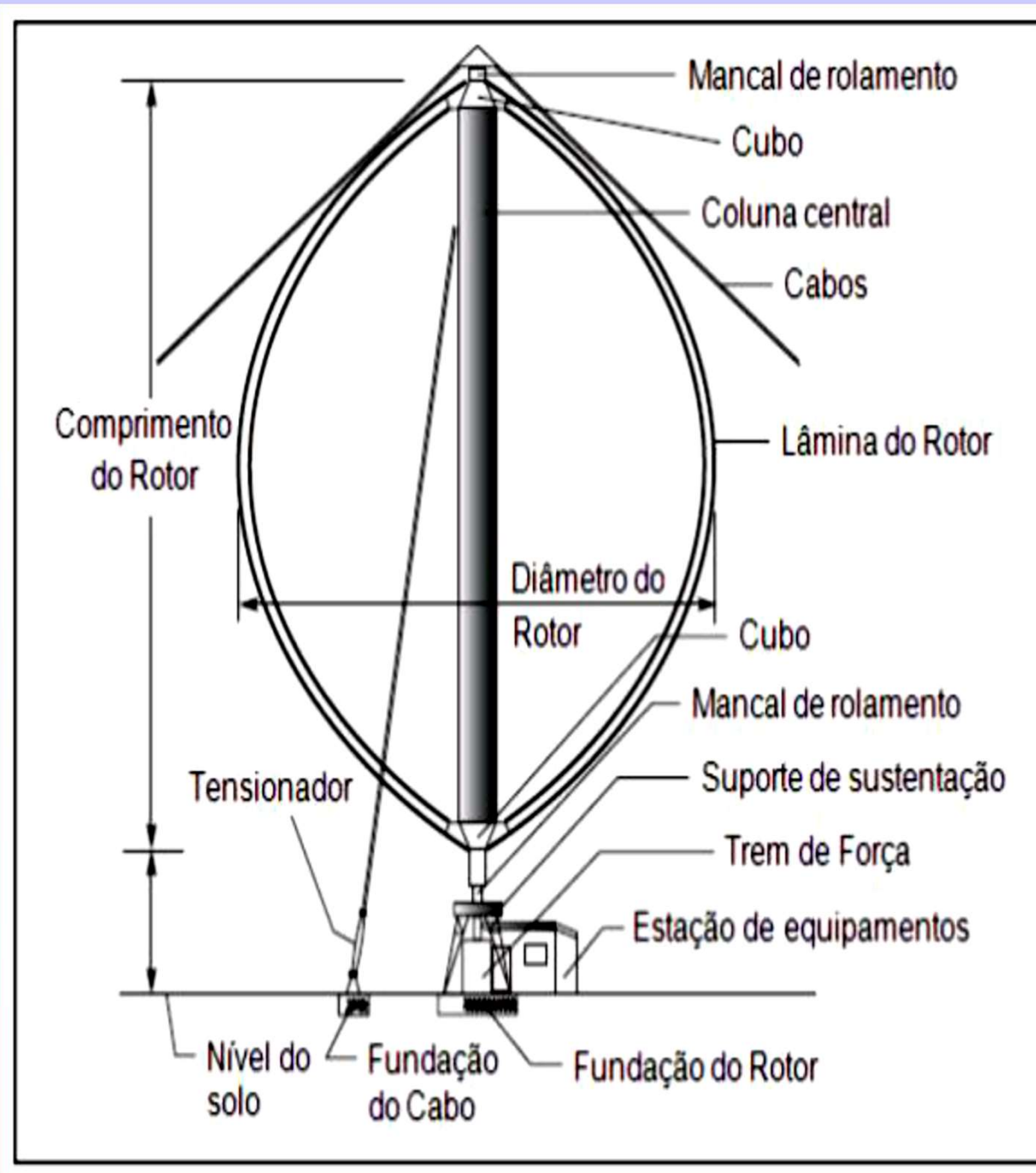
Fonte: IEA, 2021.



Figura 2.5 – Vista geral da fabricação das pás e montagem da nacela (cortesia Wobben-ENERCON E TECSIS)

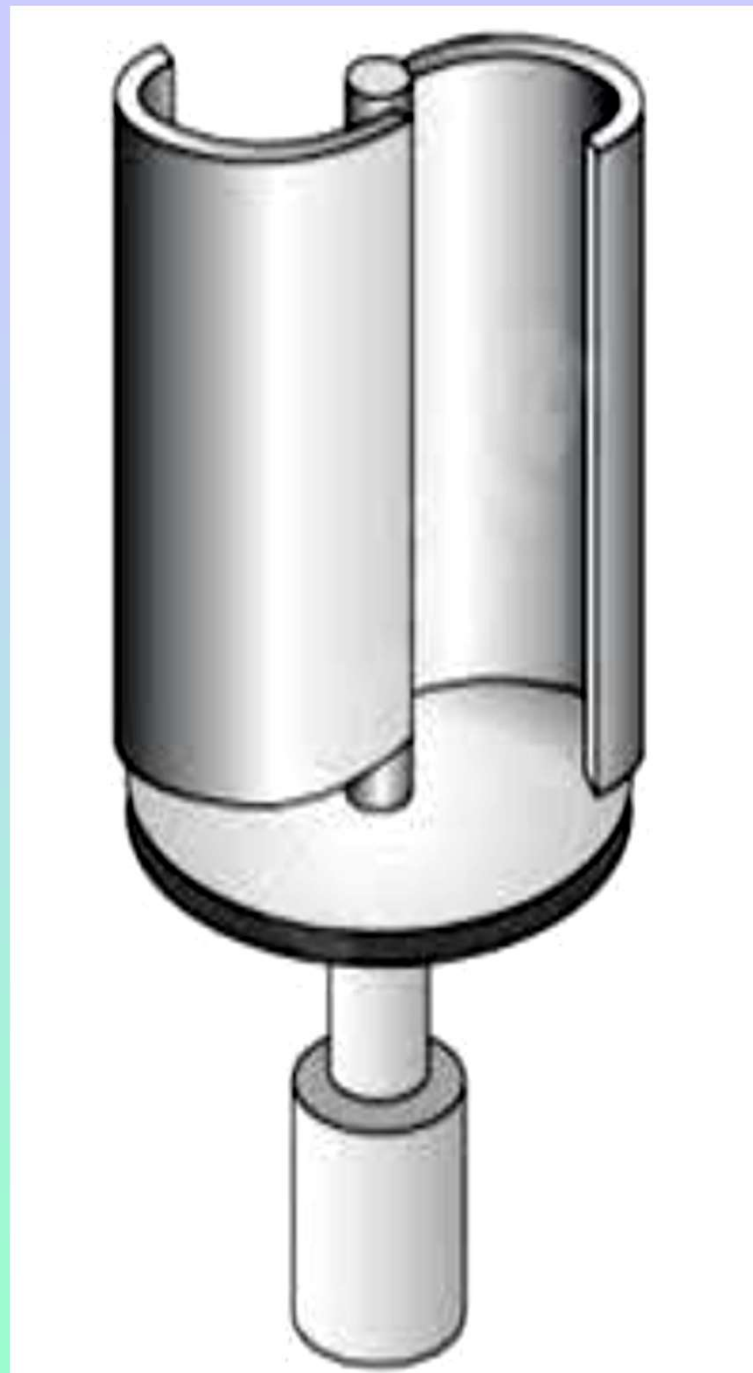
Ilustração das pás de uma turbina eólica de grande porte





Turbina Vertical do tipo Darrieus

Fonte: Rocha Filho, R.C. et al. (2018). Estudo da turbina eólica convencional e com levitação magnética. Mossoró (RN), Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, 9 p.



Turbina Vertical do tipo Savonius

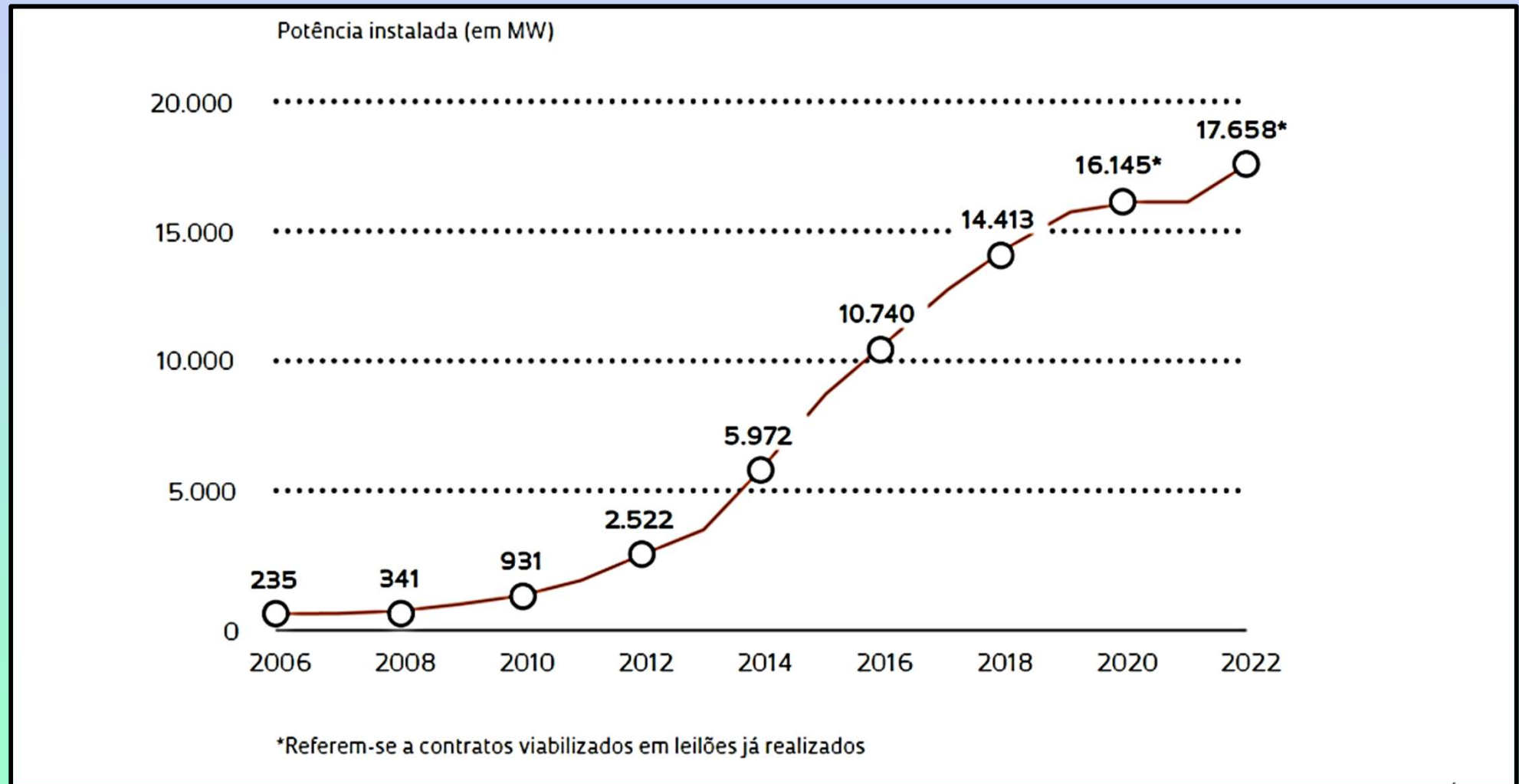
Fonte: Rocha Filho, R.C. et al. (2018). Estudo da turbina eólica convencional e com levitação magnética. Mossoró (RN), Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, 9 p.



Turbina Eólica com Levitação Magnética

Fonte: Rocha Filho, R.C. et al. (2018). Estudo da turbina eólica convencional e com levitação magnética. Mossoró (RN), Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, 9 p.

Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil no período 2006-2022



Fonte: BIG/Aneel, 2023;

Aplicações da Energia Eólica:



Pequeno porte: (≤ 10 kW)

Catavento – Bombeamento d'água:

- Residências
- Fazendas
- Aplicações Remotas



Intermediário: (10-500 kW)

- Sistemas híbridos
- Geração distribuída

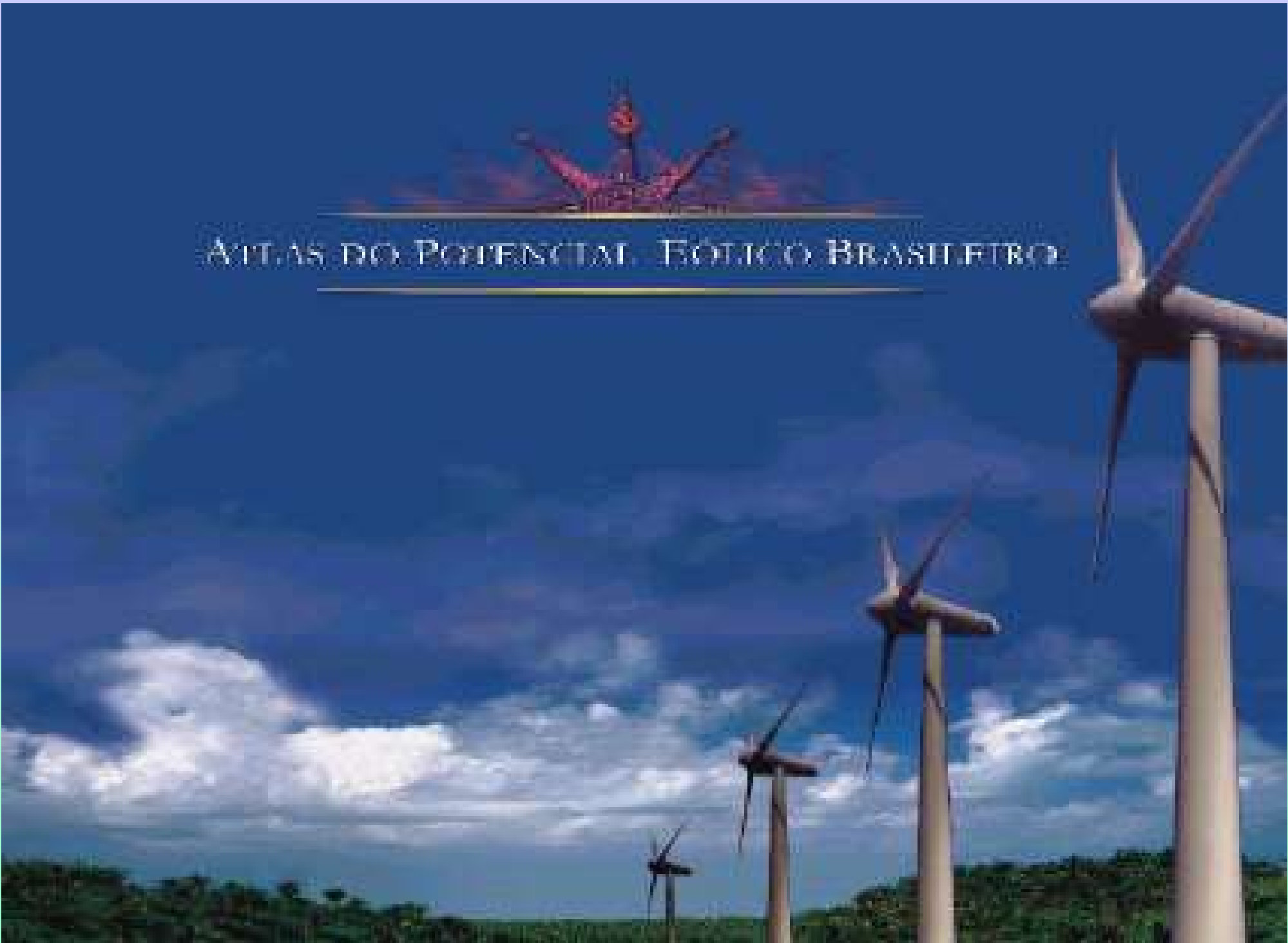


Grande porte: (550 kW-2+ MW)

- Fazendas eólicas (*wind farms*)
- Geração distribuída

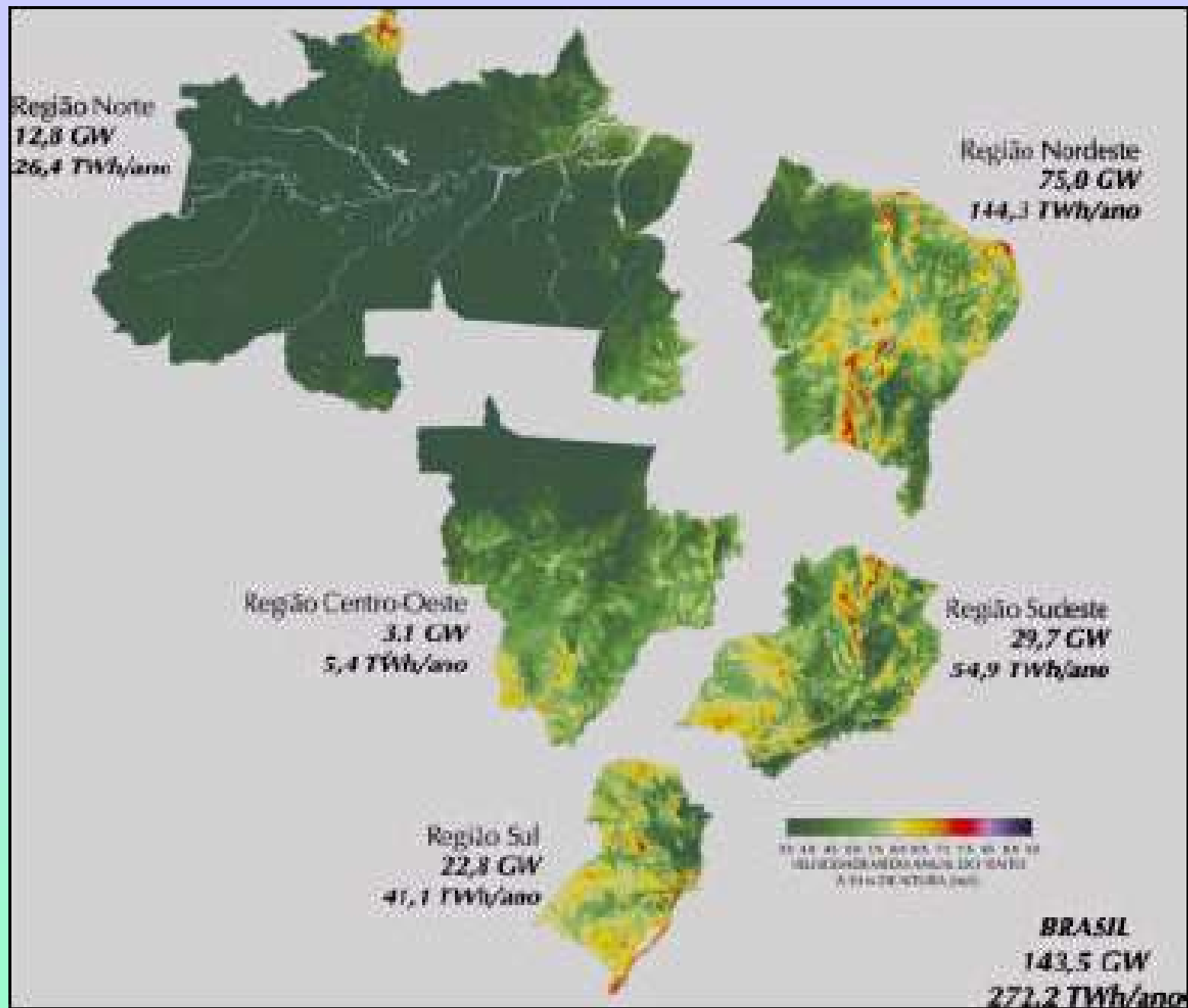


Parque Eólico “off-shore” – Mar do Norte

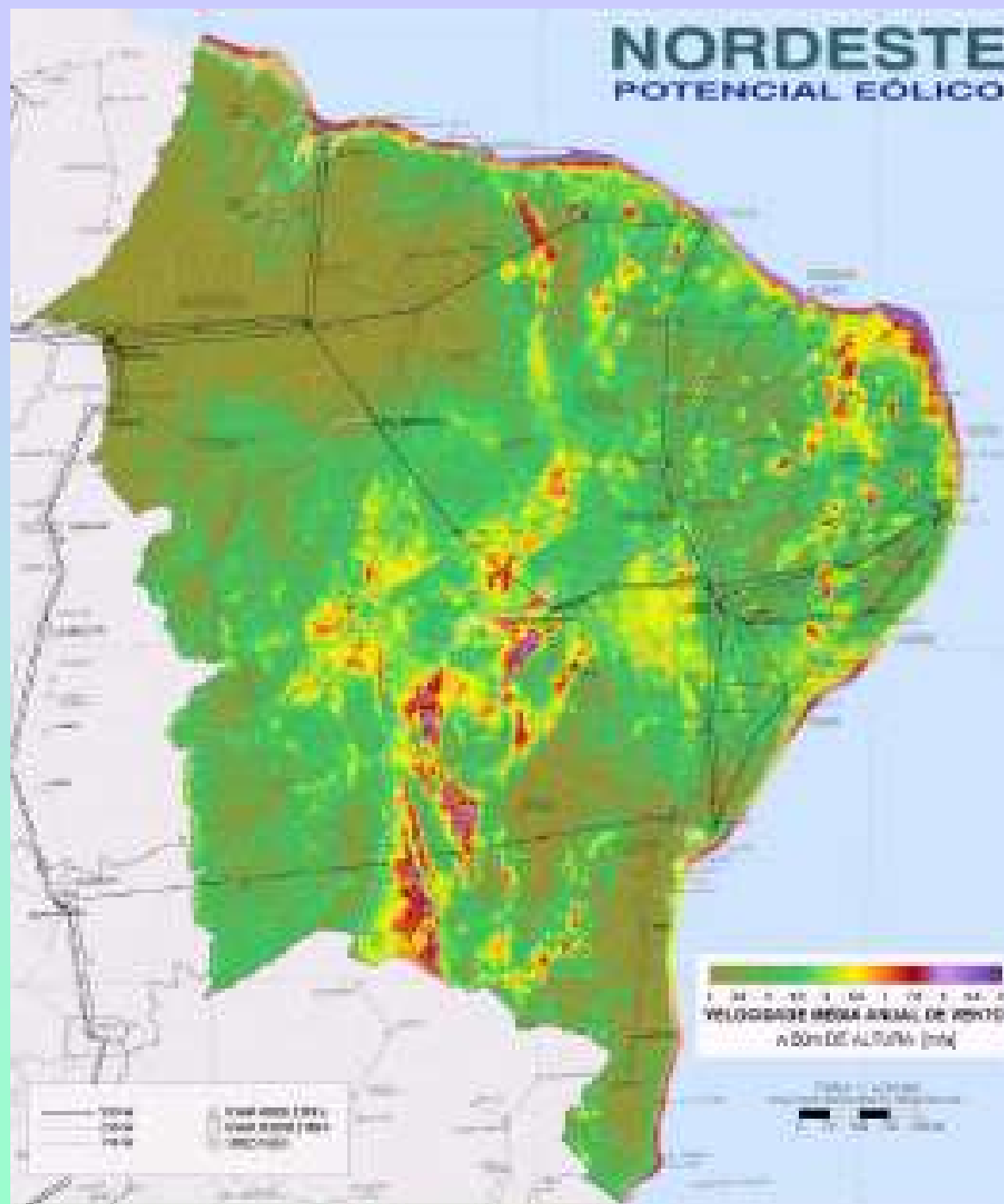


ATLAS DO POTENCIAL EOLICO BRASILEIRO





Potencial Eólico no Brasil: 143.500 MW – 272,2 TWh/ano



Nordeste: 75.000 MW – 144,3 TWh/ano



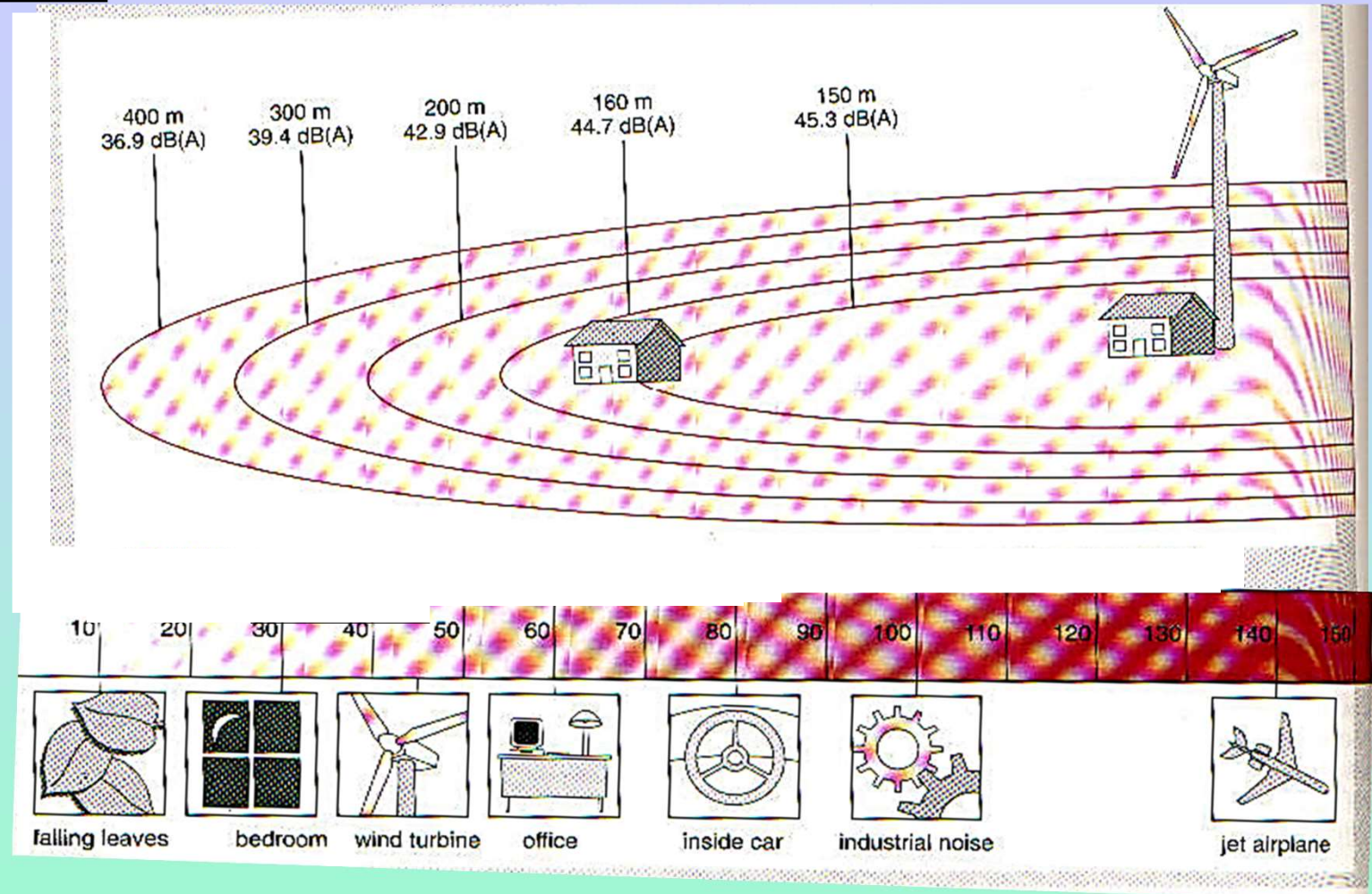
Energia Eólica: Aspectos Sócio-ambientais:

- ▶ **Ruído da turbina eólica**
- ▶ **Interferências eletromagnéticas**
- ▶ **Impacto Visual**
- ▶ **Uso do solo**
- ▶ **Fauna**

Ruído da turbina eólica:

Duas fontes de ruído:

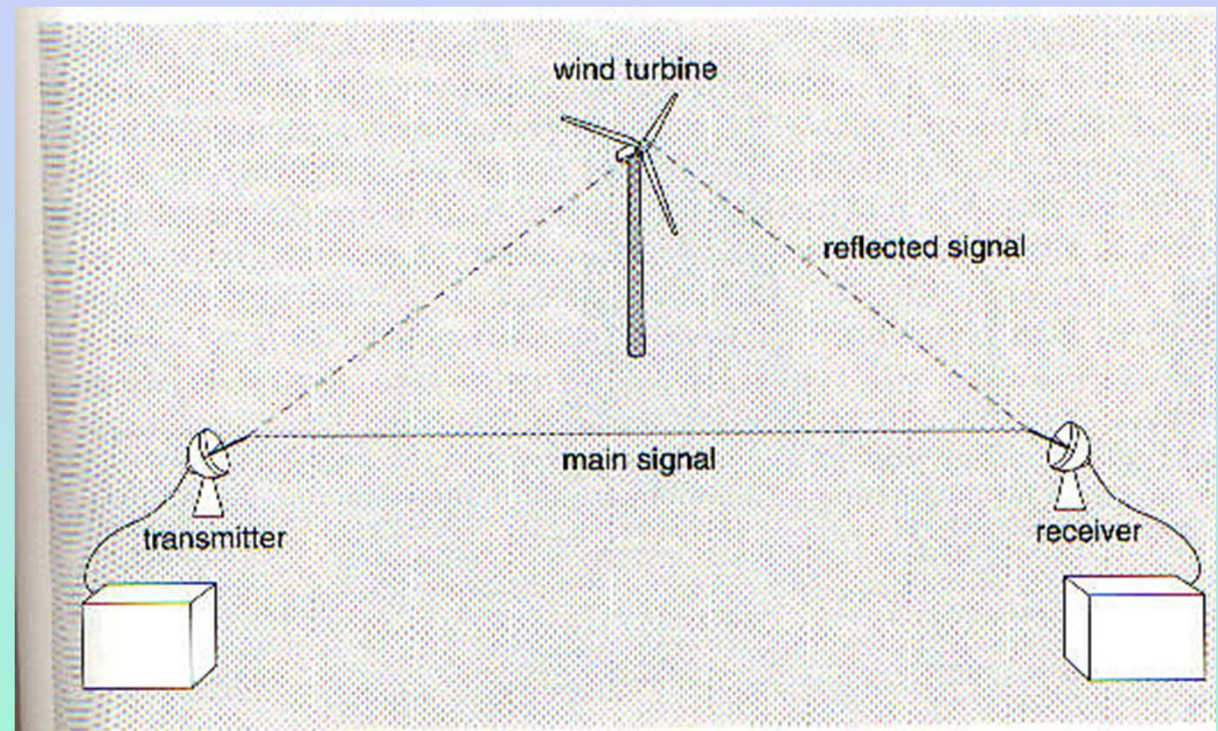
- mecânica
- aerodinâmica



- O efeito biológico nos seres humanos é sentido a partir de 65dB
- Valores superiores a 30dB podem causar efeitos psíquicos sobre o homem
- É recomendável manter o nível sempre inferior a 40dB
- Esta intensidade de ruído corresponde a uma distância de 200m de um aerogerador

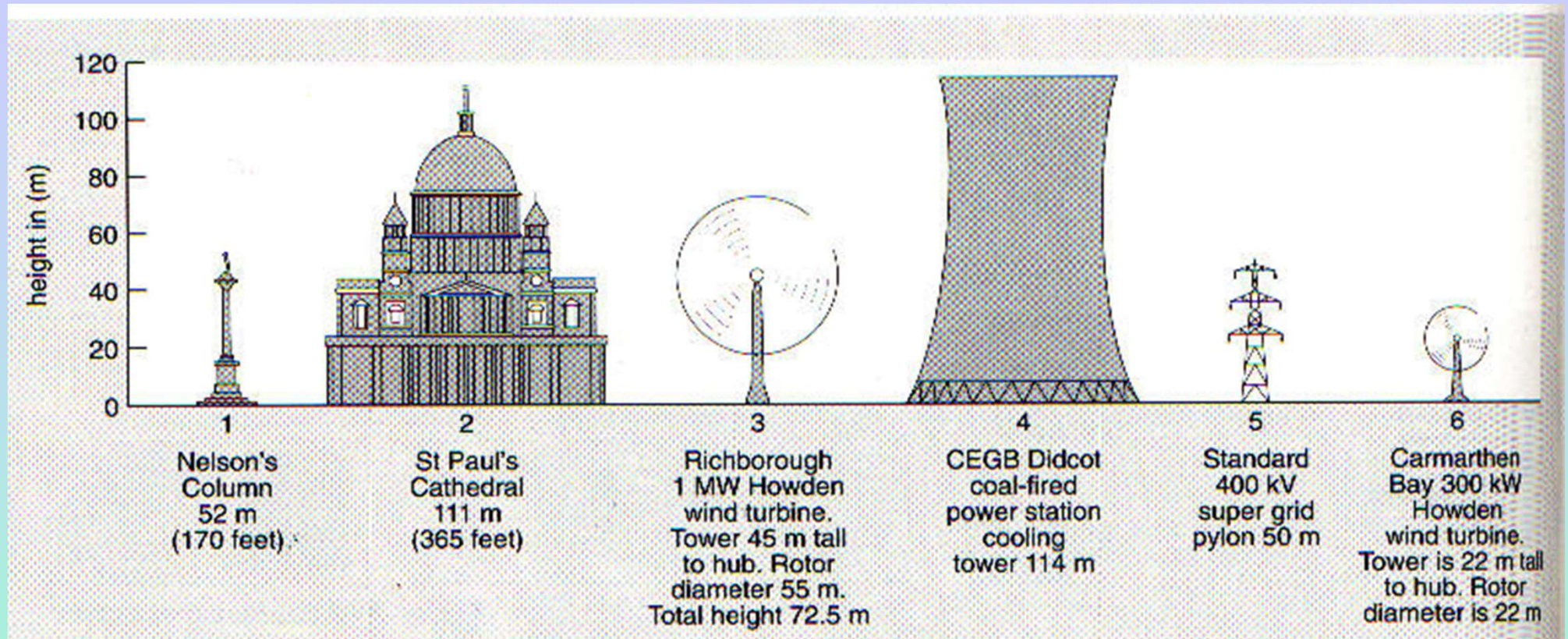
Interferências eletromagnéticas:

Pode ocorrer quando a turbina esta localizada entre a transmissora, de rádio, TV ou micro-ondas, e o receptor. As ondas eletromagnéticas podem ser refletidas pelas pás de forma que a onda refletida interfira o sinal original que chega no receptor. Isto pode causar significativa distorção no sinal recebido.



Estas interferências não são significativas. No entanto, é necessário efetuar estudos mais detalhados quando o parque se situa junto de aeroportos ou de sistemas de retransmissão.

Impacto Visual:



Os modernos aerogeradores, com alturas das torres de 40 m e comprimento das pás de 20 m, constituem obviamente uma alteração visual da paisagem. O impacto visual é muito difícil de avaliar. No entanto, existem alguns efeitos incomodativos que podem ser contabilizados tais como: o efeito de sombras em movimento e reflexões intermitentes. O primeiro pode ser evitado com uma correta planificação do parque. O efeito das reflexões intermitentes, devidas à incidência do sol sobre as pás em movimento, pode ser evitado utilizando pinturas opacas. Pintar os aerogeradores com as cores da paisagem é uma boa solução para minimizar o impacto visual. Por vezes nas proximidades de instalações militares é sugerida uma pintura de camuflagem para evitar que os aerogeradores constituam pontos de referência.



- Conflito com o turismo, notadamente nas regiões litorâneas
- Efeito da sombra das pás em movimento, notadamente em áreas urbanas

Uso do solo:

Utilização dos Terrenos:

A área ocupada por um parque eólico não é excessiva quando comparada com outros tipos de aproveitamentos (hídricos por exemplo). A relação entre a área varrida pelas pás e a potência dos aerogeradores é de aproximadamente 3 m²/kW. Como exemplo, podemos observar que um aerogerador de 500 kW terá um comprimento de pás de aproximadamente 21 m. Estudos aerodinâmicos comprovam que os aerogeradores devem estar distribuídos pelo terreno de forma que o funcionamento de cada aerogerador não seja afetado pelas perturbações aerodinâmicas dos aerogeradores vizinhos. Estes fatos implicam que a disposição dos aerogeradores respeite uma distância mínima entre eles de 5 vezes o comprimento das pás.

Assim, como regra prática podemos admitir que a área requerida por um parque eólico é de 0.08 a 0.13 km²/MW (8-13 MW/km²).

Uso do solo:



Comunidade rural na Paraíba
e a energia eólica





Usina Eólica de Taíba (Ceará) – 5 MW

(Obs: metade do potencial eólico no Nordeste localizado em APPs)

“A primeira vez que a gente ouviu falar em eólica aqui em Flecheiras (município de Trairi-CE) foi em 2007, né. Nós fomos procurados na associação na ADCF—Associação de Desenvolvimento Comunitário de Flecheiras – e lá fizeram uma reunião para gente que nós iríamos receber parques eólicos aqui. Naquele momento, a comunidade questionou os impactos e a localização... e a resposta foi que viria depois que até então eles não tinham ainda localização certa e que depois eles iam passar para a gente. Passaram-se 3 anos... em 2010 a gente já recebe a notícia da instalação dos parques, né? Sem essa conversa, sem essa informação... sem um retorno da informação que a gente tinha pedido em 2007. Então, a partir daí a gente começou a questionar a localização e quando a gente descobriu que as eólicas seriam instalada[s] no nosso cartão postal que são as dunas... a entrada da cidade... isso gerou um grande impacto... a questão antes do impacto ambiental veio o impacto mesmo moral, né? [...],”

“[...] E mesmo assim, quando eles vieram, eles não procuraram dialogar com a comunidade. Eles foram diretamente conversar e dialogar, fazer os acordos com o prefeito. Na época, né? Quando estourou na mídia, os parques já estavam perto a ser instalados já. Quando a gente viu a movimentação foi que ficou a especulação, né? O que é isso? Por que que está vindo? Por que que não tem reunião com a população? Aí nós descobrimos que o... A autorização já tava tudo pronto, tudo feito prefeito já tinha dado a concessão de uso e ocupação daquela área das duna pra poder fazer a construção, aí nós começamos, grupo em grupo [...]”

Thiago Santos de Andrade Lopes. “Participação pública no processo de avaliação de impacto ambiental em projetos de energia eólica no nordeste do Brasil: os casos dos municípios de Trairi (CE), Galinhos (RN) e Morro do Chapéu (BA)”. (Tese de Doutorado). PPGE-USP, 2024.

[...] Nós fomos depois lá, demos um abraço numa duna que era muito para nós. Era uma duna muito bonita, importante lá nesse nesse espaço onde eles iriam implantar. Então um abraço na duna, tiramos fotos, mas ao invés do poder público estadual mandar polícia ambiental para nos proteger, ela veio para para nos amedrontar. A verdade foi essa. Esse povo veio tudo armado. E nós lá, sentindo... a nossa arma era apenas... essa ideia de evitar que fosse implantado nesse local e conseguimos que fosse implantado um pouco mais afastado do povoado onde ia ter impacto ambiental muito grande. Então, depois aconteceu um absurdo, derrubaram uma tenda experimental e aí acusaram as pessoas aqui, por isso as pessoas foram para a delegacia... Foi para coagir, né? [...]





TERRA PARA QUEM
VIVE, PRESERVA
E PRODUZ
TERRITÓRIO NÃO É
MERCADORIA!
EXIGIMOS
RESPEITO!

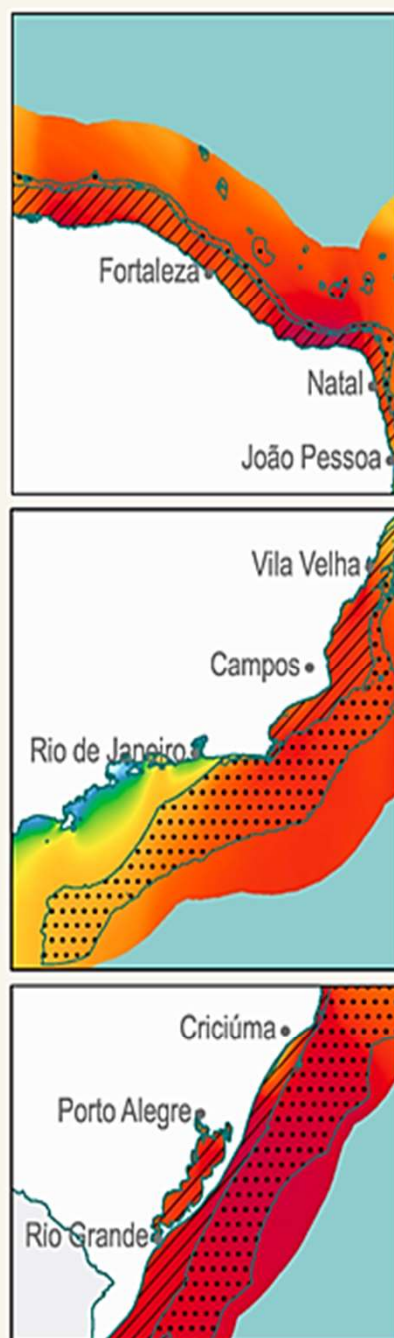
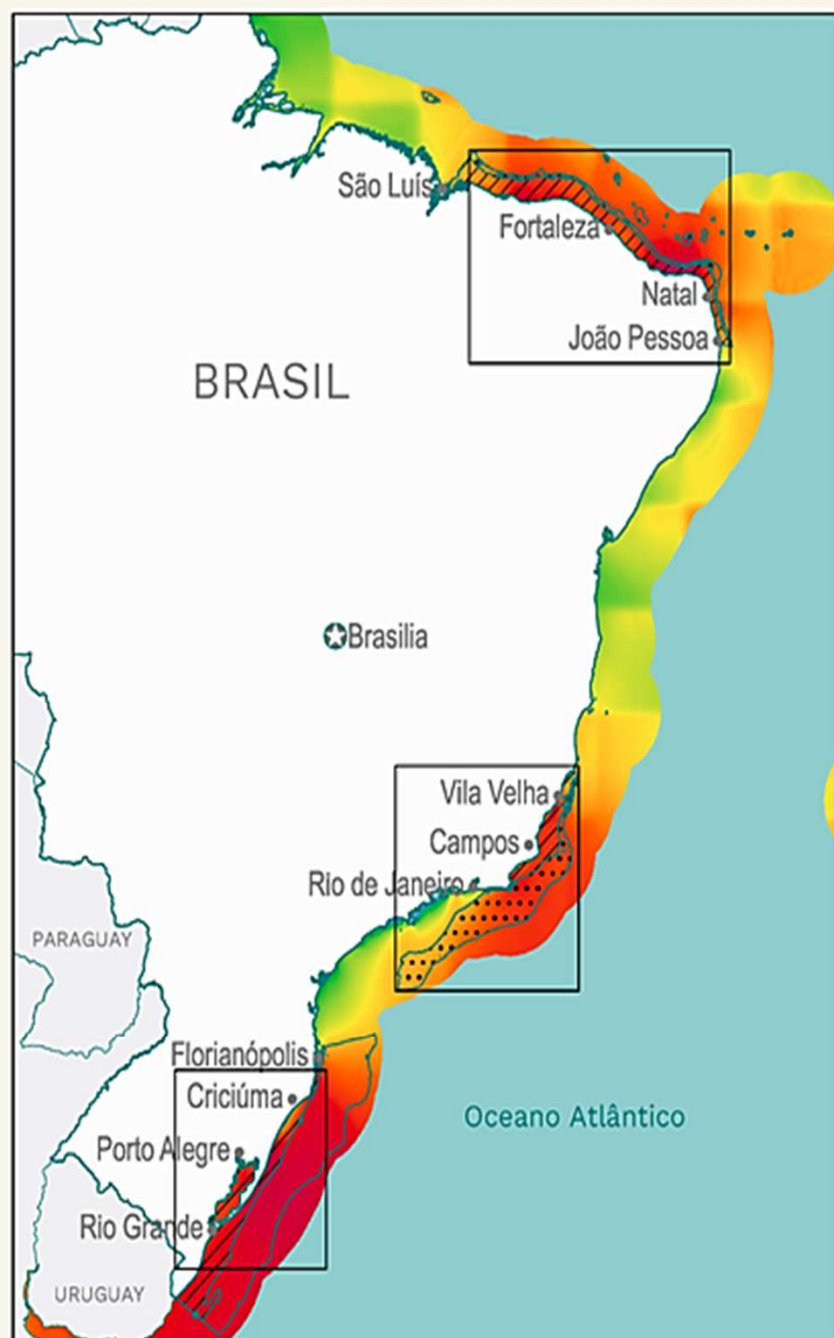
CAETANOS DE CIMA
NÃO ACEITA
INVASORES!
NOSSA PRAIA, NOSSAS
REGRAS! FORA
ESPECULAÇÃO
IMOBILIÁRIA!

Fauna:

Em casos de parques localizados em zonas de migração de aves, tais como Tarija no sul de Espanha, tem-se observado um elevado numero de aves mortas pelo movimento de rotação das pás. No entanto, estes incidentes não constituem um caso sério na grande maioria dos parques. A forma de evitar estes incidentes é uma correta planificação na localização dos parques evitando as rotas de migração.







Energia eólica *offshore* Potencial técnico no Brasil

Potencial de capacidade eólica *offshore* fixa:

480 GW

Potencial de capacidade eólica *offshore* flutuante:

748 GW

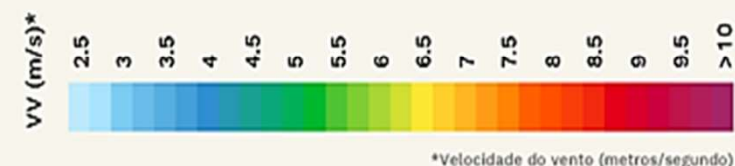
GW Total:

1,228 GW

 Instalações fixas (profundidade da água < 50m)

 Instalações flutuantes (profundidade da água < 1000m)

- - - Zona Econômica Exclusiva (ZEE)



Fonte: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/902341586847107376/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Brazil-Map.pdf>
Banco Mundial
ESMAP

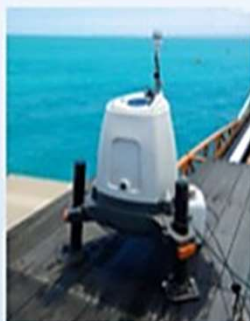


Como está estruturada a Planta-Piloto?

Licença Preliminar
do Ibama obtida em
Junho de 2025

Ferramentas de Medição

LiDAR (2 anos - 200m, 150m,
100m, 70m, 26m)



Subestação

PORTO ILHA

~4,5 km

Aerogeradores

8,5 MW

16 MW

O Sítio de Testes de Aerogeradores Offshore, que
será implantado no litoral do município de Areia
Branca, no Rio Grande do Norte, tem capacidade
instalada de até 24,5 megawatts (MW)

Cabos Submarinos Coletores

Transportar a energia dos aerogeradores até a
subestação no Porto Ilha