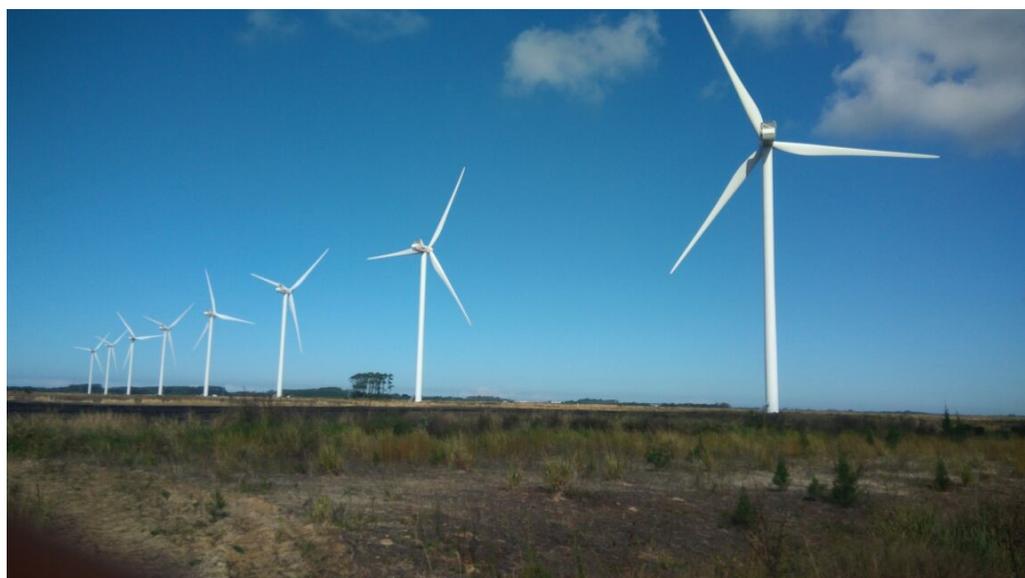




**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS**  
**ARARANGUÁ**

**DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**

**APOSTILA DA DISCIPLINA EES7370 – ENERGIA EÓLICA I**



**ORGANIZADA POR:**

**PROFa. DRa. CARLA DE ABREU D'AQUINO**

**Graduando LUCAS BATISTA CREPALDI**

*Material didático digital – setembro 2021*

Apostila da disciplina EES7370 : Energia Eólica / organizada por Carla de Abreu D'Aquino ; Lucas Batista Crepaldi. - 3ª ed. - Araranguá : [s.n.] , 2021. - 104 p. : il. color.

Apostila da Disciplina Energia Eólica (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Departamento de Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2021.

1. Energia Eólica. 2. Material didático. I. D'Aquino, Carla de Abreu, org. . II. Crepaldi, Lucas Batista. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por Thayse Hingst, CRB-14/1376

**Para referenciar este material de acordo com a NBR6023/2018:**

D'AQUINO, Carla de Abreu; CREPALDI, Lucas Batista (org.). **Apostila da disciplina EES7370:** Energia Eólica. Araranguá: [s.l]: 2021. Disponível em: . Acesso em: 03 nov. 2021. Apostila.

- \* Após o termo "Disponível em:" incluir o link para a página do repositório em que consta o material.
- \* Atualizar a data com a de acesso real.

## **DISCIPLINA EES7370 – ENERGIA EÓLICA I**

**Curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina.**

### **JUSTIFICATIVA**

Promover o conhecimento básico da composição, processos de circulação e interações da atmosfera, para o entendimento dos processos atmosféricos possa se fazer o adequado aproveitamento do recurso energético vento como energia elétrica ou outra forma de energia utilizável pelo homem.

### **EMENTA**

Introdução à atmosfera: suas características físico-químicas e estrutura. Balanço de Calor. Gradientes de pressão, temperatura e umidade. Circulação atmosférica e suas forçantes. Ventos locais, camada limite planetária, perfil eólico na camada limite. O vento como recurso energético. Coleta e análise de dados ambientais. Estimativa e avaliação do recurso e potencial eólico.

A mini apostila visa sintetizar os principais tópicos abordados pela disciplina fornecendo um guia para o estudo do aluno. Esse material didático não substitui a boa leitura dos livros didáticos recomendados na bibliografia da disciplina, nem o estudo dos textos complementares (artigos científicos) sugeridos pelo professor.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	5
<b>2. ATMOSFERA</b>	7
2.1. Composição	7
2.2. Importância dos principais gases atmosféricos	8
2.3. Partículas	12
<b>3. ESTRUTURA DA ATMOSFERA</b>	14
3.1. Troposfera	16
3.2. Estratosfera	17
3.3. Mesosfera	18
3.4. Termosfera	18
<b>4. ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA</b>	21
4.1. Atmosfera Instável	23
4.2. Ar Condicionalmente Instável	23
<b>5. BALANÇO DE CALOR</b>	25
5.1. Energia e a transferência de calor	26
5.2. Balanço de calor	31
6.1 Modelo de circulação em uma célula	33
6.2 Modelo de circulação em 3 células	34
<b>7. NOÇÕES DE METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA</b>	40
7.1 Meteorologia	40
7.2 Climatologia	51
<b>8. VENTO</b>	54
8.1. Variação horizontal da pressão atmosférica	57
8.3. Camadas limites	61
<b>9. ENERGIA E POTÊNCIA NO VENTO</b>	64
9.1. Potência do vento	65
9.2. Tipos de turbinas de vento	66
9.2.1. Componentes de uma turbina eólica	68
9.3. Efeito do número de pás	68
9.4. Aerodinâmicas das turbinas eólicas	72
9.5. Curva de potência	77
9.6. Limite de Betz	78
9.7. Quanta energia uma turbina eólica irá produzir?	80
<b>10. Eólica Onshore (continental)</b>	83
11. Impactos ambientais da energia eólica	87
<b>12. Eólica Offshore (marítima)</b>	91
12.1 Estrutura	93
12.2 Componentes	98
<b>13. REFERÊNCIAS CONSULTADAS</b>	104

## 1. INTRODUÇÃO

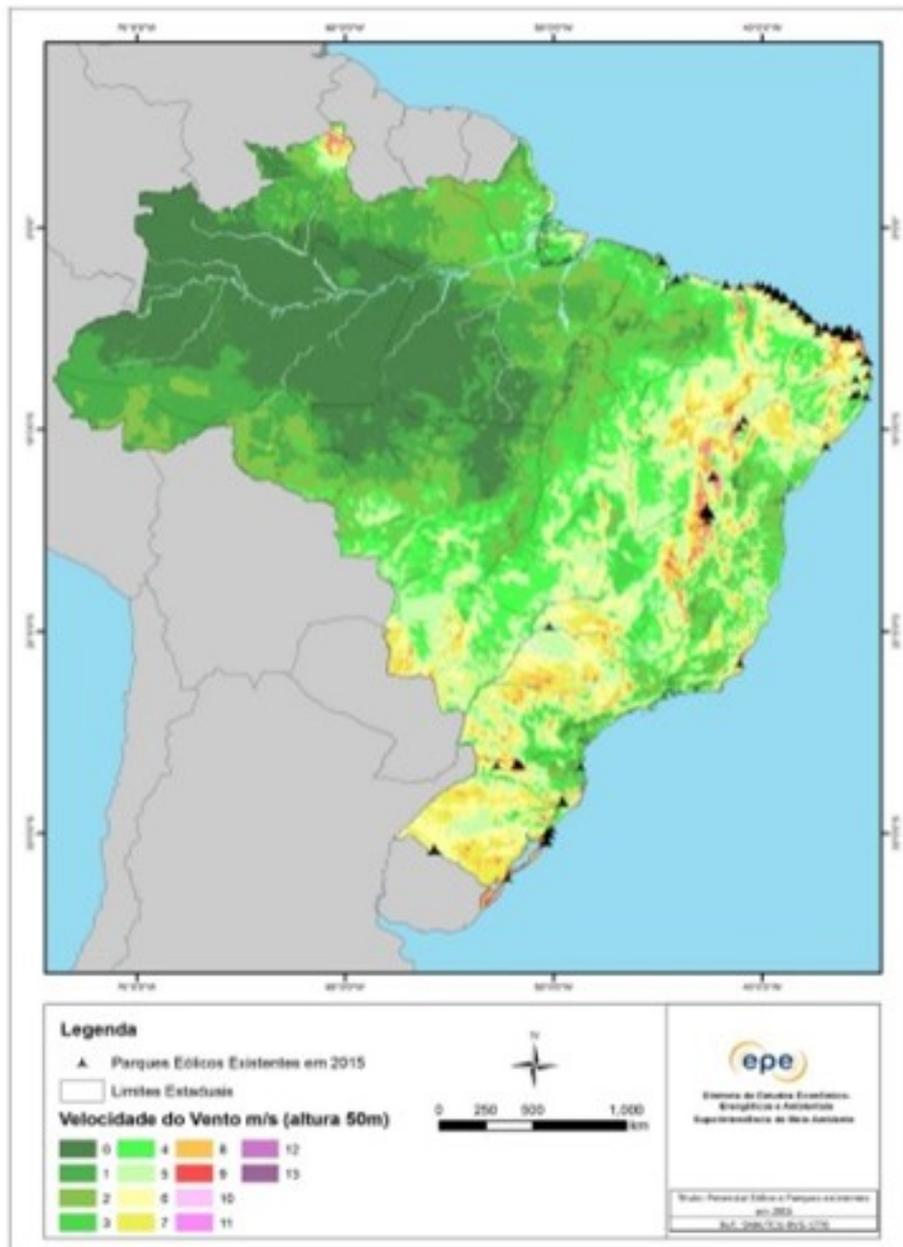
Dos moinhos de vento até as turbinas foram mais de mil anos. As turbinas de ventos podem ser chamadas de *Wind Energy Conversion Systems* (WECS) ou sistemas de conversão de energia do vento, geradores de vento e aerogeradores.

Considerando que, do final de 1980 até o ano 2000, a tecnologia dos aerogeradores amadureceu a ponto de permitir uma importante queda nos custos e aumentar a capacidade das máquinas, tornando a energia eólica economicamente competitiva. Isso resultou em grande aprimoramento tecnológico e no crescimento mais rápido entre todas as tecnologias renováveis nos últimos anos. Em 2010, um total de 194 GW de capacidade de geração foram instalados. Isso representa um crescimento de 11 vezes em relação ao final do ano 2000 (Dados para a Europa, BOYLE, 2012).

No Brasil esse potencial foi destacado através do Atlas do Potencial Eólico, evidenciando alta aptidão do país para geração energética através dessa fonte. Estimou-se um potencial eólico bruto a 50 metros de altura em torno de 143,5 GW, com destaque para as regiões do Nordeste, Sudeste e o Sul, principalmente nas regiões costeiras do país (AMARANTE, et al., 2001). A Figura 1 ilustra o potencial eólico brasileiro destacando os sítios com os melhores recursos energéticos e a distribuição dos parques eólicos em operação ao longo do território nacional no ano de 2015 (EPE, 2015; TOLMASQUIM, 2016).

O Brasil vem se destacando no cenário eólico mundial e atualmente é líder em produção na América Latina, e 7º no ranking global. No ano de 2014 a fonte eólica proporcionou um crescimento de 85,6% na geração de eletricidade no país. Ainda assim, o setor eólico brasileiro representa em termos percentuais uma pequena parcela no mercado interno de energia elétrica com cerca de 7% de participação na matriz elétrica nacional (GWEC, 2015).

Para compreender a geração de energia eólica é necessário compreender o recurso energético explorado por ela, o vento. Essa mini apostila iniciará uma abordagem teórica e simplificada sobre a atmosfera, conduzindo o aluno por alguns processos físicos relevantes que auxiliarão na compreensão do vento, sua formação, importância e comportamento. Depois serão discutidos os aspectos iniciais do aproveitamento do recurso eólico.



**Figura 1** - Potencial eólico e distribuição dos parques eólicos em operação no Brasil.  
**Fonte:** AMARANTE, et al., 2001, TOLMASQUIM, 2016.

## 2. ATMOSFERA

É o conjunto de gases, vapor d'água e partículas (ar) que envolve a superfície da Terra.

Camada fina, gasosa, sem cheiro, sem cor, sem gosto, presa à Terra pela força da gravidade.

### 2.1. Composição

A Tabela 1 apresenta a composição da atmosfera próximo à superfície da Terra. Destacam-se algumas características como:

- **Esta composição** ( $N_2 = 78\%$ ,  $O_2 = 21\%$ ) é constante nos constituintes maiores até os 80 km de altitude;
- Há um **balanço** entre **produção** e **consumo** destes gases próximo à superfície;
- Variações locais de **CO<sub>2</sub>** (**próxima a superfície**) e de **ozônio** (**em níveis mais elevados**) não são suficientes para influenciar a massa molecular do ar seco ( $M_a$ ), que equivale à média ponderada das massas moleculares dos componentes do ar;
- Acima de 100 km a atmosfera é **extremamente rarefeita** e constituída principalmente por nitrogênio (**N<sub>2</sub>**), oxigênio (**O** e **O<sub>2</sub>**), hidrogênio (**H**) e hélio (**He**);
- A composição dos constituintes menores **varia com a altitude** e possuem grande importância: ozônio (**O<sub>3</sub>**) e **CO<sub>2</sub>**, são exemplos disso.

Permanent Gases			Variable Gases			
Gas	Symbol	Percent (by Volume) Dry Air	Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Nitrogen	N <sub>2</sub>	78.08	Water vapor	H <sub>2</sub> O	0 to 4	
Oxygen	O <sub>2</sub>	20.95	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.037	368*
Argon	Ar	0.93	Methane	CH <sub>4</sub>	0.00017	1.7
Neon	Ne	0.0018	Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	0.00003	0.3
Helium	He	0.0005	Ozone	O <sub>3</sub>	0.000004	0.04†
Hydrogen	H <sub>2</sub>	0.00006	Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Xenon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

\*For CO<sub>2</sub>, 368 parts per million means that out of every million air molecules, 368 are CO<sub>2</sub> molecules.  
†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.

**Tabela 1** - Composição atmosférica.  
**Fonte:** AHRENS, 2014.

**O AR É UMA MISTURA MECÂNICA DE GASES E NÃO UM COMPOSTO QUÍMICO!!!**

## 2.2. Importância dos principais gases atmosféricos

### → Nitrogênio

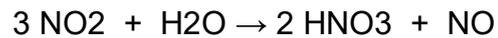
Praticamente inativo na atmosfera. Em alturas elevadas ele absorve um pouco da energia solar (no ultravioleta – comprimento de onda) passando a sua forma atômica.

É removido da atmosfera por processos biológicos de produção primária (bactérias) e retorna, principalmente, pela degradação de matéria animal e vegetal.

Fixar o nitrogênio significa combiná-lo a outro elemento. Só assim ele pode ser utilizado por organismos. Raios podem fixar o nitrogênio da seguinte forma:



O dióxido de nitrogênio pode então reagir com a água, formando ácido nítrico.



O ácido nítrico na chuva contribui para disponibilizar nitrogênio “fixado” para os solos e oceanos, podendo também acidificar lagos e córregos.

### → Oxigênio e ozônio

Em alta atmosfera o **oxigênio** se **dissocia** quando **absorve energia** (ultravioleta) proveniente do **Sol**, os átomos de oxigênio assim formados podem combinar entre si e/ou com outras moléculas, formando assim o ozônio (**O<sub>3</sub>**).

Em alta atmosfera o ozônio (**O<sub>3</sub>**) apresenta baixíssimas concentrações, porém com **papel importante**, agindo como “**filtro**” aos raios ultravioleta do Sol (nocivos a animais, plantas e seres humanos). **Na superfície o ozônio (O<sub>3</sub>)** é um dos **ingredientes principais** da fumaça fotoquímica (**poluição** de grandes centros urbanos que **reage a luz**), irritando os olhos, a garganta e danificando a vegetação.

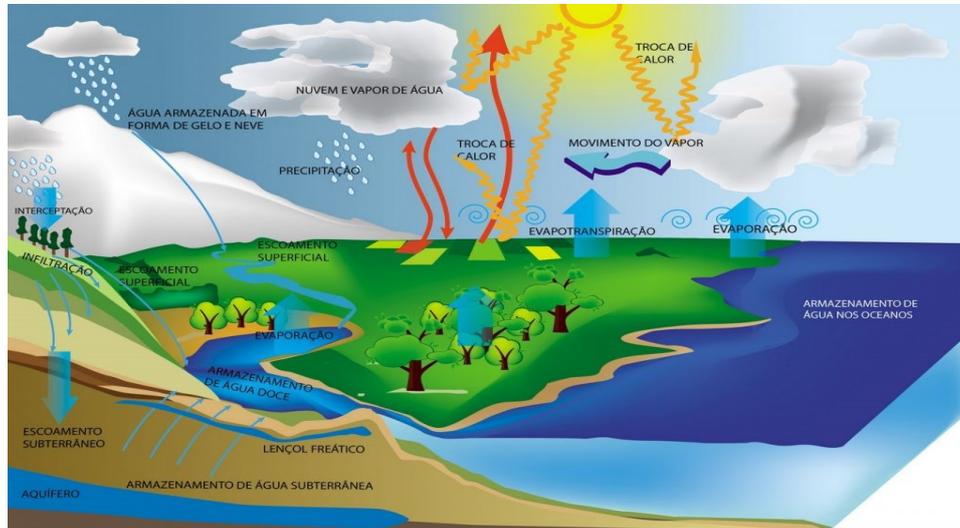
É um tanto irônico que esse gás, (**O<sub>3</sub>**), **nocivo na superfície** seja fundamental fornecendo **proteção** a vida na **alta atmosfera!!**

O ozônio (**O<sub>3</sub>**) é **destruído** na **estratosfera média** e **superior** por reações envolvendo óxidos nitrogenados (**NO<sub>x</sub>**), cloro (**Cl**) e flúor (**F**) → gerados por CFC, erupções vulcânicas e queima da vegetação.

### → Vapor d'água

A **concentração** de vapor d'água **varia grandemente** de lugar para lugar e de tempos em tempos. **Próximo à superfície**, nos **trópicos** (locais quentes e ricos em vapor), o **vapor d'água** pode ocupar um percentual de **4%** dos **gases atmosféricos**, enquanto em áreas frias do **ártico**, sua concentração **diminui** a mera fração de **um percentual**.

As moléculas de vapor d'água tornam-se visíveis apenas quando se transformam em partículas líquidas ou sólidas, como gotículas de nuvens ou cristais de gelo. A **concentração** média de **vapor de água** é de 1% em volume, porém é um gás muito variável no espaço e no tempo, sendo que suas concentrações estão **regidas** pelo **ciclo hidrológico**.



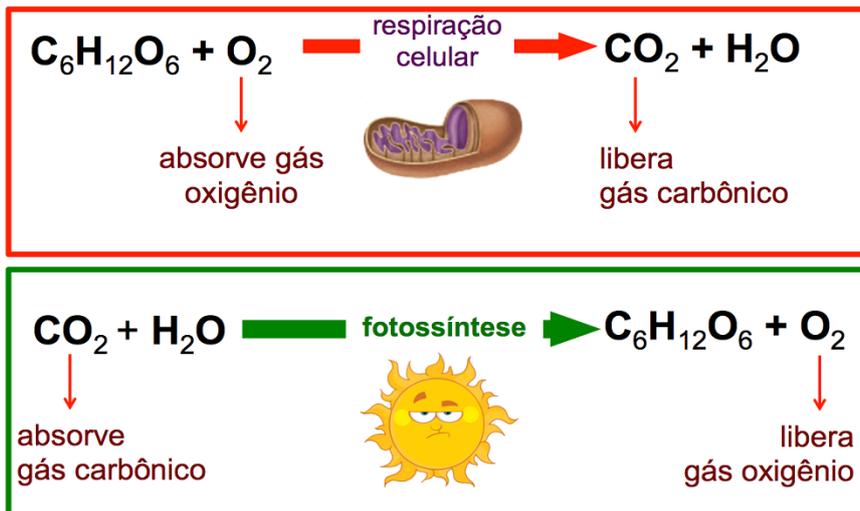
**Figura 2** - Ciclo hidrológico.

**Fonte:** <https://acquablog.acquasolution.com/a-influencia-do-ciclo-hidrolgico-na-qualidade-da-agua/>.

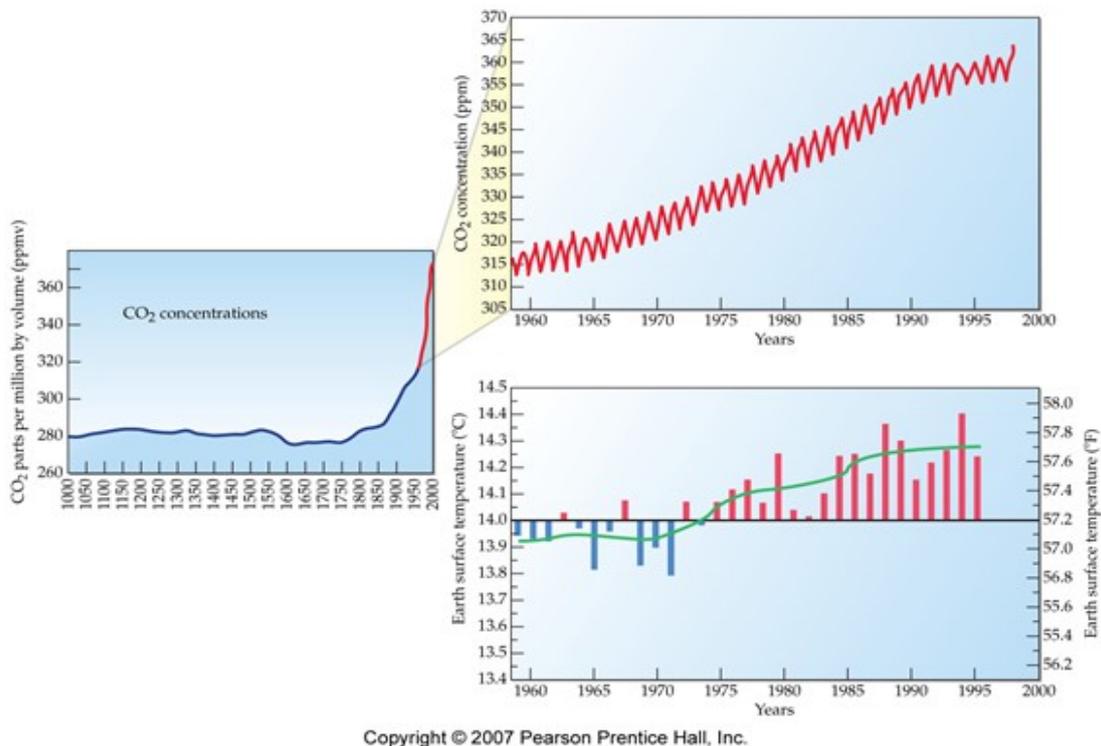
## → Dióxido de Carbono

É um **gás natural da atmosfera**, ocupa uma pequena, mas importante, porção do ar (0,037). **Varia** de 0.01 – 1%; porém localmente varia **devido** aos seguintes **fatores**: combustões, atividades vulcânicas, respiração, absorção e liberação nos oceanos. Possuindo concentrações mais elevadas nas áreas industriais.

Fora dessas áreas (industriais) o **equilíbrio** entre entrada e saída é **mantido** pela **fotossíntese** e reação de equilíbrio entre **carbonatos e bicarbonatos**. O dióxido de carbono (**CO<sub>2</sub>**) tem como **regulador** os **oceanos**, que dissolvem cerca de 99% deste gás, porém isso acontece **lentamente**.



**Figura 3** - Processo de incorporação e liberação de CO<sub>2</sub> pelos organismos.  
**Fonte:** <https://conhecimentocientifico.r7.com/respiracao-celular/>.



**Figura 4** - Concentração de CO<sub>2</sub> em ppm e temperatura (°C) da superfície da Terra..

É um **gás** do efeito estufa, tendo importante papel na **manutenção** da **temperatura terrestre**. Um **aumento** de dióxido de carbono (**CO<sub>2</sub>**) tem sido

registrado nas últimas décadas (gerando **desequilíbrio**). Fonte antrópica principal – queima de combustíveis fósseis;

**CO<sub>2</sub>** medido no gelo da Antártica e Groenlândia revelaram valores de **CO<sub>2</sub>** antes da revolução industrial em 280 ppm. Desde o século 18 já aumentou em cerca de 25 %, estando em cerca de 368 ppm.

***A PRESENÇA DE UMA MOLÉCULA DE UM GÁS QUALQUER (M) É IMPORTANTE NA ABSORÇÃO DA ENERGIA QUÍMICA LIBERADA DURANTE A COMBINAÇÃO, ATRIBUINDO ESTABILIDADE.***

### 2.3. Partículas

#### → Aerossol

Denominada genericamente por poeiras ou aerossóis, é o **conjunto de partículas** sólidas e líquidas de natureza variada que se mantém **em suspensão** na atmosfera.

Entram de forma direta na atmosfera através de uma variedade de fontes naturais e antrópicas. Podem ter origem de explosões vulcânicas e meteoritos. Possui um raio variável, de 0,005  $\mu$  a 20  $\mu$ , e sua **concentração** varia de: 500 a 2000 partículas por  $\text{cm}^3$  **nos oceanos** e 100.000 por  $\text{cm}^3$  **nos continentes** (principalmente perto de cidades e centros industriais), por exemplo.

São **mais numerosas** nas **camadas** mais **baixas** da atmosfera, porém algumas podem ser arrastadas por quilômetros (em distância e altitude), como as areias finas do deserto. Seu número geralmente **decrece rapidamente** com a **altitude**. Os **aerossóis** são de grande importância, pois **atuam** como **absorventes** de **água** e **constituem** os núcleos de condensação cloreto de sódio e (**NaCl**) e sulfato de amônio (**NH<sub>4</sub>2SO<sub>4</sub>**), além de **interceptar**, **absorver** e **desviar** a radiação solar;

Distinguem-se os **HIDROMETEOROS** (água líquida e sólida) do restante das partículas ditas aerossóis.

→ **Hidrometeoros**

- Importantes na **transferência** de energia **entre a superfície** e a **atmosfera**.
- Neles concentram-se muitas substâncias, podendo reagir quimicamente entre si;
- A quantidade de MPS na atmosfera é praticamente constante (equilíbrio entre entradas e saídas).
- A **precipitação** e a **gravidade** são agentes de grande importância na remoção de poeira da atmosfera.

---

LINKS INTERESSANTES

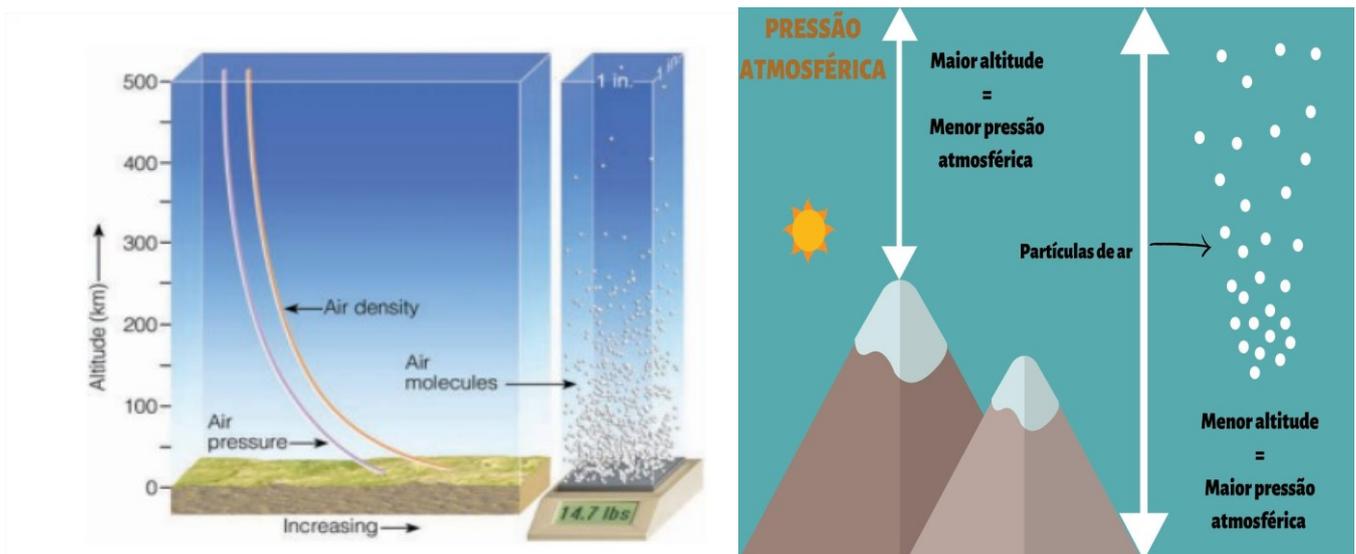
<https://www.youtube.com/watch?v=aeUEyjWGLtM>

### 3. ESTRUTURA DA ATMOSFERA

O estudo das camadas superiores da atmosfera se iniciou no século XIX com as observações das auroras boreais e do rastro de meteoritos, nascendo uma nova ciência, a aerologia. Uma das importantes descobertas foi a reflexão das ondas de rádio nessas camadas superiores.

Para compreender melhor as camadas da atmosfera e suas características, é importante observar duas variáveis que agem na vertical (Figura xxx):

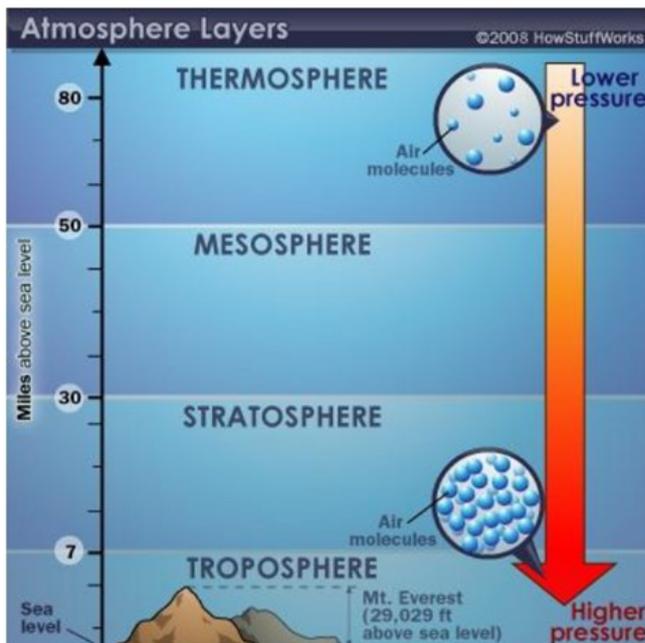
- ❖ Pressão;
- ❖ Densidade (número de moléculas por volume);
- ❖ Moléculas de ar tem peso (força atuante devido à aceleração da gravidade);
- ❖ O peso de todas as moléculas de ar ao redor da Terra é de aproximadamente 5,6 trilhões de toneladas;
- ❖ A pressão em qualquer nível da atmosfera pode ser medida em termos da massa total de ar acima de qualquer ponto;
- ❖ No nível do mar, uma coluna padrão de ar com base de  $1\text{cm}^2$  pesa pouco mais de 1kg;



**Figura 5 e 6** - Perfis de pressão e densidade na atmosfera. Quanto mais ar houver em um nível, maior o efeito da compressão. A densidade é maior na superfície e diminui em direção ao espaço. Pressão atmosférica: peso por unidade de área de uma coluna de ar.

Fonte: [http://www.dca.iag.usp.br/material/mftandra2/ACA0225/aula5\\_pressao.pdf](http://www.dca.iag.usp.br/material/mftandra2/ACA0225/aula5_pressao.pdf).

Fonte: [https://wp.ufpel.edu.br/mateusteixeira/files/2020/03/IFA\\_Unidade\\_1.pdf](https://wp.ufpel.edu.br/mateusteixeira/files/2020/03/IFA_Unidade_1.pdf).



**Mean free path** → distância média que uma molécula percorre antes de colidir com outra

\* Próximo da superfície do globo → *mean free path* é de 0.0001 mm

\* A 150 km acima do nível do mar (i.e., na termosfera) → uma molécula percorre cerca de 10m antes de colidir com outra

Figura 7- Relação entre as camadas atmosféricas e pressão.

Fonte: <https://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/atmospheric/weather3.htm>.

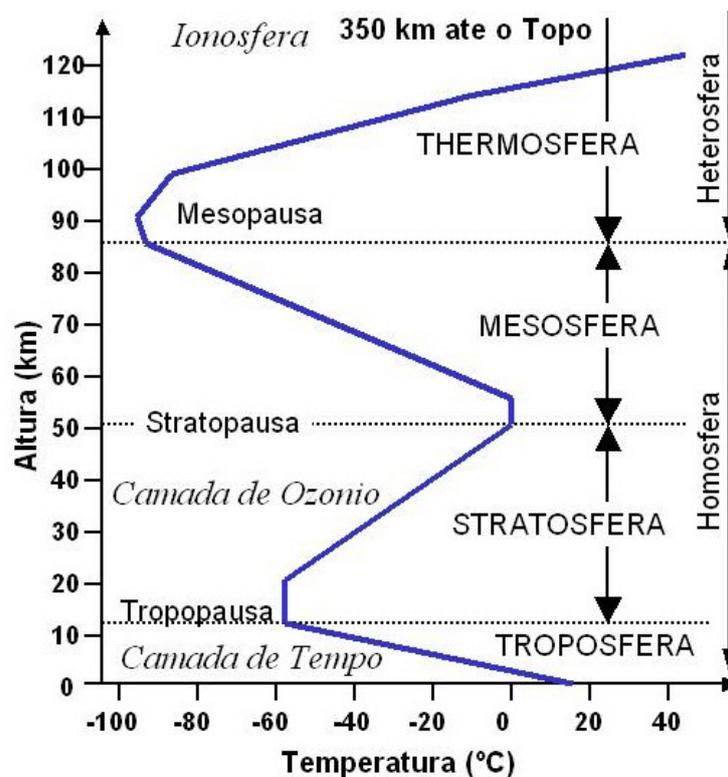


Figura 8- Relação entre temperatura e altura das camadas atmosféricas.

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/figura-1-a-Camadas-da-atmosfera-e-b-ciclo-hidrologico-que-acontece-na-troposfera\\_fig1\\_228370095](https://www.researchgate.net/figure/figura-1-a-Camadas-da-atmosfera-e-b-ciclo-hidrologico-que-acontece-na-troposfera_fig1_228370095).

A classificação da estrutura da atmosfera mais utilizada é aquela que considera a variação no gradiente térmico como determinante do limite entre as camadas.

É dividida em **4 camadas** (≈ homogêneas) com **3 zonas de transição** entre si:

- ❖ **Troposfera** (1ª camada);
- ❖ Tropopausa (1ª zona de transição);
- ❖ **Estratosfera** (2ª camada);
- ❖ Estratopausa (2ª zona de transição);
- ❖ **Mesosfera** (3ª camada);
- ❖ Mesopausa (3ª zona de transição);
- ❖ **Termosfera** (4ª camada).

***OBS:** O critério térmico se baseia na distribuição vertical média da temperatura do ar.*

### **3.1. Troposfera**

- ❖ Camada em contato com a superfície;
- ❖ Compreendida entre 0 e 11 km;
- ❖ Caracterizada pela diminuição da temperatura com a altitude;
- ❖ Gradiente térmico vertical: diminui 6,5 °C a cada 1 km (médio);
- ❖ Marcada por movimentos verticais;
- ❖ Aquecida por processos de convecção;
- ❖ Grande turbulência – mistura;
- ❖ Estado do tempo;
- ❖ Concentra 99% da água da atmosfera;
- ❖ Possui a maior parte da massa atmosférica;
- ❖ Grande formação de nuvens e ocorrência de hidrometeoros;
- ❖ Presença no equador mais espessa (chegando, em média, a 17 km) e diminuindo em direção aos Polos (chegando a 7 km em média), podendo até mesmo desaparecer no inverno dessas regiões;

- ❖ **Tropopausa:** marca um brusco **aumento na estabilidade**, sendo bastante nítida nas regiões tropicais. Mais fria sobre o Equador (-85 °C) e menos fria nos Polos (-50 °C).

### 3.2. Estratosfera

- ❖ Compreendida entre 11 e 50 km;
- ❖ Até 20 km a camada é isotérmica;
- ❖ De 20 a 35 km a temperatura aumenta lentamente;
- ❖ De 35 a 50 km a temperatura aumenta rapidamente;
- ❖ O aumento da temperatura acontece com o aumento da altitude devido à absorção de radiação UV;
- ❖ Nuvens são raras, pouco vapor d'água;
- ❖ Menos densa;
- ❖ Camada estável;
- ❖ Ozônio atinge sua máxima concentração;
- ❖ Mais larga nos Polos e menos no Equador;

#### → Camada de ozônio

- ❖ Região de **maior concentração** de ozônio (~**25 km de altitude**);
- ❖ Moléculas de ozônio **absorvem radiação UV** em certos comprimentos de onda, **aquecendo o ar ao seu redor**;
- ❖ **O<sub>3</sub>** se forma principalmente pela ação dos relâmpagos, explosões nucleares, decomposição de **CO<sub>2</sub>** na atmosfera e fotodissociação;

#### → Correntes de Jato (*Jet stream*)

- ❖ São correntes circumpolares: no **inverno** - 10 a 13 km de altitude, entre 25 a 70° de latitude em cada um dos Hemisférios. No **verão** - menos intensas, estando a 12 e 15 km de altitude e entre 35 e 75° de latitude;

- ❖ É uma forte corrente, concentrada ao longo de um eixo quase horizontal na troposfera superior ou na estratosfera, caracterizada por fortes gradientes verticais e laterais da velocidade do vento e apresentando um ou mais máximos de velocidade (Organização Meteorológica Mundial).
- ❖ A velocidade é normalmente superior a 180 km/h;

### 3.3. Mesosfera

- ❖ Entre 50 a 80 km de altitude;
- ❖ Diminuição da temperatura;
- ❖ Poucos movimentos verticais;
- ❖ Ventos de até 500 km/h;
- ❖ Ocorrência de nuvens noctilucetas (85 km de altitude): nuvens finas, pouco distintas e que se movem rapidamente;
- ❖ Camada que filtra muitos meteoros...

### 3.4. Termosfera

- ❖ Situa-se além dos 90 km de altitude;
- ❖ Caracteriza-se pelo contínuo aumento da temperatura;
- ❖ O aquecimento na termosfera, é devido à absorção de radiação solar no ultravioleta, raios-X e raios gama;

#### → Ionosfera:

Não é realmente uma camada, mas sim uma **região eletrificada** da alta **atmosfera** (altitudes de 80 a 900 km) onde grandes concentrações de íons e elétrons livres ocorrem. Nesta camada a **radiação solar** (energia das ondas curtas - raio-X e UV) tira elétrons de moléculas, átomos de nitrogênio e oxigênio deixando elétrons livres e íons positivos;

A **maior densidade** de íons ocorre próximo a **300 km**. A concentração de íons é pequena **abaixo de 80 km** porque nestas regiões muita da radiação de ondas curtas necessária para ionização já foi **esgotada**.

Acima de ~400 km a concentração é pequena pela baixa densidade do ar, possibilitando a produção de poucos íons;

### **Fotodissociação → [ ] íons ↑↑**

A estrutura da **ionosfera** consiste em **3 camadas** de densidade variável de íons, as camadas: **D, E e F**, com altitude e densidade de íons crescente.

Como a **produção de íons** requer a radiação solar direta, a concentração de íons **diminui do dia para a noite**, particularmente nas camadas D e E, onde os elétrons se recombinaem com íons positivos durante a noite. As camadas D e E tendem a absorver fortemente as ondas de Rádio AM, enquanto a camada F tende fortemente a refleti-las.

Na ionosfera ocorre o fenômeno da aurora boreal (no **Hemisfério Norte**) ou austral (no **Hemisfério Sul**). São luzes observáveis nos polos, com brilho difuso, aparecendo geralmente como uma cortina ou em forma de arcos.



**Figura 9 e 10-** Magnetosfera terrestre e aurora boreal.

**Fonte:**<http://spaceweather.oasa.pt/>.

**Fonte:**<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2019/12/aurora-boreal-8-curiosidades-sobre-o-fenomeno.html>.

Estão relacionadas com o vento solar, um fluxo de partículas carregadas, prótons e elétrons, emanadas do sol com alta energia. Quando estas partículas se aproximam da Terra, elas são capturadas pelo campo magnético da Terra. As partículas que entram em contato com a atmosfera nos polos criam a luz;

Elas descrevem trajetórias espiraladas ao longo das linhas de indução do campo magnético terrestre, movendo-se para frente e para trás entre os polos magnéticos sul e norte, onde são "refletidas" devido ao aumento do campo magnético.

Campo magnético terrestre impede que a maioria das partículas solares alcancem à Terra; Quando estes átomos e moléculas retornam do seu estado energético excitado, eles emitem energia na forma de luz, o que constitui as auroras.

As zonas de maior ocorrência das auroras situam-se ao redor dos polos geomagnéticos (76°N, 102°W; 68°S, 145°E).

→ **Oxigênio:** Luz verde e vermelha;

→ **Nitrogênio:** Luz azul e roxa.

A atividade auroral varia com a atividade do sol.

LINKS INTERESSANTES

---

<https://www.iag.usp.br/siae98/atmosfera/estrutura.htm>

## 4. ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A estabilidade não controla a subida ou a descida do ar, mas se o ar continuará subindo ou descendo

### → Equilíbrio estável

Ar movido para cima ou para baixo tende a retornar a sua posição original. Resiste aos movimentos de ar ascendentes ou descendentes.

### → Equilíbrio instável

Quando recebe um pequeno impulso move-se o mais longe possível de sua posição original. Favorece as correntes de ar verticais.

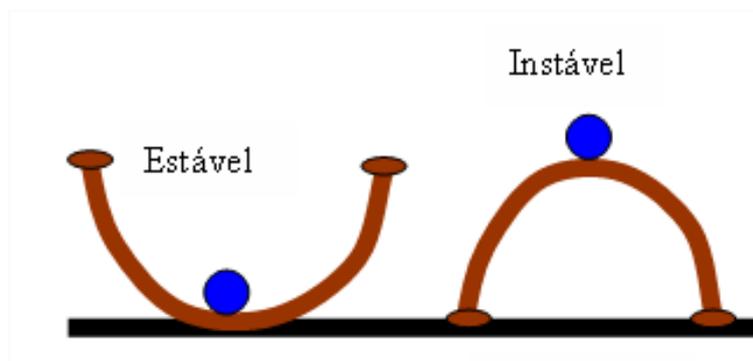


Figura 11- Diferença entre equilíbrio estável e instável.

Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=12436>.

- ❖ A atmosfera está **estável** quando ocorre **pouca diferença de temperatura** entre o ar de superfície e a camada de ar acima;
- ❖ A **temperatura** em uma parcela de **ar insaturado** em elevação **diminui** na **razão** adiabática **seca**, enquanto a **temperatura** em uma parcela de **ar saturado** **diminui** na razão adiabática **úmida**;

- ❖ A **diferença** entre **R.A.S.** (razão adiabática seca) e **R.A.U.** (razão adiabática úmida) de resfriamento é devida a **liberação de calor latente** na parcela de ar saturado em elevação;
- ❖ Em uma **atmosfera estável** a parcela de ar elevada será mais fria (pesada) que o ar ao redor. Por causa disso, a parcela tenderá afundar voltando à sua posição original;
- ❖ Na **atmosfera instável**, a parcela de ar elevada será mais quente (leve) que os arredores e irá continuar a subir, afastando-se da sua posição original;
- ❖ A atmosfera se torna **mais instável** (desestabiliza) com ar de superfície aquecido, e ar acima frio ou quando a camada acima se eleva;
- ❖ A atmosfera se torna **mais estável** quando o ar de superfície resfria, o ar acima aquece, ou a camada de ar acima afunda (subsistência) em uma grande área;
- ❖ A atmosfera é normalmente mais **instável** de manhã, e **estável** no final da tarde;
- ❖ A **estabilidade** não controla a subida ou descida de **ar**, mas sim se o ar **continuará subindo** ou **descendo**;
- ❖ Nuvens em camadas tendem a se formar em atmosfera estável. Enquanto nuvens cumuliformes tendem a se formar na atmosfera em instabilidade condicional.

#### → **Processo adiabático**

**Razão adiabática seca:** taxa de resfriamento do ar insaturado com a altitude, 10 °C a cada 1 km (UR < 100%)

**Razão adiabática úmida:** taxa de resfriamento do ar saturado, ~6 °C a cada 1 km, mas não é constante (UR=100%)

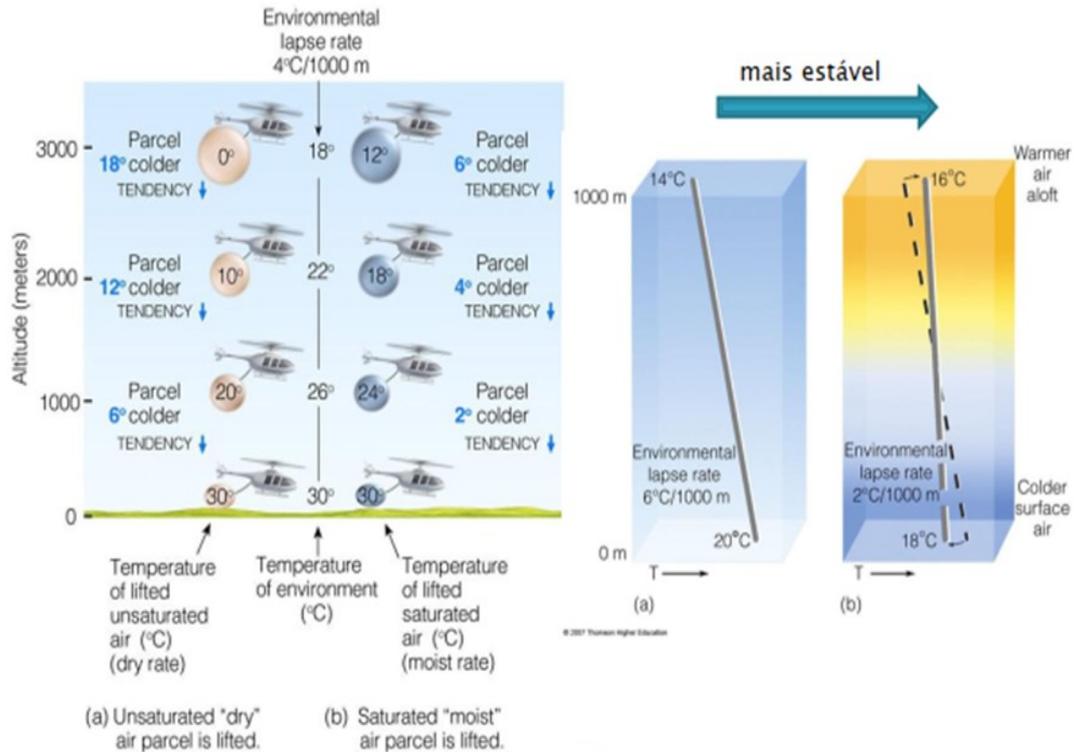


Figura 12 e 13- Processo adiabático.  
 Fonte: <https://slideplayer.com/slide/9385174/>.

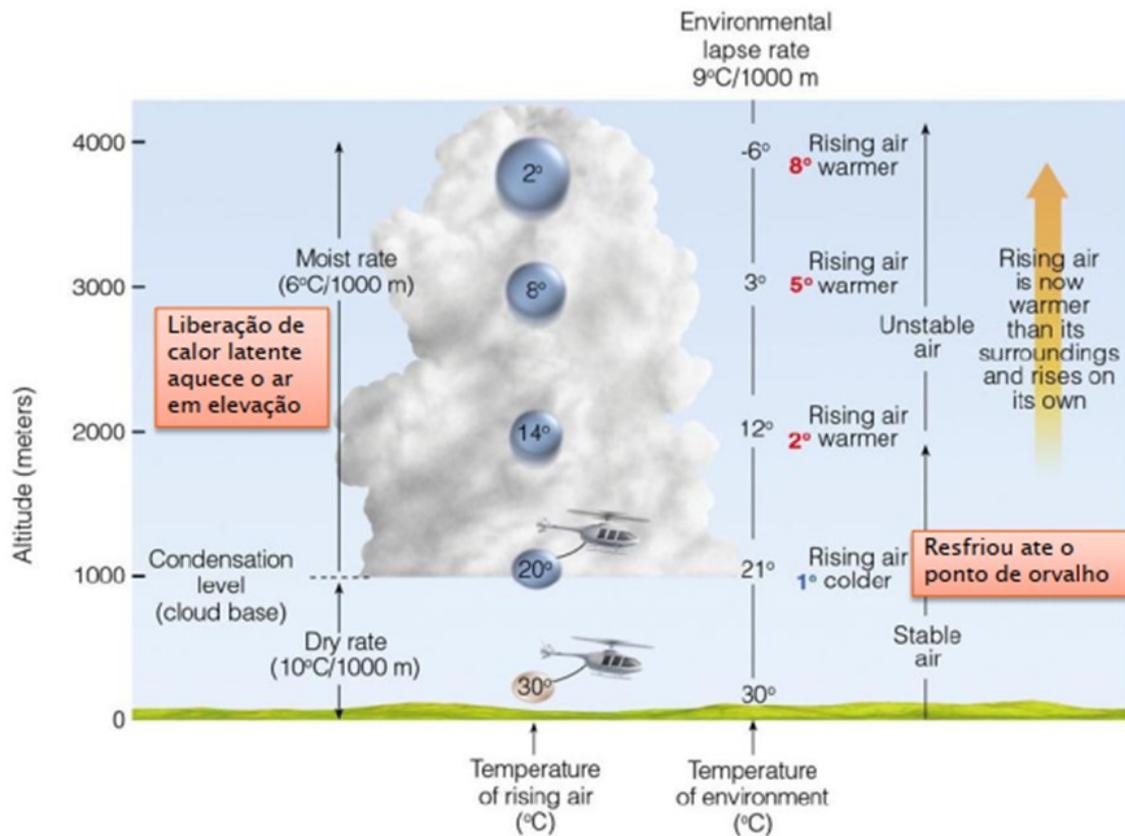
#### 4.1. Atmosfera Instável

- ❖ Temperatura do ar diminui rapidamente com a altitude;
- ❖ Nos dois casos (FIG.4) as parcelas de ar tendem a subir, pois, têm menores densidades e maiores temperaturas que o ar ao redor. Assim elas tendem a continuar se afastando da superfície que caracteriza uma atmosfera absolutamente instável;
- ❖ A atmosfera tende a ficar mais instável com o aquecimento da superfície ou o resfriamento do ar superior;
- ❖ **R.A.S.** e **R.A.U.** diferem pela liberação de calor latente no ar saturado.

#### 4.2. Ar Condicionalmente Instável

- ❖ Ar insaturado (porém úmido) é forçado a subir;

- ❖ Sob a Expande e esfria (RAS) até a temperatura do ar atingir o ponto de orvalho à nessa altitude ar saturado (100% de umidade relativa)
- ❖ A elevação resulta em condensação e formação de nuvens;
- ❖ Acima do nível de condensação: ar saturado (RAU);
- ❖ Ar mais aquecido (acima) que o ar ao seu redor, sendo assim tende a continuar subindo à instável



**Figura 14-** Ar condicionalmente instável.  
**Fonte:** <https://slideplayer.com/slide/9385174/>.

---

LINKS INTERESSANTES

---

<http://repositorio.asc.es.edu.br/bitstream/123456789/418/11/Cap%208%20Meteorologia%20e%20dispers%C3%A3o%20atmosf%C3%A9rica.pdf>

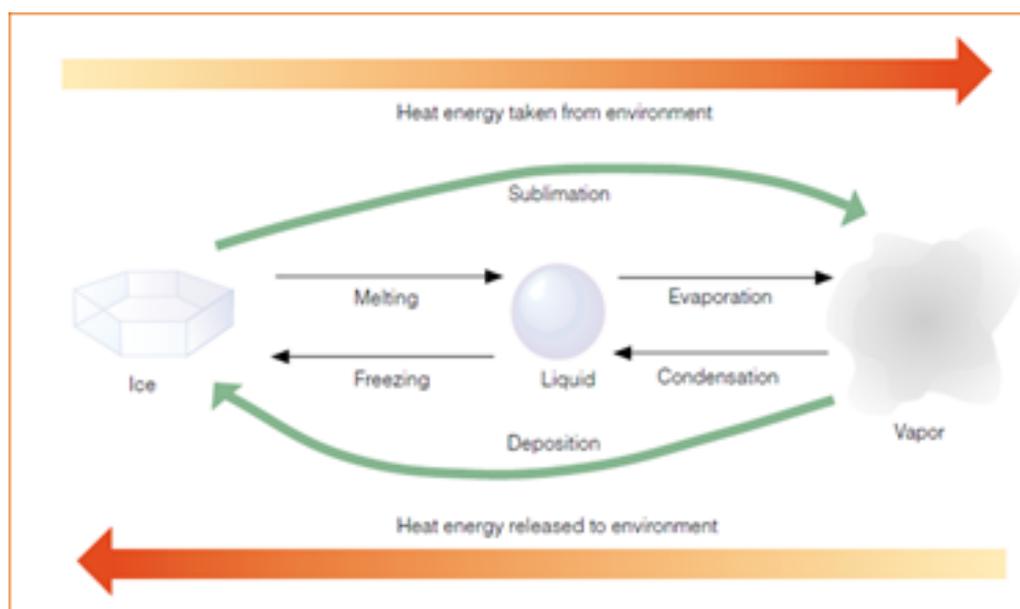
## 5. BALANÇO DE CALOR

### → LEMBRANDO

**CALOR SENSÍVEL:** é aquele medido pelo termômetro, que está relacionado com a variação da temperatura dos corpos;

**CALOR LATENTE:** quantidade de calor necessária para mudança de estado de uma substância.

O **calor latente** é uma importante **fonte de energia atmosférica**, visto que as moléculas de vapor que se separam da superfície são carregadas pelo vento. Quando chegam em altas altitudes, onde o ar é mais frio, o vapor muda para o estado líquido ou sólido nas nuvens, liberando **enormes quantidades de calor** para o ambiente ao redor.



**Figura 15-** Balanço de energia no ambiente.

**Fonte:** <http://www.sciencepartners.info/module-5-snow/heat-transfer/>.

**EVAPORAÇÃO → TRANSPORTE → CONDENSAÇÃO: são mecanismos extremamente importantes para realocar energia de calor na atmosfera!!**

## 5.1. Energia e a transferência de calor

**A quantidade de energia recebida no topo da atmosfera depende:**

- ❖ Emissão solar;
- ❖ Distância entre o Sol e a Terra;
- ❖ Altura do sol;
- ❖ Duração do dia.

→ **Radiação**

- ❖ **Libera energia** quando é **absorvida** por um objeto;
- ❖ É a **energia emitida** por um corpo em forma de **ondas**;
- ❖ Essas **ondas** têm propriedades elétricas e magnéticas, e são ditas **ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**;
- ❖ Elas não precisam de moléculas para se propagarem – no vácuo viajam a vel. constante de 300.000 km/s – a velocidade da luz;
- ❖ O sol é a fonte de toda energia injetada na nossa atmosfera;
- ❖ **Todas** as coisas com temperatura **acima do zero absoluto** emitem radiação;
- ❖ O **sol** comporta-se como um **corpo negro**, absorvendo toda energia recebida e irradiando energia a taxa máxima possível para determinada temperatura.
- ❖ Os **comprimentos de onda** emitidos por um objeto dependem de sua **temperatura**;
- ❖ Comprimento de onda é a distância entre cristas ( $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ );
- ❖ O sol emite radiação em todos os comprimentos de onda;
- ❖ À Terra, emite quase toda sua energia no comprimento de onda **infravermelho**;
- ❖ Objetos com temperatura mais alta emitem radiação com uma taxa maior que objetos com T mais baixa;

$$\lambda_{\max} = \frac{\text{constant}}{T}$$

Lei de Wien: relaciona a T e o comprimento de onda; Expressa a máxima emissão de radiação eletromagnética de um corpo negro.

Constante de dispersão de Wien ou constante de proporcionalidade: Cte =  $2,8977685 \times 10^{-3}$

Lei de Stefan: estabelece que o fluxo radiante é proporcional a quarta potencia de sua temperatura.

Constante de Stefan-Boltzmann: constante experimental.  
 $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

$$E = \sigma T^4.$$

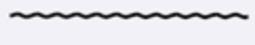
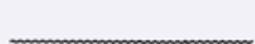
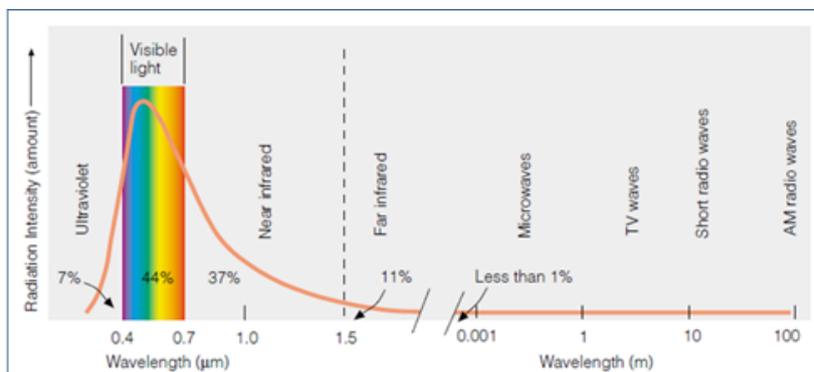
TYPE OF RADIATION	RELATIVE WAVELENGTH	TYPICAL WAVELENGTH (meters)	ENERGY CARRIED PER WAVE OR PHOTON
AM radio waves		100	Increasing 
Television waves		1	
Microwaves		$10^{-3}$	
Infrared waves		$10^{-6}$	
Visible light		$5 \times 10^{-7}$	
Ultraviolet waves		$10^{-7}$	
X rays		$10^{-9}$	

Figura 17- Ondas de radiação e suas características.

Fonte: <http://www.soest.hawaii.edu/MET/Faculty/businger/notes/L4-heat-rad.pdf>.



Temp. TERRA → 15 °C, radiação emitida entre 5 a 25 μm, com pico em 10 μm (infravermelho).

Sol – radiação de ONDAS CURTAS;  
Terra – radiação de ONDAS LONGAS;

Figura 18- Comprimento de onda vs Intensidade de radiação.

Fonte: <https://atmos.washington.edu/~hakim/101/radiation/>.

- ❖ **Todo objeto irradia** energia, mas **também absorve**;
- ❖ Se irradia mais do que absorve → **frio**;
- ❖ Se absorve mais do que irradia → **quente**;
- ❖ Em **dias ensolarados** à Terra absorve mais calor do que emite → **esquenta**.  
O **oposto** ocorre **à noite**;
- ❖ Quando a irradiação é **IGUAL** à absorção → **temperatura constante** (Temperatura de Radiação de Equilíbrio - **T.R.E**);
- ❖ A taxa com que um objeto irradia ou absorve energia depende fortemente de suas características (cor, textura, umidade), bem como da temperatura;
- ❖ Como à Terra e o Sol absorvem e emitem toda radiação possível, são considerados corpos negros;
- ❖ Estando à **Terra** a 150 milhões de km do Sol, sua **temperatura de equilíbrio** seria em torno de **-18 °C** ao invés dos 15 °C observados;
- ❖ Ao contrário da Terra, a **atmosfera** não se comporta como um corpo negro (ela **absorve alguns  $\lambda$**  de radiação e é **transparente a outros**);
- ❖ Atmosfera é um **absorvedor seletivo!**;
- ❖ Existem muitos absorvedores seletivos em nosso ambiente:
- ❖ **Neve**: absorve bem o infravermelho, porém pobremente a luz solar;
- ❖ **H<sub>2</sub>O** e **CO<sub>2</sub>**: fortes absorvedores de radiação infravermelha e pobres absorvedores de radiação visível;
- ❖ **N<sub>2</sub>O**, **CH<sub>4</sub>** e **O<sub>3</sub>**: absorvem energia infravermelha emitida pela Terra e ganham energia cinética, com o aumento do movimento, elas se chocam com partículas de **N<sub>2</sub>** e **O<sub>2</sub>** (pobres absorvedores de infravermelho) e transferem energia cinética resultando em um aumento da temperatura.

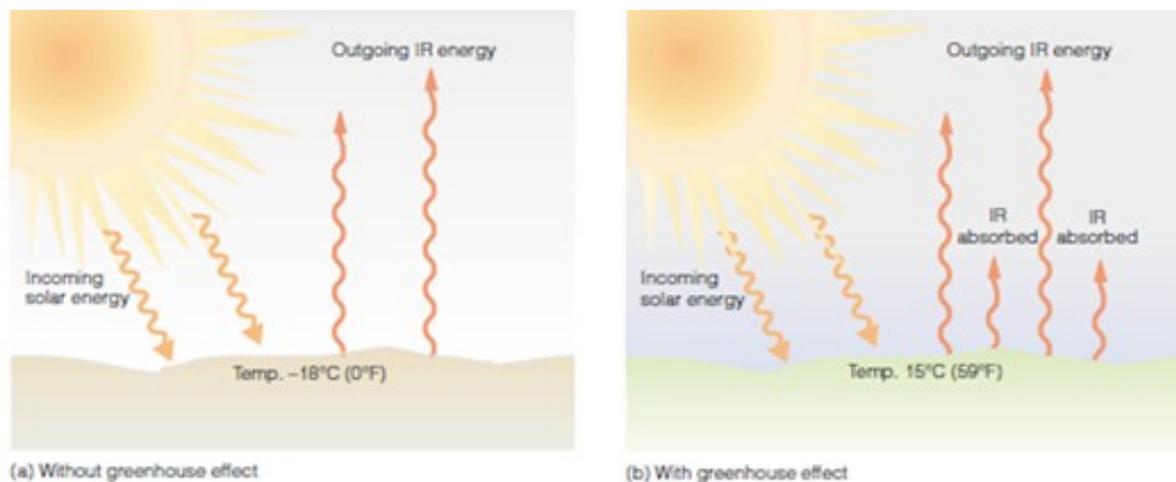
#### → **Efeito estufa**

É a **ação** do **vapor d'água** e do **CO<sub>2</sub>** absorvendo e emitindo radiação infravermelha, mantendo a superfície da Terra com temperatura mais elevada do que deveria (em relação à temperatura de equilíbrio do corpo negro);

Existe uma **janela atmosférica** (8 a 11  $\mu\text{m}$ ) **no infravermelho**, que permite a passagem de infravermelho e sua perda para o espaço.

A **presença das nuvens** tende a manter a **temperatura** dos **dias menores** e das **noites maiores**. Nuvens são excelentes emissoras de radiação infravermelha (**topo e base**).

O **efeito estufa** atmosférico é um **processo natural** que ocorre devido ao vapor d'água, CO<sub>2</sub> e constituintes menores que são absorvedores seletivos.



**Figura 19-** Efeito estufa.

**Fonte:** <https://www.atmos.illinois.edu/~snodgrss/Notes%20on%20Temperature%20Controls.html>.

Apesar de o **CO<sub>2</sub>** ser apontado como principal **vilão** no aumento global de temperatura, nos últimos anos a **concentração** de **CH<sub>4</sub>**, **N<sub>2</sub>O** e **CFC**, também gases do efeito estufa, tem sido coletivamente aumentada, representando um **efeito quase igual ao do CO<sub>2</sub>**.

Os sensores que medem a energia solar refletida por um alvo (objeto) na superfície terrestre são construídos na faixa de 0,4 a 3 μm, ao passo que os que medem a energia emitida pela superfície da Terra são construídos na faixa de 10 a 12 μm (LIU, 2006). É preciso lembrar que a atmosfera interfere de forma na transmissão da radiação solar para a superfície terrestre. Ela absorve ou espalha a radiação vinda do Sol de forma diferenciada em função dos comprimentos de onda e de características físicas das partículas que estão suspensas (na atmosfera) e que são atingidas pela radiação eletromagnética.

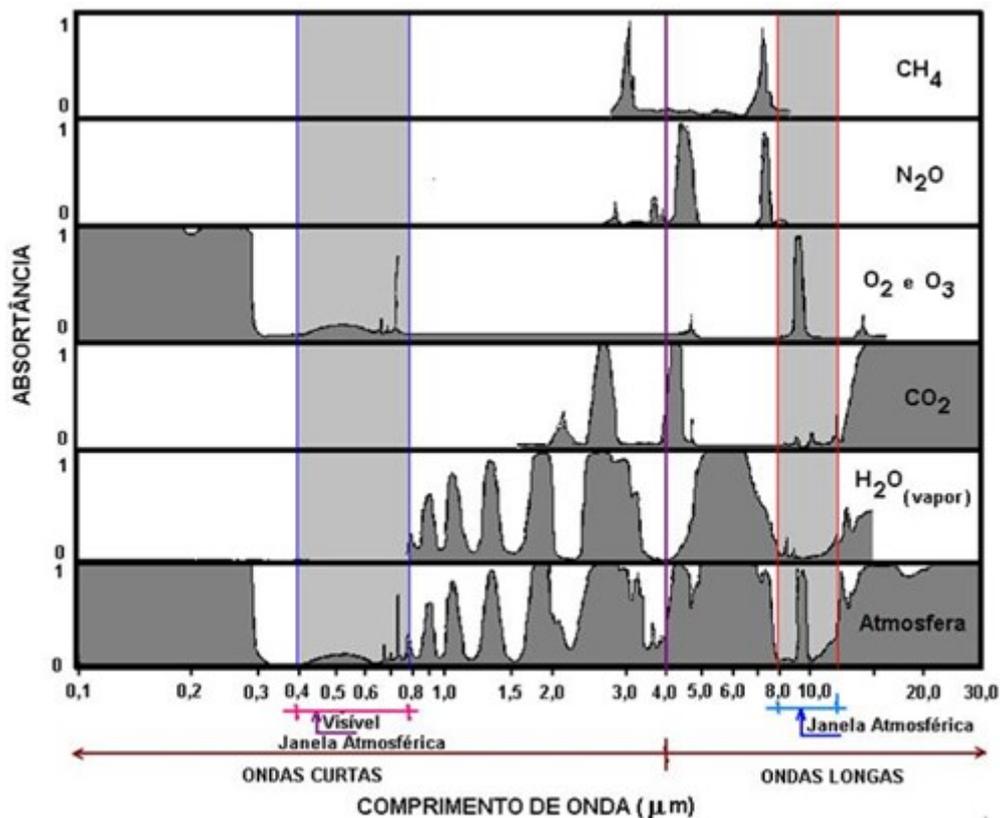


Figura 20- Comprimento de onda vs Absortância dos gases atmosféricos.  
 Fonte: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>.

É importante ter em mente também que a radiação solar (no visível) interage pouco com a atmosfera (Figura 1). Porém, quando consideramos a radiação emitida pela superfície da Terra, vemos que esta ocorre na faixa do infravermelho, onde gases de efeito estufa como o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{O}$  absorvem fortemente (YNOUE, et al., 2017).

Contudo, mesmo em se tratando da radiação infravermelha, a atmosfera não absorve em todas as faixas de comprimentos de onda do infravermelho. Existem determinadas faixas de comprimento de onda, chamadas de janelas atmosféricas, em que a atmosfera transmite quase totalmente a radiação. As **principais janelas atmosféricas** são: **ultravioleta** e **visível** (0,3 a 0,75  $\mu\text{m}$ ), **infravermelha** próxima (0,77 a 0,91  $\mu\text{m}$ ), **infravermelha termal** (8,0 a 9,2 e 10,2 a 12,4  $\mu\text{m}$ ) e **micro-ondas** (7,5 a 11,5 mm e > 20mm). Fora dessas bandas (faixas), a energia eletromagnética é atenuada severamente, de maneira que os sensores de satélites são desenhados

para captar essas faixas de janelas atmosféricas para evitar, ao máximo, o efeito das atenuações (LIU, 2006).

## 5.2. Balanço de calor

**A QUANTIDADE DE CALOR QUE ENTRA É IGUAL À QUE SAI.**

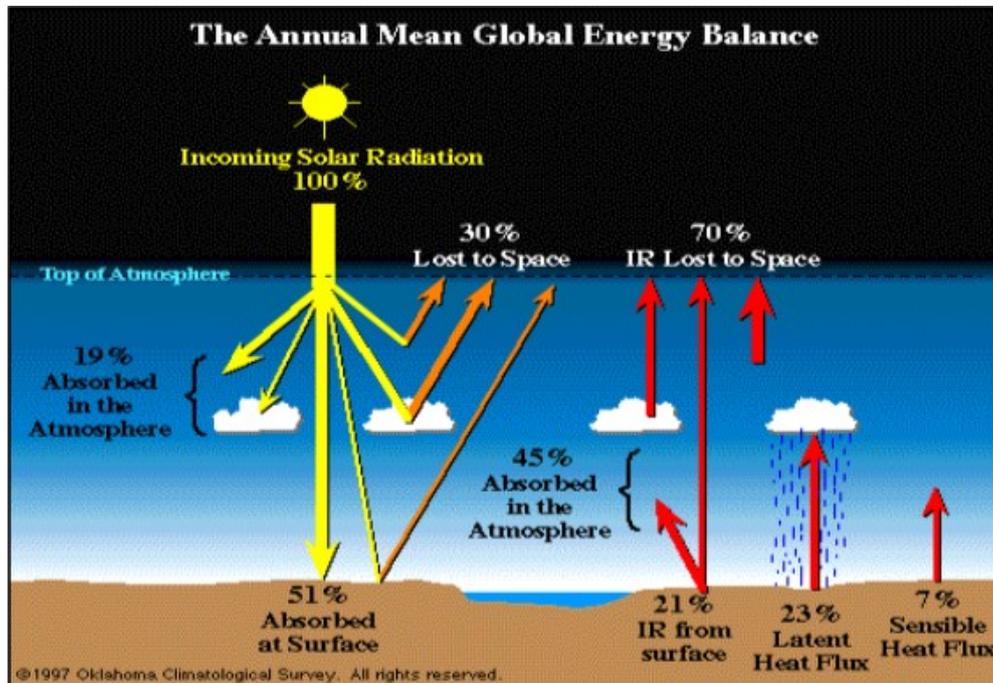


Figura 21- Balanço anual de energia global.

Fonte: <https://oymyakon.weebly.com/energy-budget.html>.

Da radiação total interceptada pela Terra (sistema Terra-atmosfera), cerca de 30 unidades são refletidas de volta para o espaço. As restantes 70 unidades são absorvidas, 19 unidades pela atmosfera e 51 unidades pela superfície da Terra (Terra-oceano). Se toda a energia absorvida pela Terra fosse irradiada diretamente para o espaço, o balanço de calor da Terra seria muito simples. Contudo, conforme vimos anteriormente, certos gases na atmosfera atuam no sentido de retardar a perda de radiação terrestre, absorvendo uma boa parte dela e irradiando grande parte desta energia de volta para à Terra.

Como resultado deste processo, a superfície da Terra recebe uma grande quantidade de radiação de onda longa da atmosfera (95 unidades). A superfície da Terra, por sua vez, irradia 116 unidades de energia de onda longa para a atmosfera. Portanto, nesta troca (em onda longa) a atmosfera tem um ganho líquido de 15 unidades, enquanto a Terra tem uma perda líquida de 21 unidades. As restantes 6 unidades passam diretamente através da atmosfera e são perdidas no espaço. A radiação entre 8 a 11 escapa mais facilmente porque o vapor d'água e o dióxido de carbono não absorvem estes comprimentos de onda.

Até agora contamos uma perda de 21 das 51 unidades de radiação de onda curta absorvidas pela superfície da Terra. E as 30 unidades restantes? Parte desta energia é transferida da superfície da Terra para a atmosfera através de calor latente, por moléculas de água durante o processo de evaporação (23 unidades). O calor latente refere-se à quantidade de calor envolvida em mudanças de fase da água. Por exemplo, a mudança da água líquida para vapor exige fornecimento de calor latente, enquanto a transformação de vapor para líquido libera calor latente. Outra parte das 30 unidades é transferida da superfície da Terra para a atmosfera por calor sensível (condução e convecção -7 unidades).

Um balanço geral é obtido porque a atmosfera emite 64 unidades de energia para o espaço como radiação de onda longa, fechando o balanço entre radiação incidente e radiação emitida

(fonte: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-10.html>).

---

*LINKS INTERESSANTES*

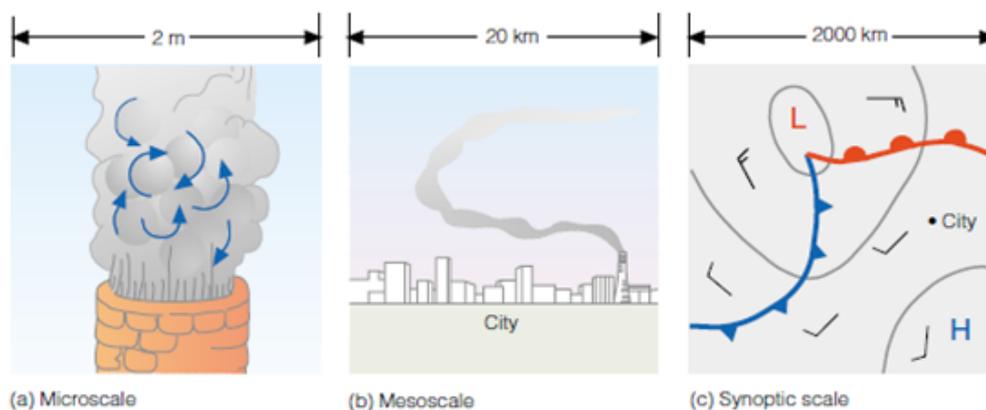
---

**<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>**

## 6. CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Movimentos atmosféricos - consequência da busca pelo equilíbrio gerado pelas diferenças de aquecimento da superfície da Terra, as quais resultam em gradiente de pressão e densidade.

- Existem todos os tamanhos de turbulência na atmosfera, sua circulação é turbulenta;
  - Desde os vórtices de uma fumaça (micro escala) até os ventos de leste que cobrem enormes regiões do planeta;
  - Também variam no tempo, tendo duração de alguns segundos até semanas ou mais;
  - Todas essas escalas de movimento envolvem transformações de energia (interna, potencial ou cinética);



**Figura 22-** Diferentes escalas do movimento atmosférico (ahrens).  
**Fonte:** [http://www.lcb.iag.usp.br/material/apereira/aca115/textos/Aulas\\_1\\_2\\_3.pdf](http://www.lcb.iag.usp.br/material/apereira/aca115/textos/Aulas_1_2_3.pdf).

### 6.1 Modelo de circulação em uma célula

- O primeiro modelo de circulação atmosférica foi proposto por Hadley (1735) quase um século antes do estabelecimento matemático da força de coriolis

- Ele propôs a existência de duas células de circulação, uma em cada Hemisfério explicando a ocorrência dos ventos de superfície na zona tropical (os alísios);

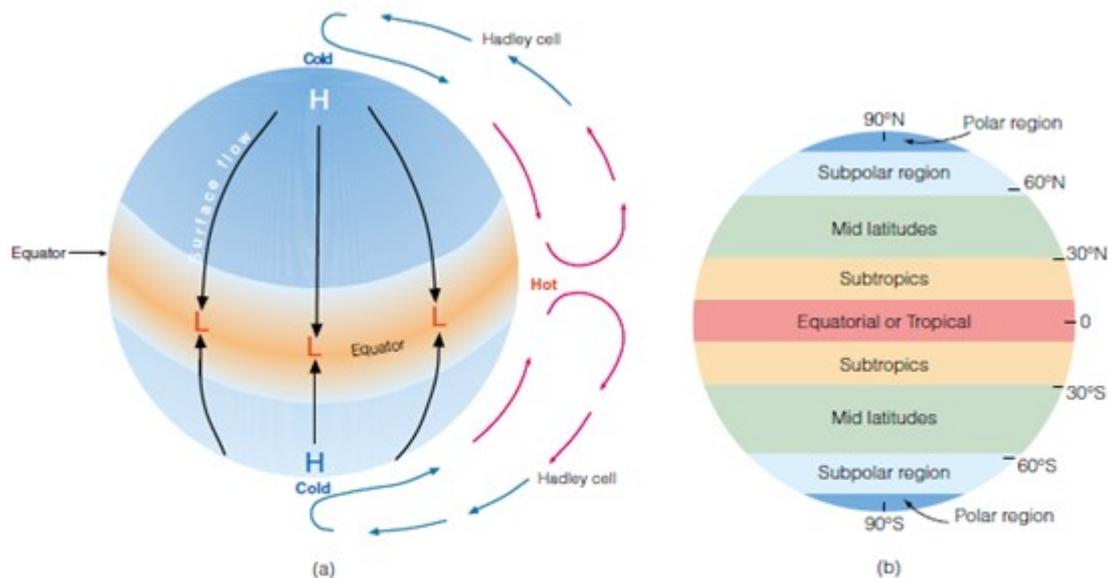


FIGURE 7.14

Diagram (a) shows the general circulation of air on a nonrotating earth uniformly covered with water and with the sun directly above the equator. (Vertical air motions are highly exaggerated in the vertical.) Diagram (b) shows the names that apply to the different regions of the world and their approximate latitudes.

Figura 23- Modelo de Hadley.

Fonte: <https://slideplayer.com/slide/13506628/>.

O modelo assumiu:

- A superfície da Terra era uniformemente coberta por água (não considera as diferenças de aquecimento entre terra e água);
- O Sol incidindo diretamente sobre o Equador (vento não se altera sazonalmente);
- Terra sem rotação (só FGP atuando);

## 6.2 Modelo de circulação em 3 células

O Modelo de três células considera:

- Uma na faixa tropical, denominada célula de Hadley;
- Outra na zona de latitudes médias, célula de Ferrel;
- E uma terceira dita, célula polar;

Células atuam na troposfera (limite superior na tropopausa). Na zona equatorial convergem ventos provenientes dos cinturões subtropicais de alta pressão (localizados a 30°S e N), impulsionados pela força gradiente de pressão e defletidos por efeito de coriolis.

Sobre as águas equatoriais, onde o ar é aquecido e a FGP muito fraca, os ventos são bastante fracos. Região chamada de DOLDRUMS.

A faixa de encontro dos alísios de NE com os de SE é conhecida como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua posição coincide com a do Equador térmico.

A ZCIT é caracterizada por grande instabilidade atmosférica que favorece o desenvolvimento de intensas correntes ascendentes, com formação de grandes nuvens convectivas, gerando precipitação abundante.

A uma altitude de 8 a 12 km acima da ZCIT ocorre uma divergência de ar, causada por uma alta pressão (tropopausa). Existem três grandes centros anticiclônicos (A) semi-permanentes situados sobre os oceanos em torno de 30°S, formam um cinturão que praticamente circunda o planeta.

No HN existem igualmente 3 centros de alta pressão, porém não chegam a constituir uma faixa contínua, pois o anticiclone situado sobre o continente (na Sibéria) pode desaparecer durante o verão.

Os anticiclones permanentes marcam o local onde as células de Hadley e Ferrel tem seus ramos descendentes, provocando divergência de ar na superfície.

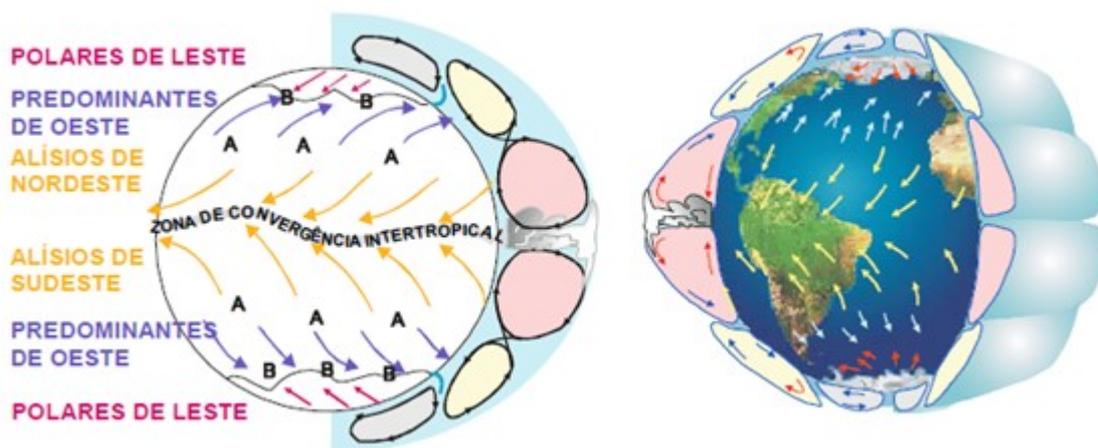
Parte desse fluxo vai em direção aos trópicos e parte em direção aos polos como ventos predominantes de oeste.

Os ventos que vão em direção aos polos encontram ventos de superfície provenientes das células polares entre 50 a 60°.

Essa região de convergência de ventos é dita “Frente Polar”. A frente polar não é propriamente uma zona contínua de pressões baixas à superfície, mas uma faixa muito propícia ao desenvolvimento de vórtices ciclônicos.

O encontro do ar quente oriundo dos subtrópicos com o ar frio da região circumpolar favorece a formação dos ciclones extratropicais, que têm características migratórias e estão associados a intensos ventos ascendentes.

De forma geral, esse modelo simplificado representa os principais aspectos da realidade.



**Figura 24-** Modelo de três células.

**Fonte:** [https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Modelo-da-circulacao-geral-da-atmosfera-Os-ventos-e-as-areas-de-alta-A-e\\_fig3\\_325319443](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Modelo-da-circulacao-geral-da-atmosfera-Os-ventos-e-as-areas-de-alta-A-e_fig3_325319443).

### 6.3 Circulação em médias latitudes

- ❖ Marcada pela presença de centros de alta e baixa pressão;
- ❖ Estes sistemas transferem enormes quantidades de calor;
- ❖ Força de Coriolis  $\Rightarrow$  mais a instabilidade inerente do ar formam vórtices atmosféricos;
- ❖ CICLONES e ANTICICLONES são os padrões de circulação resultantes;
- ❖ São padrões mais horizontais de circulação.

### → Centros de alta pressão

- ❖ Núcleos de pressão mais elevada;
- ❖ Anticiclones;
- ❖ Representados por A ou H;
- ❖ O ar à sup. tende a se afastar;
- ❖ Divergência de massa;
- ❖ Ao se afastar é substituído pelo ar proveniente de camadas mais elevadas da atm;
- ❖ Sobre um centro de Alta pressão, o movimento vertical do ar é SUBSIDENTE;
- ❖ A tendência inicial de qualquer parcela de ar ao redor de um centro de A é mover-se, afastando-se do centro para a periferia;
- ❖ Uma vez iniciado o movimento entra em ação a Aceleração de CORIOLIS:
- ❖ Age perpendicular a direção do movimento;
- ❖ HN a p/ Direita;
- ❖ HS a Desviando-o p/ esquerda.

### → Centros de baixa pressão

- ❖ Núcleos de pressão baixa;
- ❖ Centros Ciclônicos ou ciclones;
- ❖ Representados por B ou L;
- ❖ Em áreas e menor pressão há espaço sobrando, pois nelas o ar encontra-se rarefeito;
- ❖ Qualquer parcela de ar tende a se deslocar da periferia pro centro;
- ❖ Nestes centros a convergência de massa à superfície e o movimento vertical do ar é ASCENDENTE;
- ❖ Após iniciado o movimento à Faz-se sentir o efeito da aceleração de Coriolis
- ❖ HN a Desvio p/ ESQUERDA
- ❖ HS a Desvio p/ DIRETA

# Alta e Baixa Pressão

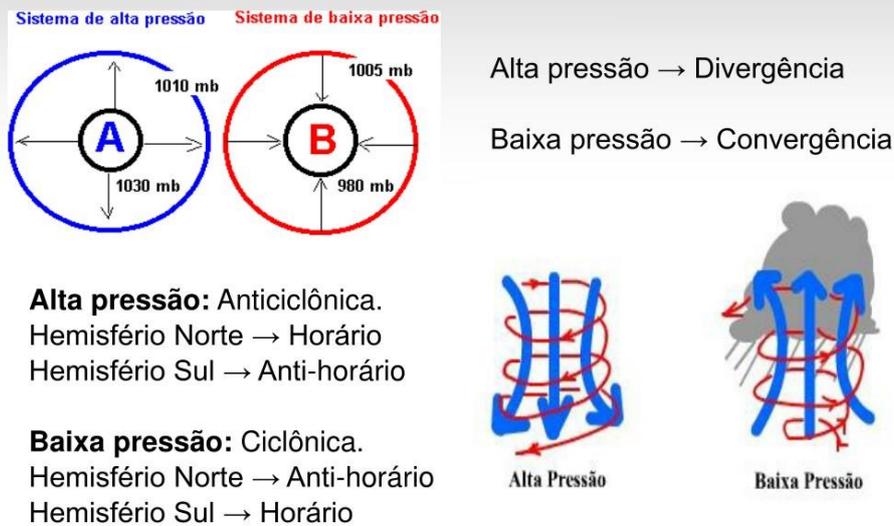


Figura 25- Centros de pressão.

Fonte: <https://www.slideserve.com/davis-hebert/meteorologia-oceanografia>.

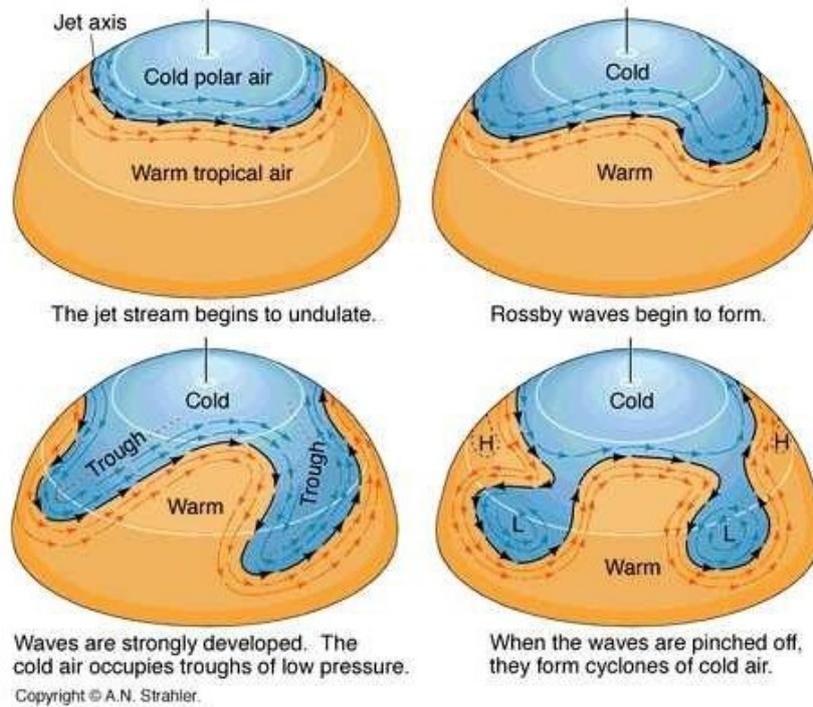
## → Circulação em altas latitudes

Entre as latitudes de 40° a 60° existe uma região mais ou menos permanente conhecida como **FRENTE POLAR**.

**JATO POLAR:** gera vórtices de larga escala de forma que ar quente pode penetrar em altas latitudes e ar polar pode ser isolado em médias latitudes (formando as ONDAS DE ROSBY).

**Essas ondas sempre viajam em direção oeste ao redor do globo.**

O vento é o movimento horizontal de parcelas de ar. Ele faz parte da circulação geral da atmosfera, mas possui influências em diferentes escalas e será melhor estudado no capítulo 8.



**Figura 26-** Ondas planetárias - ondas de Rossby.  
**Fonte:** <https://aemetblog.es/2017/08/26/ondas-planetarias-o-como-pasar-frio-en-verano/>.

---

LINKS INTERESSANTES

---

<https://www.youtube.com/watch?v=MU572cFJOiY>

## 7. NOÇÕES DE METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA

### 7.1 Meteorologia

**É o estudo da atmosfera e de seus fenômenos**, a **ciência** que estuda a **atmosfera terrestre**. Como em quase todos os campos do conhecimento, a primeira etapa do processo de compreensão de um fenômeno se trata da quantificação de suas propriedades por intermédio da observação e/ou medição.

No estudo da atmosfera, essas propriedades são conhecidas como elementos meteorológicos ou climáticos, e estes são utilizados pelos meteorologistas na descrição do estado físico da atmosfera. 340 anos antes de Cristo, Aristóteles escreveu um livro sobre a filosofia da natureza chamado “Meteorológica”, essa obra resumia o conhecimento daquela época sobre: tempo, clima, astronomia, nuvens, chuva, sol, entre outros.

A palavra meteorologia vem do grego “meteoros” que significa no alto do ar. A meteorologia não nasceu como ciência natural até a invenção dos instrumentos meteorológicos. O físico e astrônomo Galileu no final de 1500 inventou o primeiro termômetro. E em 1643, Torricelli inventou o barômetro de mercúrio. Logo após muitos instrumentos foram inventados como o telégrafo. Depois da segunda grande guerra, teve os satélites e supercomputadores.

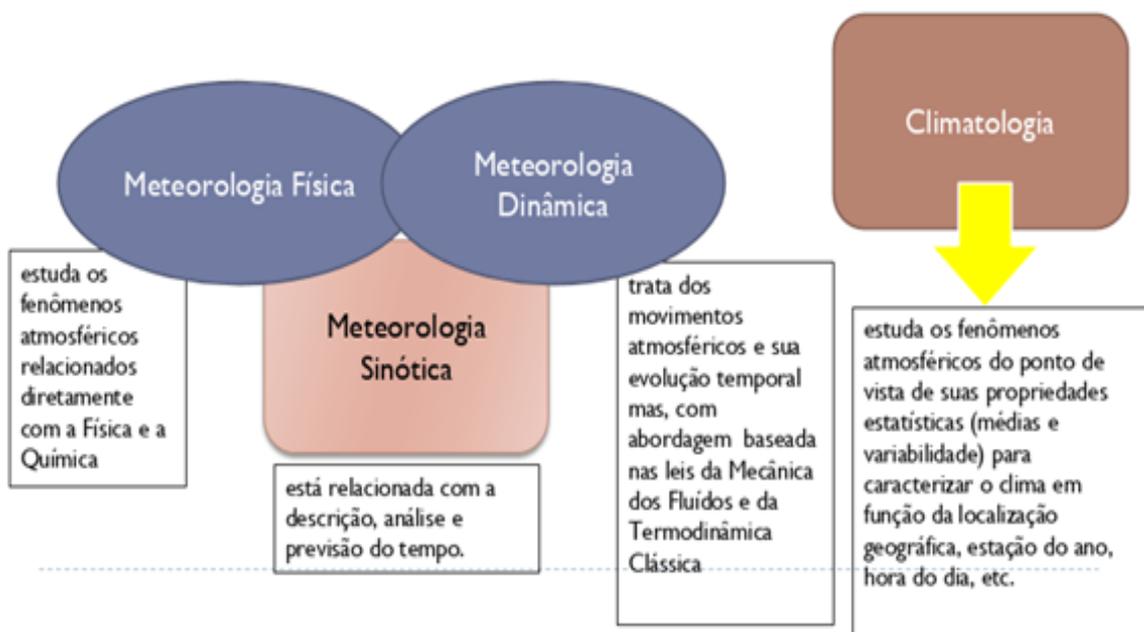
Seus aspectos mais tradicionais e conhecidos são a previsão do tempo e a climatologia.

O **tempo** pode ser definido como o **estado da atmosfera em determinado instante e lugar**. A **curto prazo**, é o tempo que **condiciona** a segurança dos meios de transporte, a forma de lazer, a **dispersão de poluentes** e as atividades da agricultura. As **condições do tempo** são **descritas** em termos de elementos básicos, que são **quantidades ou propriedades** medidas regularmente. Os mais

importantes são: temperatura do ar, umidade do ar, pressão do ar, velocidade e direção do vento, tipo e quantidade de precipitação, tipo e quantidade de nuvens.

A meteorologia no seu sentido mais amplo é uma ciência extremamente vasta e complexa, pois a atmosfera é muito extensa, variável e sede de um grande número de fenômenos.

O **tempo** é o **elemento mutante**, enquanto o **clima** refere-se ao **estado mais constante** da ação atmosférica num determinado lugar. O tempo em um determinado local, durante um determinado período, pode ser expresso pela combinação de várias grandezas físicas, tais como a temperatura e a umidade do ar, precipitação, o vento, a nebulosidade, etc. Grandezas essas, que comunicam ao meio atmosférico (ambiente) suas propriedades e características. Tais grandezas são denominadas elementos climáticos, e o regime normal desses elementos define o clima da região.



#### → Problemas práticos da meteorologia

- ❖ Previsão de fenômenos atmosféricos que influenciam as atividades humanas;

Ex.: O tempo no dia-a-dia, riscos para a aviação, secas, tempestades severas, eventos na alta atmosfera que possam afetar as rádios-comunicações.

- ❖ Avaliação do impacto das atividades humanas sobre o meio atmosférico;

Ex.: poluição do ar, modificação da composição da atmosfera, tempo e clima.

- ❖ Modificações benéficas de certos processos físicos agindo em pequena escala;

Ex.: supressão de granizo, aumento e redistribuição da precipitação.

- ❖ Fornecimento das informações estatísticas básicas da atmosfera necessárias para planejamento de longo prazo.

EX.: zoneamento de uso do solo, projeto de edifícios, especificações para aeronaves.

## → **Tempo**

O tempo pode ser definido como o estado da atmosfera em determinado instante e lugar. A previsão do tempo não é uma ciência exata. A previsão de tempo só é possível ao haver o desenvolvimento em computação e modelagem numérica de tempo.

Modelos numéricos são equações que permitem representar matematicamente qualquer categoria de situação ou fenômeno. No caso da meteorologia, os modelos numéricos de tempo são equações que representam as condições físicas (processos de troca de energia, mudança de estado físico, etc.) e dinâmicas (movimentos de circulação da atmosfera num dado momento).

Os dados de entrada dos modelos são originados da medição de determinados elementos atmosféricos e parâmetros distribuídos por todo o território ou área de interesse.

Existem três elementos principais: coleta de dados em escala mundial, previsão das condições futuras da atmosfera, disseminação da previsão.

*Coleta de dados em escala mundial: Mais de dez mil estações em terra, centenas de navios e bóias fornecendo informações do tempo de superfície quatro vezes ao dia, nos aeroportos com informações horárias, alta atmosfera por radiossondagens e satélites.*

Organização Meteorológica Mundial (é responsável pela troca internacional de dados sobre o tempo e certifica os dados e sua procedência, dado que a padronização dos mesmos, é muito importante) e a NCEP (National Center for Environmental Prediction)



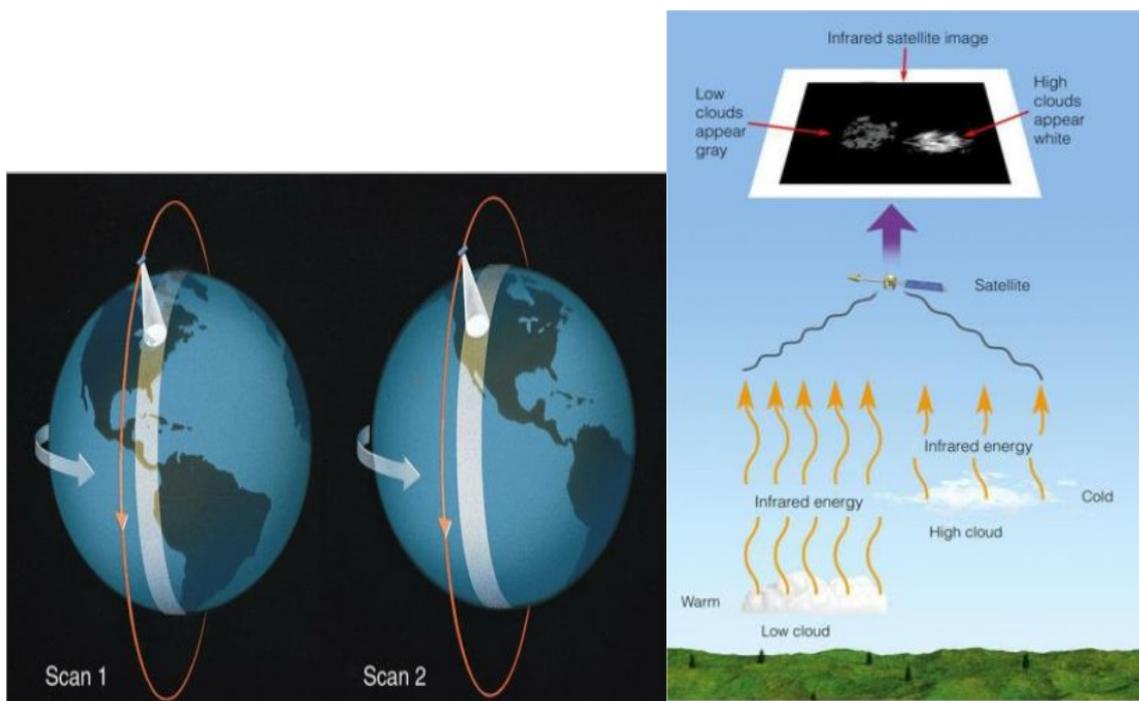
### → Previsão do tempo

É realizada através de dados coletados por estações meteorológicas que podem ser convencionais ou automáticas e possuem como principais ferramentas:

- ❖ **Sistema de modelagem de dados em alta performance** (supercomputadores);
- ❖ **Sistemas de processamento interativo (AWIPS)**: permitem colocar muitas ferramentas em um único programa, fornecendo quase continuamente dados de vento, temperatura, pressão, etc. É bastante comum nos aeroportos;
- ❖ **Meteogramas**: conjunto de gráficos que mostram a variação temporal de várias propriedades do tempo;
- ❖ **Sondagens**: perfil bi-dimensional da atmosfera, utilizam balões meteorológicos para uma grande variedade de propósitos como, medida da altura da base das nuvens, medida do vento em altitude por teodolito ótico,

medida do vento em altitude por radar, sondagem do ar superior por radiossonda, sondagem do ar superior ao nível constante;

- ❖ **Satélites:** sensores que captam o espectro eletromagnético refletido. Dividem-se em: Geoestacionários e de órbita polar;
- ❖ **GOES** (Geostationary operational environmental satellite): Nova geração de satélites, pode detectar a quantidade de radiação vinda das nuvens, pode obter informações sobre a umidade em diferentes níveis da atmosfera;
- ❖ **Imagens infravermelhas:** mostra o quanto de radiação uma nuvem está emitindo, possibilita distinção entre nuvens altas e baixas (quentes e frias);
- ❖ **Imagens visíveis:** detecta radiação refletida para o satélite (como uma fotografia).



**Figura 27 e 28-** Órbita polar e leitura infravermelha de satélite.  
**Fonte:** <https://www.slideserve.com/jethro/condensation-dew-fog-and-clouds>.

A medição e registro de elementos meteorológicos (temperatura, pressão, radiação solar, velocidade e direção do vento...) é realizada através da observação meteorológica.

**Estação meteorológica convencional:** instrumentos de medição dispostos em um cercado padrão, de maneira padronizada, sua medição depende da presença de um observador (normalmente um técnico em meteorologia).



**Figura 29-** Exemplo de estação meteorológica convencional.

**Fonte:** [http://redebonja.cbj.g12.br/ielusc/revi\\_2005/revi\\_mod\\_reg.php?id=1508](http://redebonja.cbj.g12.br/ielusc/revi_2005/revi_mod_reg.php?id=1508).

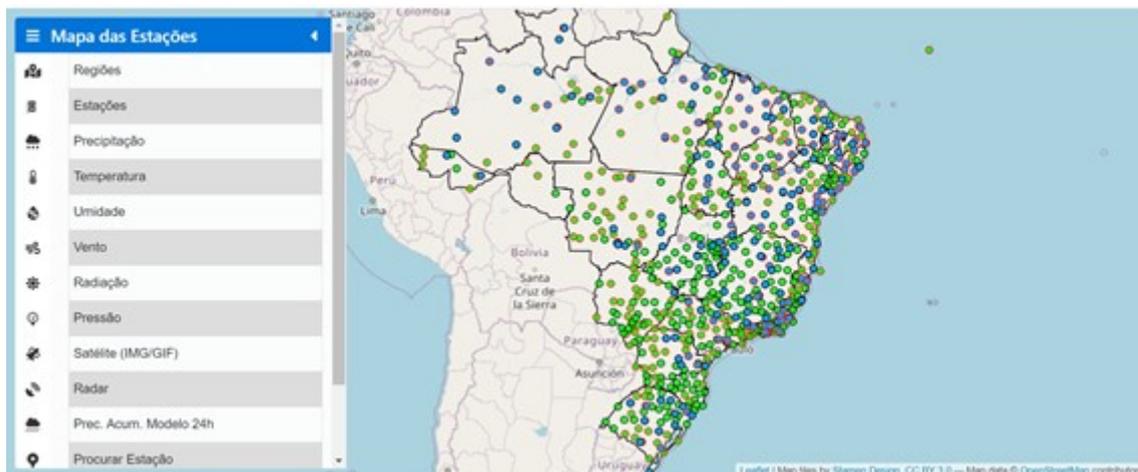
**Estação meteorológica automática:** equipamentos realizam a medição e armazenam em um datalogger e enviam para um servidor.



**Figura 30-** Exemplo de estação meteorológica automática.

**Fonte:** [https://www.researchgate.net/figure/Figura-03-Estacao-Meteorologica-automatica-EMA-instalada-na-escola-agricola-em-Humaita\\_fig3\\_262068534](https://www.researchgate.net/figure/Figura-03-Estacao-Meteorologica-automatica-EMA-instalada-na-escola-agricola-em-Humaita_fig3_262068534).

## Instituto Nacional de Meteorologia - **Mapa das estações meteorológicas brasileiras**



**Figura 31-** Imagem da página do mapa brasileiro de estações meteorológicas.  
**Fonte:** <https://mapas.inmet.gov.br/>.

**Precisão da previsão:** previsão para algumas horas a poucos dias são boas e quanto mais longa pior.

A habilidade do bom meteorologista está ligada à quantidade de informações sobre a atmosfera presente que ele tem à disposição, seu conhecimento científico, a experiência e a intuição. Por mais avanços tecnológicos, computacionais e de métodos, a presença do meteorologista é fundamental para uma previsão melhor.

Para realizar uma previsão de tempo necessitamos de ter uma boa precisão e de realizar medições.

### → **Temperatura do ar**

A temperatura do ar é determinada através dos seguintes fatores:

- ❖ **Fatores microclimáticos:** relacionados a latitude, altitude, correntes oceânicas, continentalidade/oceanidade, massas de ar e frentes;
- ❖ **Fatores topoclimáticos:** relacionados ao relevo, configuração e exposição do terreno;
- ❖ **Fatores microclimáticos:** relacionados à cobertura do terreno;

A temperatura do ar também pode sofrer variações e estas podem ser:

- ❖ **Diárias:** em função da disponibilidade de radiação solar na superfície (pode ser influenciada pela passagem de frentes e presença de nuvens);
- ❖ **Máximo diário:** 2 a 3 horas após o pico de energia radiante;
- ❖ **Mínimo diário:** antes do nascer do sol (madrugada);
- ❖ **Anual:** função da disponibilidade de energia, máxima no verão e mínima no inverno.

Também pode haver uma variação espacial de temperatura de acordo com:

- ❖ **Escala Global (macroescala):** dependente da latitude e proximidade com os oceanos (longitude);
- ❖ **Escala regional e local:** sobre influências da altitude; Santa Catarina (Escala regional) e Araranguá (Escala local).

A variação vertical da temperatura do ar é o fator determinante para a estabilidade ou instabilidade.



Se utiliza os seguintes sensores para auxiliar os pontos já citados:

- ❖ **Dilatação de líquido:** termômetros – mercúrio. Ficam instalados em estações meteorológicas convencionais;

- ❖ **Dilatação sólida:** termógrafos – arco metálico. A variação é proporcional à variação da temperatura. Ficam instalados no abrigo, utilizados em estações meteorológicas convencionais;
- ❖ **Termistores:** feitos de material semicondutor com coeficiente térmico negativo (apresenta variação da resistência com a temperatura, ou seja, maior temperatura menor resistência). Podem ser acoplados a sistemas de aquisição de dados, utilizados em estações automáticas.

Já o seu cálculo se é obtido através da próxima imagem:

Estações convencionais (INMET)

$$T_{\text{med ar}} = (T_a \text{ 9h} + T_{\text{max}} + T_{\text{min}} + 2 \cdot T_a \text{ 21h}) / 5$$

$$T_{\text{med ar TERMOGRAFO}} = (\sum t_{ai}) / n$$

n = 24 h;  
i = 1 h;

Estações automáticas

$$T_{\text{med ar}} = (\sum t_{ai}) / n$$

n = total de  
observações feitas ao  
longo de 1 dia;

### → Velocidade e direção do vento

Os fatores de macroescala são responsáveis pela formação dos ventos predominantes, enquanto os demais fatores têm influência na formação dos ventos locais.

**A direção do vento** é indicada pela direção de onde o vento é proveniente (de onde ele vem). Pode ser expressa em termos do azimute (ângulo que o vetor da direção forma com o norte geográfico).

Ex: vento de SE terá um ângulo variando entre 91 e 179°.

**Velocidade do vento** expressa a distância percorrida pelo vento em um determinado intervalo de tempo. É medida a 10 m de altura (para fins meteorológicos). Dada em metros por segundos (m/s), quilômetros por hora (km/h) ou knots (kt).

Ex.: 1 kt = 0,514 m/s ou 1 m/s = 1,944 kt

1 m/s = 3,6 km/h ou 1 km/h = 0,278 m/s

A variação da velocidade com altura (z) acima de uma superfície rugosa pode ser representada por uma relação logarítmica (até ~ 100 m de altitude).

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Onde  $z_0$  é a altura onde a velocidade é nula,  $k$  é a constante de Von Karman (0,4) e  $v^*$  é a velocidade de atrito. O equipamento utilizado é o anemômetro.



**Figura 32-** Anemômetro (medidor de velocidade e direção do vento).

**Fonte:** <https://meteoropole.com.br/2017/02/projeto-de-anemometro-de-baixo-custo-ideal-para-feiras-de-ciencia/>.

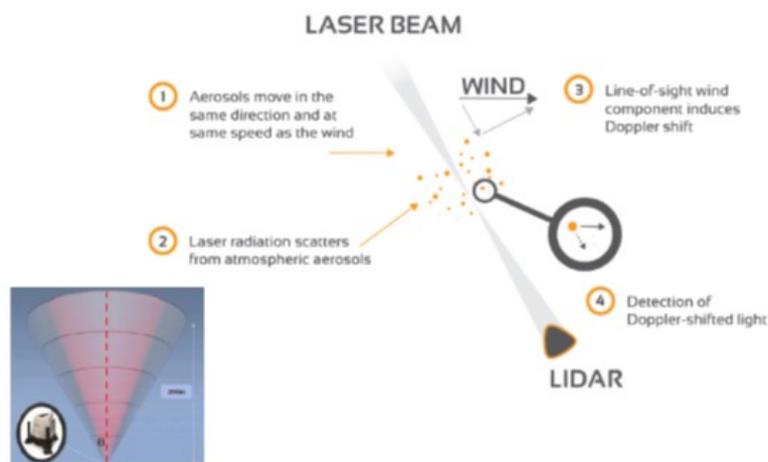
### → **Medição de dados de vento utilizando a tecnologia LIDAR**

Entre os métodos de medição dos ventos disponíveis, a tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*) realiza medições precisas, com resolução vertical adequada, portabilidade e baixos custos, quando comparada a algumas torres anemométricas. O LIDAR é um equipamento de sensoriamento remoto ativo que emite um sinal de laser para medir a velocidade do vento em diferentes níveis.

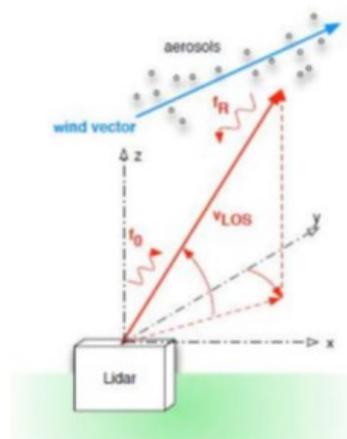
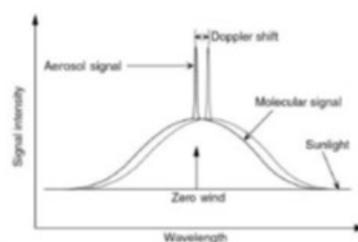
As desvantagens do LIDAR ainda são os altos custos, apesar de os preços estarem menores nos últimos anos. Outra desvantagem é que sobre terrenos heterogêneos, o LIDAR pode realizar medições atenuadas devido à distorção que o vento sofre por causa do terreno, ou seja, o escoamento no cone de varredura do LIDAR é considerado homogêneo (HASAGER et al., 2008).

Os LIDARs de efeito Doppler são principalmente divididos em equipamentos de ondas contínuas e de ondas pulsadas. Os de ondas contínuas emitem o sinal contínuo permitindo obter a velocidade em uma altura pré-definida.

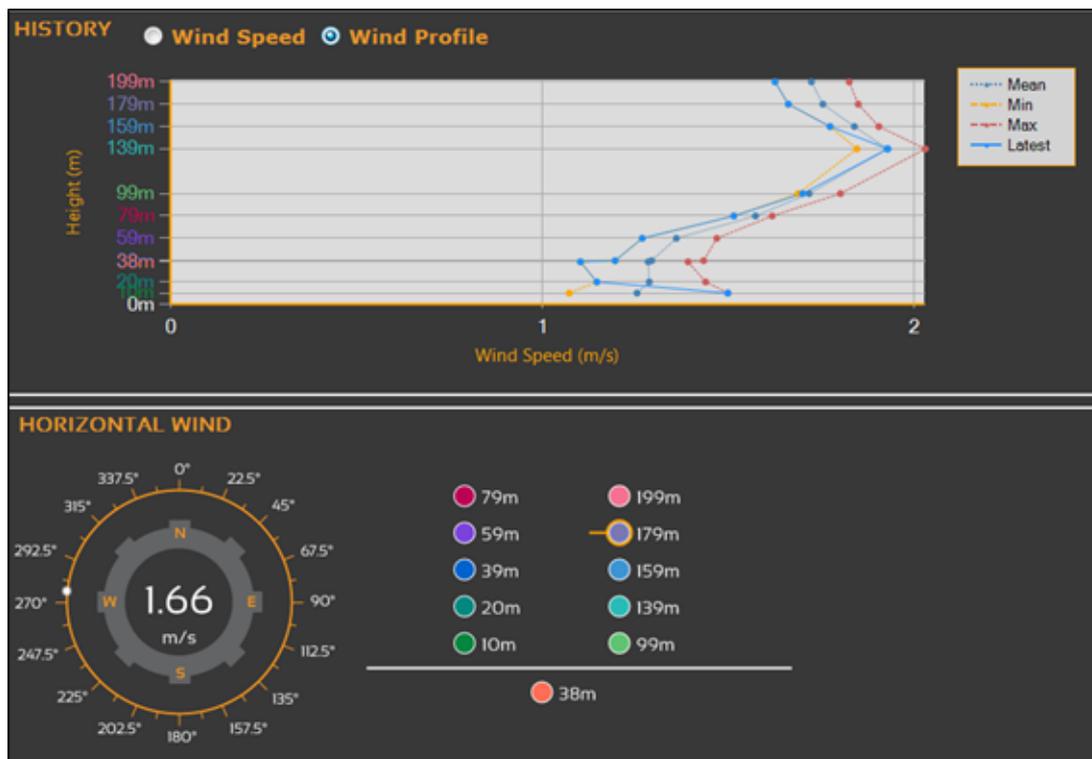
Seu funcionamento é semelhante ao de um telescópio, porém o LIDAR de ondas contínuas foca cada altura separadamente. Enquanto os de ondas pulsadas, emitem os curtos sinais pulsados que medem a velocidade em diversas alturas (NUNES,2012).



- Efeito Doppler  $\Delta f = f_R - f_0$
- Freq. da Luz Emitida ( $f_0$ )  $= -\frac{v_{LoS}}{\lambda}$
- Freq. da Luz Refletida ( $f_R$ )
- Velocidade Radial ou Line of Sight (VLoS)
- Num certo comprimento de onda ( $\lambda$ )



Esquema genérico de um sistema LIDAR de efeito Doppler, emite o sinal na banda infravermelha (1560 nm) e depois capta o sinal retroespalhado pelos aerossóis e partículas transportados pelo vento. Através da diferença entre os sinais emitidos e de retorno, calculam a diferença da frequência dos sinais causada pelo efeito Doppler. Para diferenciação de sinal, o equipamento conserva o sinal de emissão sem interferência. A diferença da frequência é transformada em velocidade (line-of-sight velocity).



**Figura 33-** Tela de visualização do LIDAR Zephir instalado na plataforma de pesca Entremares na Base de observação do oceano e da Atmosfera (BOOA) da UFSC.

## 7.2 Climatologia

O clima influencia diretamente as plantas, os animais (incluindo o homem) e o solo. Influencia as rochas através do intemperismo, enquanto as forças externas que modelam a superfície da Terra são basicamente controladas pelas condições climáticas.

Por outro lado, o clima, particularmente perto da superfície, é influenciado pelos elementos da paisagem, da vegetação e do homem, através de suas várias atividades.

Os processos geomorfológicos, pedológicos e ecológicos, e as formas que eles se originam, só podem ser devidamente compreendidos com referência ao clima predominante na atualidade e no passado.

O clima pode ser definido como um “tempo médio”, ou seja, um conjunto de condições normais que dominam uma região, obtidas das médias das observações durante um certo intervalo de tempo.

Variações e condições extremas do tempo também são importantes para caracterizar uma região. Da mesma forma, o gerenciamento de recursos hídricos exige o conhecimento não apenas de valores médios, mas também de valores extremos e sua probabilidade de ocorrência.

O clima é o conjunto de toda a informação estatística sobre o tempo em determinado local (3 a 4 meses). A longo prazo é o clima que determina se uma região é ou não habitável e sua vegetação natural. Ou seja, o clima é aquilo que esperamos, e o tempo é o que sentimos.

**Fatores do clima:** são elementos que exercem influência sobre o clima de determinada região.

- ❖ **Latitude:** Quanto maior a latitude, menor a média de temperatura anual;
- ❖ **Altitude:** Como o aquecimento do ar é feito por irradiação, em locais mais altos a temperatura é menor;
- ❖ **Relevo:** As montanhas dificultam o deslocamento de massas de ar, influenciando a umidade e o índice pluviométrico da região. Representam barreiras para a chegada de massas de ar úmidas em determinadas regiões, deixando-as mais secas.
- ❖ **Vegetação:** retenção de umidade pelas florestas, principalmente as densas;

- ❖ **Continentalidade/maritimidade:** influência da evaporação da água dos oceanos que atinge o continente, mais intensa nas áreas litorâneas do que nas localizadas no interior;
- ❖ **Atividades humanas:** muito concreto e asfalto... fatores que aumentam a retenção do calor.

A climatologia pode ser dividida em:

**Climatologia Regional:** descrição de área determinadas de escala regional (América do Sul);

**Climatologia Física:** estuda os fenômenos atmosféricos relacionados diretamente com a física e química (processos termodinâmicos, composição e estrutura da atmosfera, propagação da radiação eletromagnética e ondas acústicas através da atmosfera, processos físicos envolvidos na formação de nuvens e precipitação, eletricidade atmosférica, reações físico-químicas dos gases e partículas).

**Climatologia Dinâmica:** trata dos movimentos atmosféricos e sua evolução temporal, mas, ao contrário da Meteorologia Sinótica, sua abordagem é baseada nas leis da Mecânica dos fluidos e da Termodinâmica Clássica. É a base dos atuais modelos atmosféricos de previsão do tempo nos principais centros de previsão dos países desenvolvidos.

**Climatologia aplicada:** enfatiza a aplicação do conhecimento climatológico e dos princípios climatológicos nas soluções de problemas práticos que afetam a humanidade.

\_\_\_\_\_LINKS INTERESSANTES\_\_\_\_\_

<https://portal.inmet.gov.br/>

<https://www.cptec.inpe.br/>

<https://movlidar.paginas.ufsc.br/>

## 8. VENTO

O vento é o ar em movimento. Principalmente relacionado ao deslocamento horizontal de parcelas de ar. Diversas características da atmosfera na troposfera influenciam o vento e serão descritas brevemente. Posteriormente será apresentada a camada limite, os ventos locais e a influência da superfície.

### → LEI DOS GASES IDEAIS

Ar é um fluido altamente compressível. Na atmosfera as camadas inferiores são muito mais densas que as superiores.

$$P = R \cdot \rho \cdot T \rightarrow \rho = P / R \cdot T$$

Sendo, **P** a pressão exercida,  **$\rho$**  a massa específica (densidade), **R** a constante de gás e **T** a temperatura em K.

$$R \text{ ar seco} = 287 \text{ J/K.kg}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2; 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}; 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}; 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ milibar (mb)} = 10^2 \text{ Pa ou } 1 \text{ hPa (leituras feitas com barômetro)}$$

Pressão média ao nível do mar é  $10^5$  Pa ou 1000 mb. E a média global é 1013,25 mb.

$$N_2 = 60 \text{ mb}; O_2 = 240 \text{ m}; H_2O \text{ vapor} = 10 \text{ mb.}$$

A pressão exercida por um gás é proporcional a sua massa específica e a temperatura absoluta. E a massa específica varia inversamente com a temperatura. Assim, um aumento na temperatura causa redução na densidade. Lembrando que na atmosfera o volume de ar varia.

A pressão exercida pelo peso de uma coluna de fluido em equilíbrio é chamada de pressão hidrostática.

Equação da pressão hidrostática:

$$-\int_{p(z)}^{P(\infty)} dp = \int_z^{\infty} g \cdot \rho \cdot dz$$

Sendo Z a altura

P no nível Z é igual ao peso do ar que está acima na coluna vertical (seção reta e área unitária). Ao nível do mar será  $p=0$  e  $Z=0$ . A força vertical resultante sobre a camada devido ao gradiente de pressão é para cima, sendo assim podemos simplificar a equação em:

$$-dp = g \cdot \rho \cdot dz$$

Logo, a pressão variando com a altura será,

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho$$

Considere um cilindro com um líquido até a altura 'h' e um ponto 'B' marcado no fundo de uma área 'A'. O líquido exerce uma pressão no ponto 'B', dada por:

$$Ph = \frac{Plíq}{A}$$

Como  $P=m \cdot g$ , teremos,

$$Ph = \frac{m \cdot g}{A}$$

Como  $d=m/V$ , e  $m=d \cdot V$ , assim teremos,

$$Ph = \frac{d \cdot V \cdot g}{A}$$

Como  $V=A.h$  (volume do cilindro),

$$P_h = \frac{d.A.h.g}{A} = d.h.g \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

Percebe-se que a pressão hidrostática depende da densidade da altura do fluido e do ponto onde ela se encontra. Sendo assim independe do formato do recipiente. Sendo esse recipiente à Terra, quanto mais fundo no oceano maior a pressão hidrostática e quanto maior a altura na atmosfera menor a pressão hidrostática.

#### → **Lei de Boyle**

Em uma temperatura constante, o volume de uma massa de gás varia inversamente a sua pressão.

$$P = \frac{K1}{V}$$

Sendo K1 uma constante.

#### → **Lei de Charles**

Em uma pressão constante, o volume varia diretamente com a temperatura absoluta.

$$P = K2.T$$

Sendo K2 uma constante.

**P,T e V** são variáveis completamente interdependentes. Qualquer mudança em uma dessas propriedades causará uma mudança de compensação nas outras.

Combinando as duas leis,

$$P.V = R.m.T$$

Sendo 'R' a constante para o ar seco.

$$P = \frac{R.m.T}{V} = R.\rho.T$$

Sendo 'm' e 'T' constantes na lei de Boyle; 'm' e 'P' fixos na lei de Charles

$$Ph = P_0.e^{\left(\frac{-m.g.h}{K.T}\right)}$$

Sendo 'h' a diferença de altura e 'K' a constante de Boltzmann.

Percebe-se que a temperatura diminui com a altitude. A pressão varia como resultado da ação da gravidade no fluido. Para um mesmo fluido uma diminuição na altura representa uma coluna de fluido mais alta "pesando" sob determinado ponto. Porém, o ar é um fluido compressível e sua pressão depende da densidade, a qual varia de forma muito mais significativa com a altitude. Na atmosfera uma importante consideração em relação às leis da termodinâmica é que o volume varia, e isso faz toda a diferença na movimentação do ar!

## 8.1. Variação horizontal da pressão atmosférica

→ **Gradiente de temperatura**

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) i + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) j + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) k$$

Componente horizontal do gradiente de temperatura à superfície.

$$\nabla_z T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) i + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) j$$

Nas vizinhanças de um ponto, o gradiente é perpendicular às isotermas e aponta da menor para a maior temperatura.

O transporte de calor se dará no sentido oposto do gradiente de T e será maior quanto mais próximas estiverem os isotermas.

Varição vertical da temperatura:

$$T = -\nabla_{xy}.T = -\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)k$$

Se  $T > 0$ , a temperatura diminui quando a altitude (Z) aumenta (tem sinal próprio).

→ **Gradiente de pressão horizontal**

$$F_{pn} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n}$$
$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial n} \cdot \Delta n$$

A força aponta no sentido negativo de 'n' (distância), ou seja, da alta para a baixa pressão. Sendo a taxa de variação da pressão com a distância 'n'. Então a partir dos gradientes horizontais de pressão temos o movimento ⇒ **VENTO**:

- ❖ Movimento horizontal de parcelas de ar;
- ❖ São manifestações indiretas da energia solar, visto que são produzidos pelas diferenças de aquecimento entre as regiões na superfície da Terra;
- ❖ Apenas uma fração do vento pode ser aproveitado energeticamente com a tecnologia atual. É a fração que está mais próxima da superfície da Terra a uma altura entre 100 a 200 m.

A velocidade do vento varia consideravelmente com a altitude acima da superfície e aumenta com o aumento da altitude, devido aos obstáculos próximos à superfície. A relação entre o perfil de velocidade do vento e a altitude é dado por:

$$U_z = V \cdot \ln\left(\frac{Z - d}{Z_0}\right)$$

Sendo: V= velocidade;

Z= altitude desejada; Z<sub>0</sub>= comprimento da camada rugosa;

d= **plano de zero**, influenciado pelos obstáculos locais;

Para dados coletados a 10m:

$$U_z = U_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{b'}$$

b' = varia com o local para locais abertos 0,14;

Essa equação **não** é tão adequada para transpor altitudes acima de 50 m.

## 8.2 Distribuição de weibull

A função analítica mais adequada para distribuições eólicas é a função de densidade de Weibull, que pode ser determinada por métodos numéricos e regressões lineares.

Os parâmetros da distribuição de weibull serão utilizados nos cálculos de potência anual de um parque, por exemplo, entre outras aplicações.

Para aplicação dessa função estatística é necessária uma sequência metodológica:

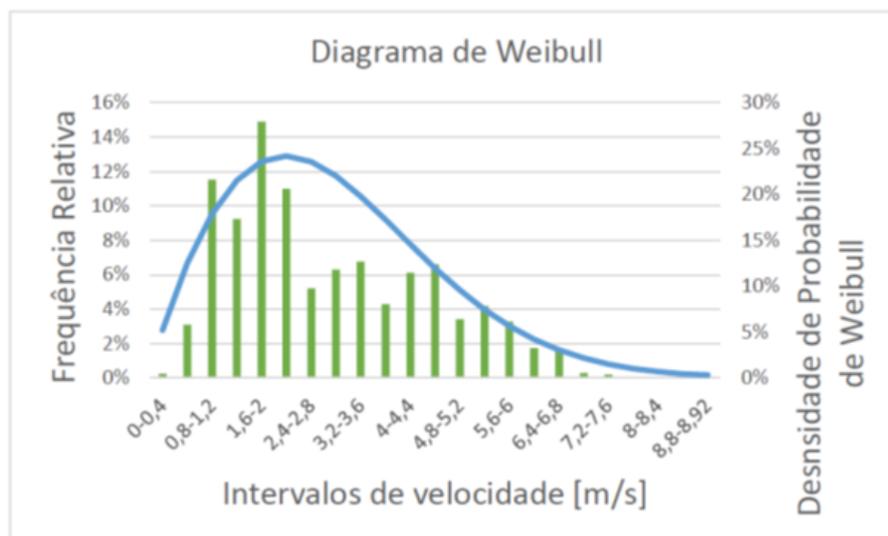
X	Y
$X = \ln(u)$	$Y = \ln[-\ln(1-F(u))]$

- Obtenção de X e Y
- Determinação da equação da reta, para obtenção dos parâmetros k (parâmetro de forma) e c (parâmetro de escala).

$$k=A \text{ e } c=\exp(-B/A)$$

- Cálculo da densidade de probabilidade de weibull

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left[\left(\frac{u}{c}\right)^k\right]\right\} :$$



**O VENTO É UM PROCESSO ESTOCÁSTICO POR SER REFERIDO PELA IMPREVISIBILIDADE.**

### 8.3. Camadas limites

**CPL** (Camada limite planetária) é a camada da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície da Terra, sendo que nela ocorrem diretamente trocas de energia e massa com a superfície.

**CLS** (Camada limite superficial) se caracteriza pela turbulência, estendendo-se por não mais que 100-150 m acima da superfície. Existência de gradientes verticais de temperatura, umidade, velocidade do vento, rugosidade da superfície, reflexão por obstáculos.

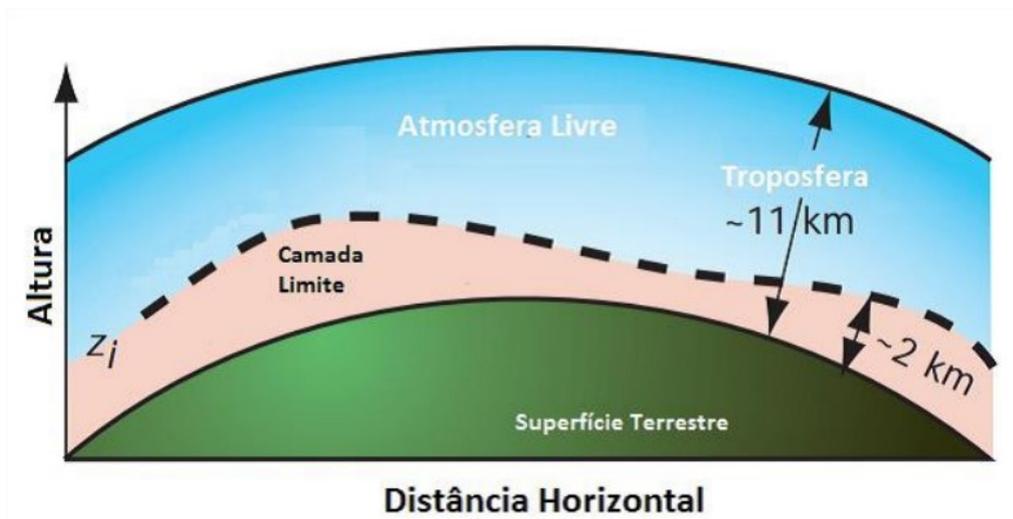


Figura 34- Camada limite.

Fonte: [http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad\\_met/dissertacoes/IllelsonRafaeldaSilvaBarbosa\\_2018.pdf.pdf](http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad_met/dissertacoes/IllelsonRafaeldaSilvaBarbosa_2018.pdf.pdf).

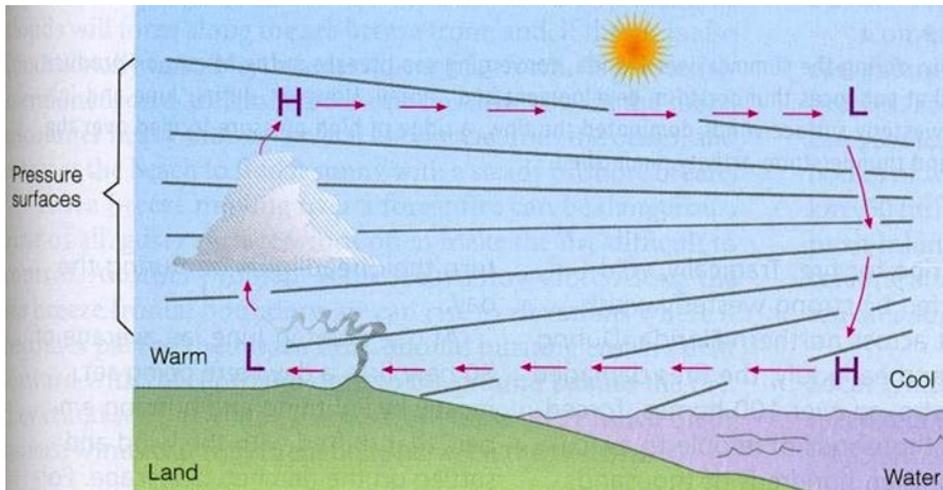
### 8.4 Vento local

Ventos locais variam com influências diurnas pelo aquecimento da superfície, tendendo a possuir menores velocidades de vento próximo do amanhecer e maiores entre as 13 ou 14 horas. Ex.: brisas marinha e terrestre;

Circulação termal: diferenças de temperatura na superfície levam a diferenças de pressão, força gradiente de pressão  $\rightarrow$  movimento.

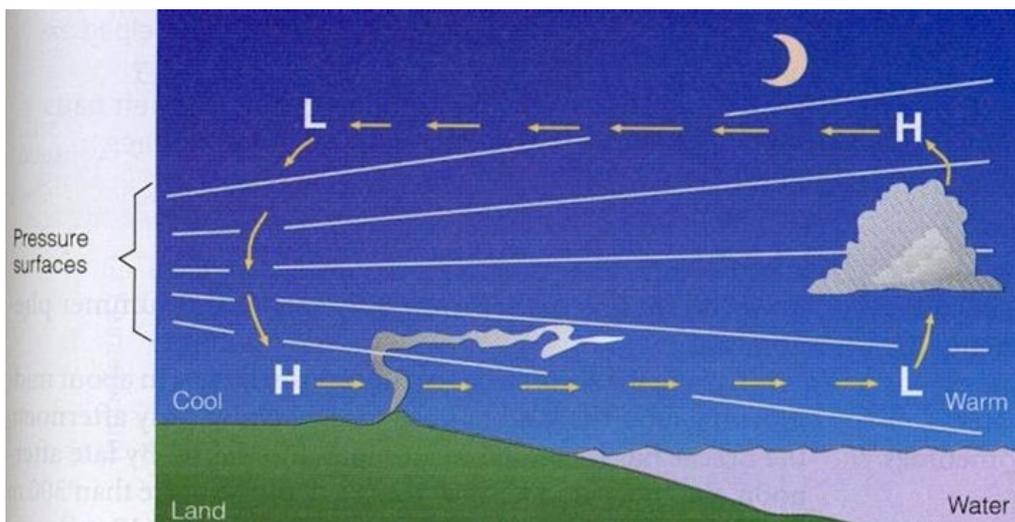
Brisas marinha e terrestre e brisa de vale e montanha, tendem a dominar a circulação local quando os ventos globais são mais fracos.

Brisa Marinha: Durante o dia, a terra aquece mais rapidamente que a água => aquece o ar acima da superfície, baixa pressão sobre o continente, subida de ar (Fugira 35).



**Figura 35-** Brisa marinha.  
**Fonte:** AHRENS, C. Donald. Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere. Cengage Learning, 2014.

Brisa Terrestre: Durante a noite: continente frio => ar flui do continente para o oceano; Nuvens sobre o oceano (Figura 36).



**Figura 36-** Brisa terrestre.  
**Fonte:** AHRENS, C. Donald. Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere. Cengage Learning, 2014.

**Vento resumo:**

- Chama-se vento à componente horizontal do vetor velocidade do ar.
- A caracterização do vento em qualquer ponto da atmosfera requer dois parâmetros: a direção e a velocidade (módulo).
- Ambas são grandezas instantâneas e pontuais pois, o escoamento do ar depende das condições atmosféricas (que variam no espaço e com o tempo).
- Nas proximidades da interface superfície-atmosfera o vento é altamente influenciado pelas características geométricas e pelo estado de aquecimento da própria superfície subjacente.
- Os ventos são denominados a partir da direção de onde eles sopram: Vento NORTE (vem do norte) – sopra de N para S;

LINKS INTERESSANTES

---

<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/aaciih.pdf>

<http://www.bertolo.pro.br/FinEst/Estatistica/DistribuicaoProbabilidades/weibhlp.htm>

## 9. ENERGIA E POTÊNCIA NO VENTO

### O que precisa para funcionar?

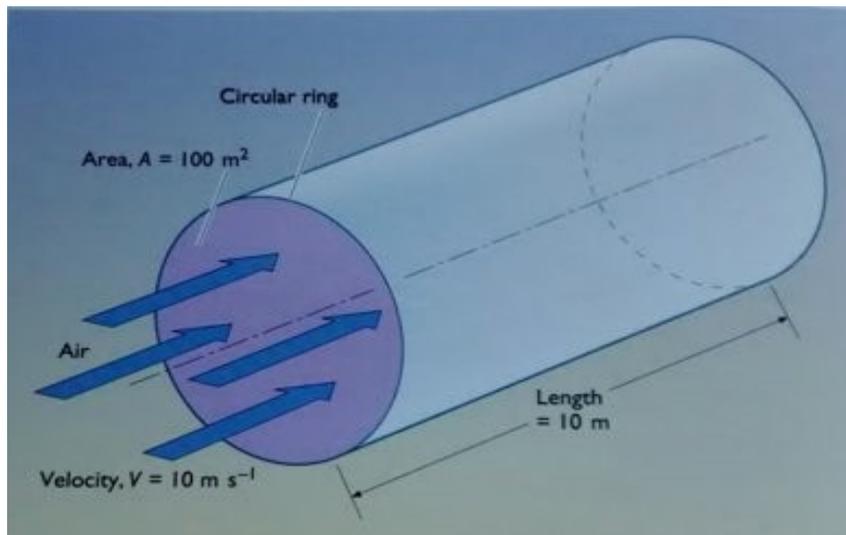
- Quando se trata de turbinas eólicas, a localização é tudo
  - Saber quanto vento existe em uma área,
  - Qual sua velocidade ...
  - Qual é sua duração ....

São fatores decisivos fundamentais para a construção de uma fazenda eólica eficiente!!

**A energia contida no vento é a energia do movimento, que é a energia cinética.**

$$E_c = (m * V^2) * 1/2 [J]$$

Sendo, a massa (**m**) em quilogramas e a velocidade (**V**) em metros por segundo, se pode calcular a energia cinética (**E<sub>c</sub>**) do vento através de uma seção cilíndrica a seguir:



Exemplo: Área (**A**) = 100m<sup>2</sup>

Densidade (**ρ**) = 1,2256 kg\*m<sup>-3</sup>

Velocidade (**V**) = 10m\*s<sup>-1</sup> Comprimento (**L**) = 10m

Velocidade do ar por segundo na seção ( $v'$ ) = 1000m<sup>3</sup>

$$m = L * \rho * A = 1225,6 \text{ kg}$$

$$E_c = (m * V^2) * 1/2 = 61280J$$

### 9.1. Potência do vento

$$P_e = 0,5 * A * \rho * V^3 [W]$$

- ❖ A energia do vento é **proporcional**: densidade do ar, área onde o vento está passando e o cubo da velocidade;
- ❖  $\rho$  do ar é **variável**, já a área (**A**) da turbina é constante;

A **energia contida** no **vento** não é na prática a energia que será extraída pela turbina, é preciso **incluir** as **perdas** pelos processos de **conversão**.

**Ec** é definida por:

$$E_c = (m * V^2) * 1/2 [J]$$

Considerando a mesma massa de ar '**m**' em movimento a uma velocidade '**V**', perpendicular a uma seção transversal de um cilindro, a potência disponível no vento que passa pela seção **A**, transversal ao fluxo de ar, é dada por:

$$P = (\rho * A * V^3) * 1/2 [W]$$

onde:

**P** = Potência disponível no vento [ $\square$ ];

$\square$  = Massa específica do ar [ $\square * \square^{-3}$ ];

**A** = Área da seção transversal [ $\square^2$ ];

**V** = Velocidade do vento [ $\square * \square^{-1}$ ];

A expressão acima também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência  $\square\square$ :

$$DP = P/A = (\rho * V^3) * 1/2 [W * m^{-2}]$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica mediante a rotação das pás.

A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência  $\square\square$ , que é definido como a fração da potência eólica disponível extraída pelas pás do rotor.

## 9.2. Tipos de turbinas de vento

Existe uma grande variedade de máquinas para o aproveitamento da energia do vento.

- ❖ **Eixo Horizontal:** eixo de rotação alinhado com a direção do vento;
- ❖ **Eixo vertical:** eixo de rotação perpendicular à direção do vento.

### → Turbinas de eixo horizontal

Podem ter 2 ou 3 pás, mas também podem ter múltiplas pás. Tem um uso mais doméstico (fazendas). As turbinas mais comuns atualmente têm design que evolui dos moinhos de vento e da aerodinâmica das aeronaves. Tendo uma aparência leve.



**Figura 37 e 38-** Turbina de eixo horizontal.

**Fonte:** <https://www.archiexpo.com/pt/prod/tozzi-green/product-62400-1822149.html>.

**Fonte:** <https://br.pinterest.com/ferrazematos7301/energia-e%C3%B3lica/>.

### → Turbinas de eixo vertical

Podem aproveitar o vento em qualquer direção sem necessidade de redirecionar o rotor. Apesar disso, eles têm obtido pouco sucesso comercialmente devido a qualidade de potência e menor eficiência.



**Figura 39 e 40 -** Turbina de eixo vertical.

**Fonte:** [https://app.eventize.com.br/upload/000388/files/3\\_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf](https://app.eventize.com.br/upload/000388/files/3_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf).

**Fonte:** <https://oakenergia.com.br/blog/turbinas-eolicas/>.

### 9.2.1. Componentes de uma turbina eólica

- |   |  |
|---|--|
| 1. Controlador do Cubo                        | 11. Transformador de alta tensão         |
| 2. Controle pitch                             | 12. Pás                                  |
| 3. Fixação das pás no cubo                    | 13. Rolamento das pás                    |
| 4. Eixo principal                             | 14. Sistema de trava do rotor            |
| 5. Aquecedor de óleo                          | 15. Sistema hidráulico                   |
| 6. Caixa multiplicadora                       | 16. Plataforma da nacelle                |
| 7. Sistema de freios                          | 17. Motores de posicionamento da nacelle |
| 8. Plataforma de serviços                     | 18. Luva de acoplamento                  |
| 9. Controladores e Inversores                 | 19. Gerador                              |
| 10. Sensores de direção e velocidade do vento | 20. Aquecimento de ar                    |

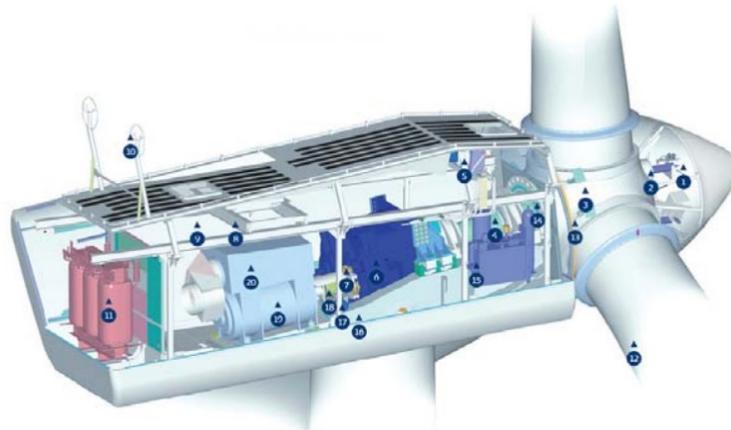


Figura 41 - Componentes de uma turbina eólica.

Fonte: [https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf).

### 9.3. Efeito do número de pás

→ 3 pás

A relação entre a velocidade de rotação (rpm) e a velocidade angular  $\Omega$  ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) é dado por:  $1 \text{ rpm} = 2\pi/60 \text{ rad/s} = 0,10472$

$$A = (\pi * D^2)/4 [m^2]$$

A **velocidade tangencial (U)** (na ponta do rotor) e a **velocidade no final percentual ( $\lambda$ )** (da pá), são dadas por, respectivamente:

$$U = R * \Omega [m * s^{-1}]$$

$$\lambda = U/V$$

A **eficiência aerodinâmica** de uma **turbina de vento** é descrita como: coeficiente de potência (**Cp**). O Cp é a **porcentagem de potência** obtido na saída da turbina pelo potencial teórico do vento. (Limite de Betz)

$$Cp = 1 \rightarrow \text{equivale a 100\%}$$

Coeficiente de potência Cp e sua relação com o fator de interferência (a) que varia  $0 < a < 0,5$  é dado por:

$$Cp = 4 * a * (1 - a)^2$$

onde

$$a = 1 - (u1/u0)$$

A potência de de saída da turbina eólica também é dependente do Cp

$$P_{saída} = (Cp * \rho * A * V^3) * 1/2 [W]$$

Curvas de **Cp - λ**, mostram-se efetivas para verificar a performance do rotor e comparar turbinas com diferentes características.

Uma turbina de vento pode operar em uma variedade de velocidades finais percentuais (**λ**), porém operam com sua eficiência máxima em determinada **λ**. (Ex. quando a velocidade de cada pá é múltipla da velocidade do vento?)

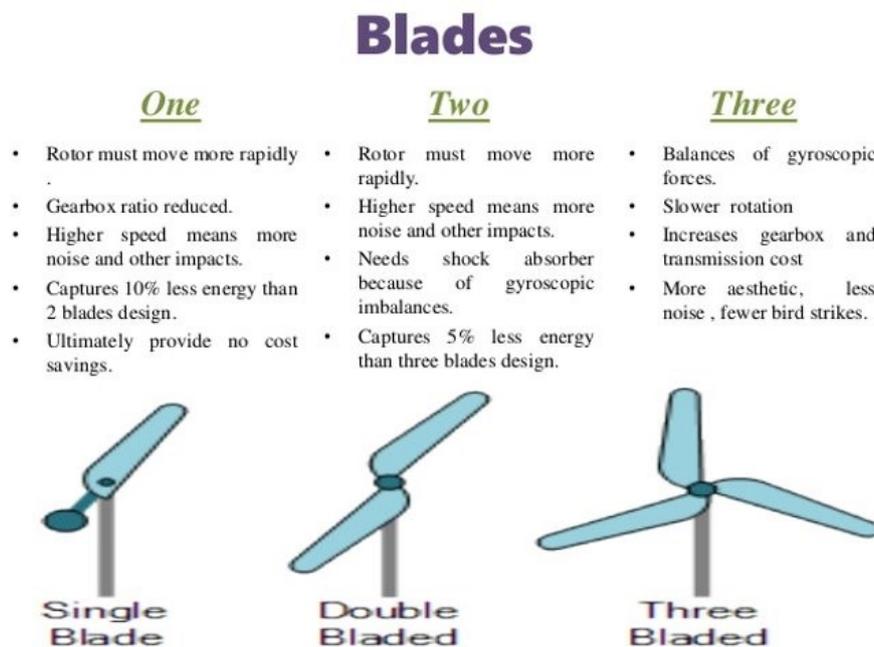
- ❖  $\lambda_{max}$  tem um correspondente em eficiência  $Cp_{max}$ ;
- ❖  $\lambda_{max}$  para uma turbina depende do número de pás e do comprimento de cada pá.

Para **extrair energia** de forma mais **eficiente** possível, as pás têm que **interagir o máximo** possível **com o vento** passando através da área do rotor.

Turbinas de múltiplas pás interagem com todo o vento em velocidades finais percentuais bastante baixas. Enquanto que as turbinas de 2 ou 3 pás viajam muito mais rápido para “preencher” toda área do rotor de forma a interagir com todo vento que passa através dela.

Se  $\lambda$  é muito baixa, algum vento pode passar através da área do rotor **sem interagir com as pás**, enquanto que  $\lambda$  for muito alto, a turbina **oferece muita resistência** ao vento e parte do vento pode ir para outro lugar.

Em teoria, quanto mais pás uma turbina tem, mais eficiente ela é, no entanto, quando há um grande número de pás no rotor, o escoamento se torna mais distorcido, então elas interferem aerodinamicamente uma na outra. **Por isso, as turbinas de múltiplas pás tendem a ser menos eficientes.**



**Figura 42** - Componentes de uma turbina eólica.

Fonte: [http://www.mmmut.ac.in/News\\_content/01345dep-notice\\_04242021.pdf](http://www.mmmut.ac.in/News_content/01345dep-notice_04242021.pdf).

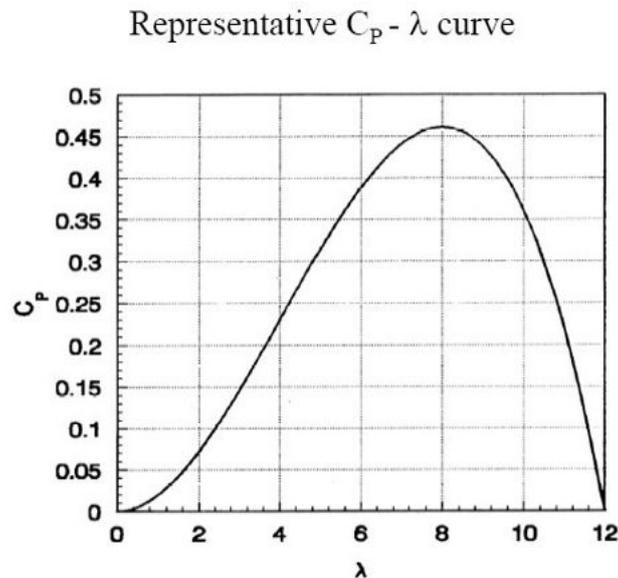
A potência mecânica extraída por uma turbina do vento é produto da sua velocidade angular ( $\Omega$ ) e do **torque**. Torque é o momento sobre o centro de rotação devido a força imposta pelo vento nas pás. Para uma certa quantidade de potência, quanto menor a velocidade angular, maior o torque; ou quanto maior a velocidade angular, menor o torque.

Por isso as turbinas para bombear água, tem múltiplas pás, pois precisam de alto torque para funcionarem.

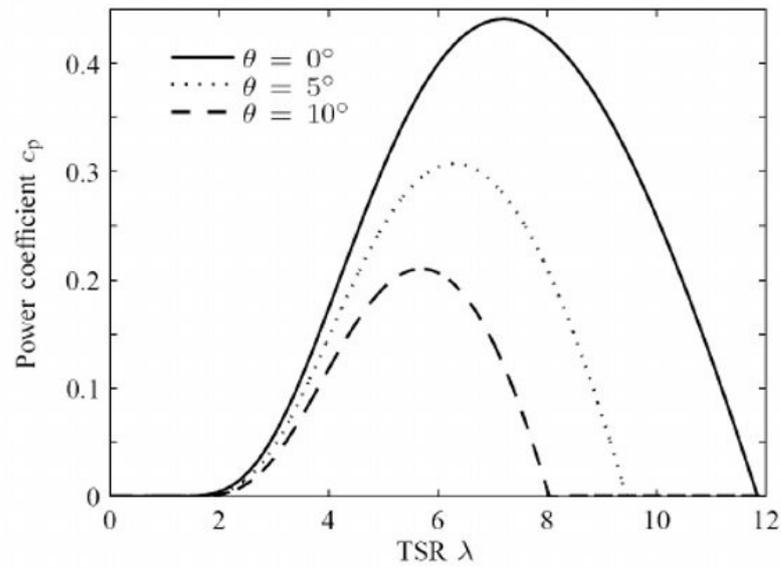
Geradores convencionais funcionam a velocidades muitas vezes maiores que a maior parte dos geradores de vento. Dessa forma, eles combinam melhor com turbinas eólicas de 2 ou 3 pás as quais operam com maiores velocidades finais percentuais  $\lambda$ , favorecendo o acoplamento dos sistemas.

→ **Curva de performance: 3 pás**

Observa-se que o máximo coeficiente de potência fica abaixo do limite de betz. Nenhum design de turbina conseguiu superar, não por deficiência no design em si, mas porque o fluxo de ar se expande após a atuação da turbina, e essa expansão leva a perdas.



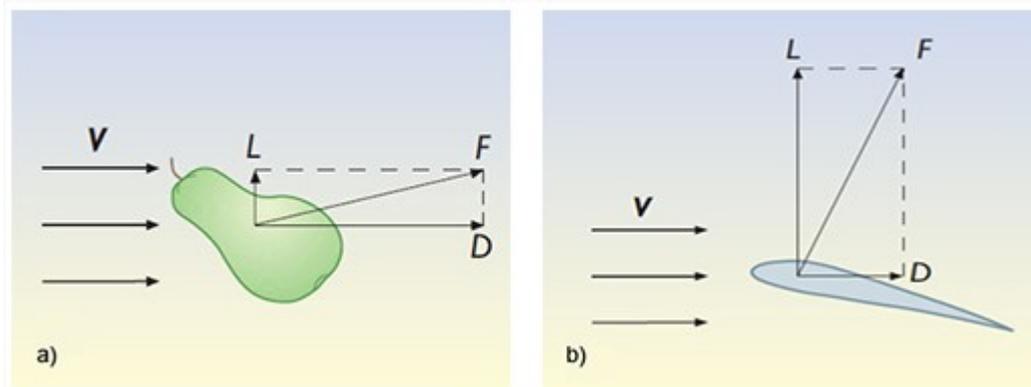
As curvas de  $C_p - \lambda$  mostram-se efetivas para verificar a performance do rotor e comparar turbinas com diferentes características..



#### 9.4. Aerodinâmicas das turbinas eólicas

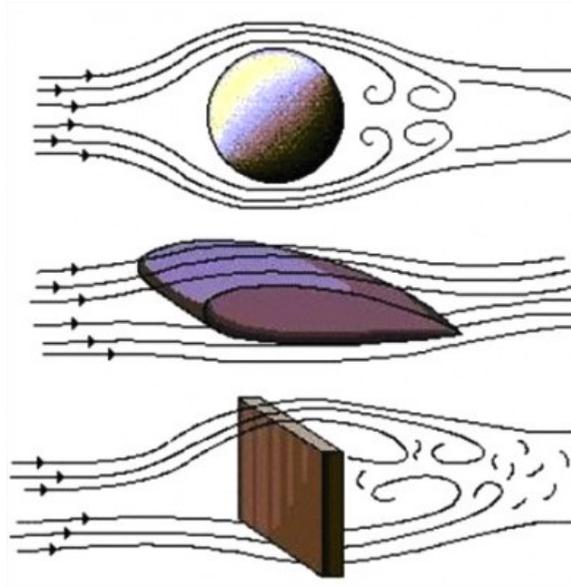
##### → Forças aerodinâmicas

As turbinas eólicas operam em fluido (ar), a transferência de força ocorre de forma diferenciada do fluido para o sólido, e é preciso considerar duas forças do campo aerodinâmicas: o arrasto (**DRAG**) e a sustentação (**LIFT**) ou elevação.



**Figura 43** - Exemplo de forças aerodinâmicas em um corpo.

**Fonte:** [https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=79919&extra=thumbnailfigure\\_idm46597342824496](https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=79919&extra=thumbnailfigure_idm46597342824496).



**Figura 44** - Fluxo em corpos diferentes.

**Fonte:** <https://www.sarthaks.com/950289/write-short-note-term-drag-explain-why-objects-moving-fluids-should-have-streamlined-shape>.

**A FORÇA DE ARRASTO É A COMPONENTE PARALELA ALINHADA À DIREÇÃO DO FLUXO DE AR.**

A força de sustentação é a componente que está em ângulo reto (perpendicular) com a direção do fluxo de ar. O termo “LIFT” vem do fato de ser a força responsável pela decolagem e elevação das aeronaves.

A **pequenos** ângulos relativos a direção do fluxo de vento (ângulo de **ataque**) se obtém em região de baixa pressão a qual impulsiona a “força de sustentação” (Efeito de Bernoulli). Existem diferentes tipos de aerofólios que respondem com diferentes coeficientes de arrasto e sustentação. Cada um tem uma curva de relação L/D em função do ângulo de ataque. As forças de L e D são ambas proporcionais à energia do vento.

→ **Força de Arrasto (lei de Stokes)**

$$D \text{ (drag) ou } FD = 3 * \pi * \mu * V * d [N]$$

$\mu$  = viscosidade do fluido;

$V$  = velocidade do fluxo;

$d$  = diâmetro.

Em um fluido real, quando a viscosidade é baixa e a velocidade é relativamente alta, a força de arrasto existe e é devida primariamente a distribuição assimétrica da pressão, antes e depois do cilindro (do corpo).

Arrasto/ pressão dinâmica\*área frontal

$$Cd = 2 * FD / (\rho * A * V^2)$$

→ **Força de Sustentação**

$$L (lift) = 2 * \pi * \rho * \Omega * V [N]$$

$\Omega$  = velocidade rotacional;

$V$  = velocidade do fluxo;

$\rho$  = densidade.

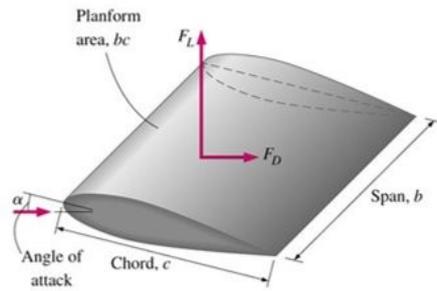
A elevação em um corpo imerso é definida como a força na direção normal à direção do escoamento. A sustentação só estará presente se o fluxo incorporar o escoamento circulatório sobre o corpo em rotação.

Sustentação/ pressão dinâmica\*área frontal

$$CL = L * 2 / (\rho * A * V^2)$$

ou

$$CL = 2 * \pi * Sen(\alpha) * (\alpha - \text{ângulo de ataque})$$



- Lift is the net force (due to pressure and viscous forces) perpendicular to flow direction.

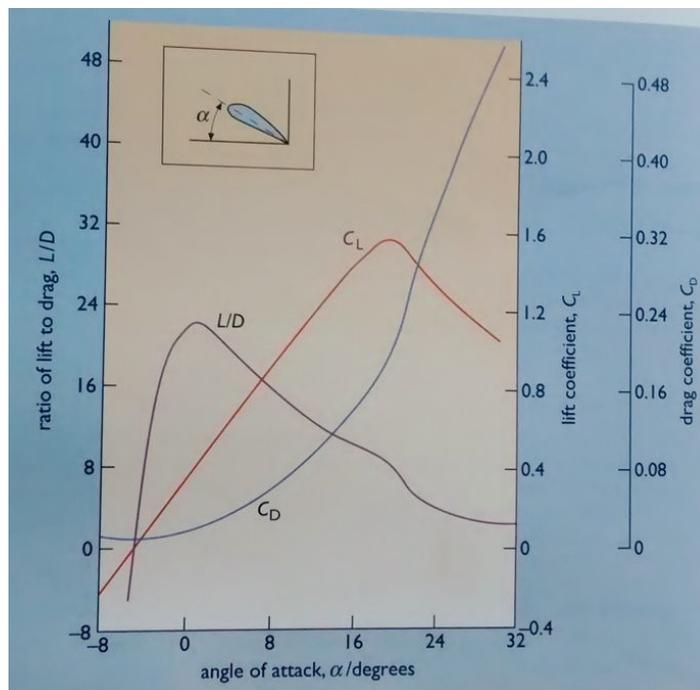
- Lift coefficient

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

- $A=bc$  is the planform area

**Figura 45** - Força de sustentação em um corpo.

Fonte: <https://slidetodoc.com/chapter-11-flow-over-bodies-lift-and-drag/>.



**Figura 46** - Exemplo de comportamento dos coeficientes de arrasto e sustentação..

Fonte: Boyle, 2012.

Agora iremos explicar essas três equações:

**Potência extraída do vento**

$$P = 1/2 \rho A V^3$$

**Potência Máxima Aproveitada (Teórica)**

$$P = C_p 1/2 \rho A V^3$$

Máxima potência teórica aproveitável:  
 $C_p = 16/27$  aprox. 0.59

**Potência Máxima Aproveitada (Real)**

$$P = \eta C_p 1/2 \rho A V^3$$

Eficiência da Máquina Eólica:  $\eta$

Figura 47 - Expressão para cálculo da potência do vento.

Fonte: <https://pt.quora.com/Como-surgem-os-ventos>.

→ **Potência extraída do vento**

A primeira fórmula de potência se refere ao que está disponível no recurso eólico natural, ou seja, o vento.

$$P = (\rho * A * V^3) * 1/2$$

→ **Potência máxima aproveitada (teórico)**

A segunda equação considera um valor teórico, o limite de betz

$$P = C_p * (\rho * A * V^3) * 1/2$$

→ **Potência máxima aproveitada (Real)**

Esta última calcula a potência com base na eficiência da máquina, sendo que este valor é dado pelo fornecedor.

$$P = \eta * C_p * (\rho * A * V^3) * 1/2$$

## 9.5. Curva de potência

Cada turbina possui uma curva de potência característica que é influenciada por:

- ❖ Área do rotor;
- ❖ Escolha do aerofólio;
- ❖ Número de pás;
- ❖ Forma da pá;
- ❖  $\lambda_{\max}$ ;
- ❖ Velocidade de rotação;
- ❖ Velocidade de corte do vento (gera energia);
- ❖ Velocidade corte (quando para);
- ❖ Coeficiente de potência (eficiência aerodinâmica);
- ❖ Eficiência de geração e eficiência do gerador.

O coeficiente de potência (**Cp**), relaciona a potência fornecida pelo rotor (**potência extraída**) com a potência disponível (**densidade de potência**).

Coeficiente real

$$Cp = 2 * \tau * \Omega / (\rho * A * V^3)$$

onde:

$\tau$  = Torque;

$\Omega$  = Velocidade rotacional;

$(\rho * A * V^3)^{1/2}$  = Potência teórica.

**O MÁXIMO (LIMITE DE BETZ) = 0,593 SERÁ DESCRITO A SEGUIR**

## 9.6. Limite de Betz

A lei de Betz calcula a **potência máxima** que pode ser **extraída** a partir do vento, independentemente da concepção de uma turbina.

A lei é derivada dos princípios de conservação de massa e dinâmica do fluxo de ar que passa através de um "disco atuador" que extrai a energia do fluxo de vento.

Há um máximo de potência que uma turbina eólica pode extrair do vento.

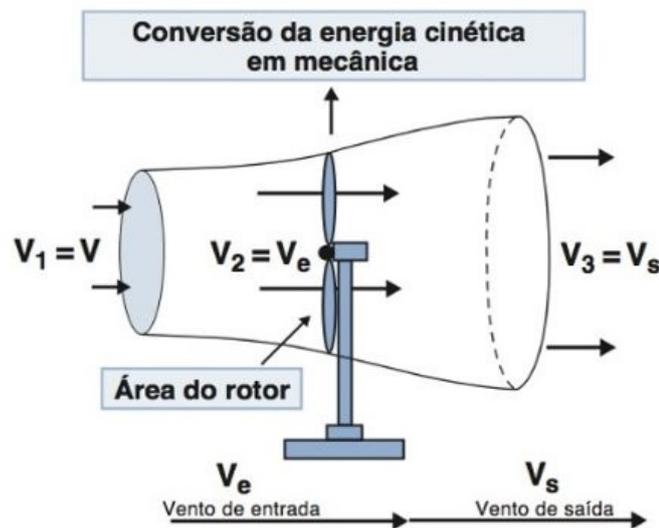
De acordo com a lei de Betz, nenhuma turbina pode capturar mais do que **59,3%** da energia cinética do vento (BURTON et al., 2001).

O vento que deixa a turbina tem velocidade e pressão reduzidas, fazendo com que o ar atrás da turbina se expanda. Observa-se que a turbina não extrai toda a energia cinética contida no vento.

O ponto de partida para demonstração da eficiência de uma turbina é a equação da continuidade de Bernoulli...

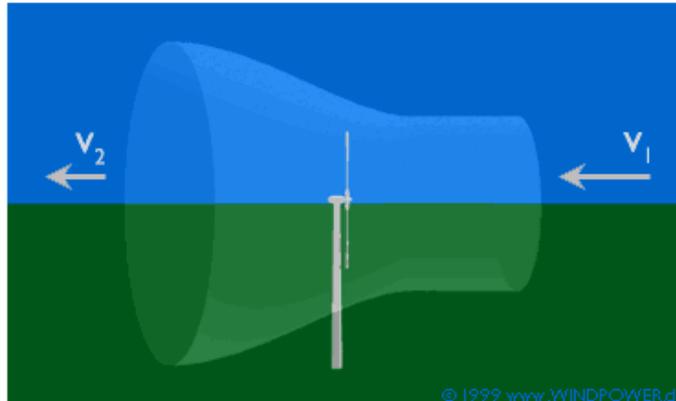
O limite de Betz parte de uma suposição: na entrada da turbina o fluxo de velocidade,  $V_2$ , é a média das velocidades de entrada e saída:

$$V_2 = (V_1 + V_3)/2 [m * s^{-1}]$$



Extração da energia do vento por uma turbina eólica. Observa-se que apenas uma parte da energia do vento é extraída. PINTO, 2013.

### Teorema de Betz



Windpower.dk, 1998

→ **Lei da continuidade de fluxo**

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 = \text{mar/s (Fluxo de massa)}$$

sendo, A = área do rotor.

→ **Potência eólica**

$$P_{eol} = (\text{mar/s} * V^2) * 1/2 [W]$$

Usando a lei de conservação de momento

$$F = \text{mar/s}(V_1 - V_2) [N]$$

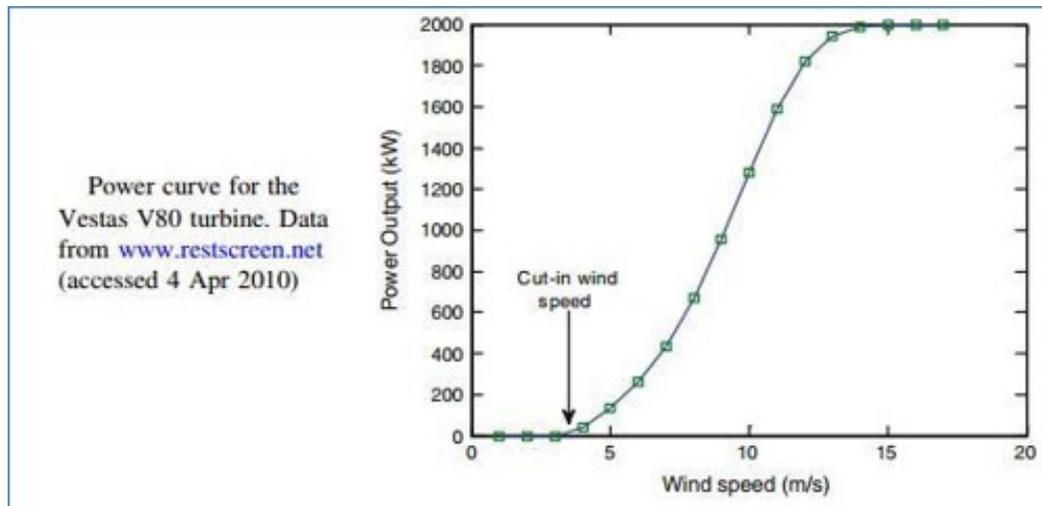
Podemos escrever a potência mecânica extraída pelo rotor como?

$$P_m = \{\text{mar/s} * (V_1^2 - V_2^2)\} * 1/2 [W]$$

onde,  $V_1 > V > V_2$

## 9.7. Quanta energia uma turbina eólica irá produzir?

Isso depende principalmente da curva de potência, velocidade do vento, frequência da velocidade do vento.



**Figura 48.** Exemplo de comportamento de curva de potência, destaque para o ponto da velocidade de início da geração (cut-in).

Distribuição de energia do vento obtida através da multiplicação do número de horas de duração de cada intervalo de velocidade do vento (obtida na curva de potência). A média anual de velocidade do vento pode ser utilizada para uma estimativa inicial da produção de eletricidade em KWh/ano.

$$P.e. \text{ anual} = K * A_t * T * V_m^3 \text{ [KWh/ano]}$$

K= parâmetro de forma (vem da distribuição de weibull da conjunto dos dados de vento de cada local específico, para mais detalhes ler artigos sobre a distribuição de weibull aplicada a energia eólica).

$V_m$  = velocidade média anual;

$A_t$  = área da turbina;

T = número de turbinas;

$$V = V_o * (H/H_o)^n \text{ [m * s}^{-1}\text{]}$$

V = Velocidade do vento na altura desejada;

Vo = velocidade vento na altura conhecida;

H = altura desejada;

Ho = altura conhecida;

n = rugosidade do vento.

### → Fator de capacidade (Fc)

É a porção do ano em que o gerador está operando no pico de potência.

$$Fc = \text{Saída média} / \text{pico de saída}$$

Baseado na característica da turbina e na característica do local (quantos % do ano a turbina irá operar com seu máximo real de potência). Valor típico de 30 a 40% (0,3 a 0,4). O fator de capacidade é bem abaixo da potência nominal entre 30 a 40%.

**Abaixo de 30% inviabiliza o parque.**

### → Rendimento

A potência eólica convertida em eletricidade também depende do rendimento ou eficiência da máquina eólica ( $\eta$ ), sendo que os rendimentos são fornecidos pelo fabricante:

$$\eta = \eta_B * \eta_A * \eta_M * \eta_G$$

$\eta_B$  = eficiência teórica;

$\eta_A$  = rendimento aerodinâmico das pás;

$\eta_M$  = rendimento do multiplicador de velocidade;

$\eta_G$  = rendimento do gerador.

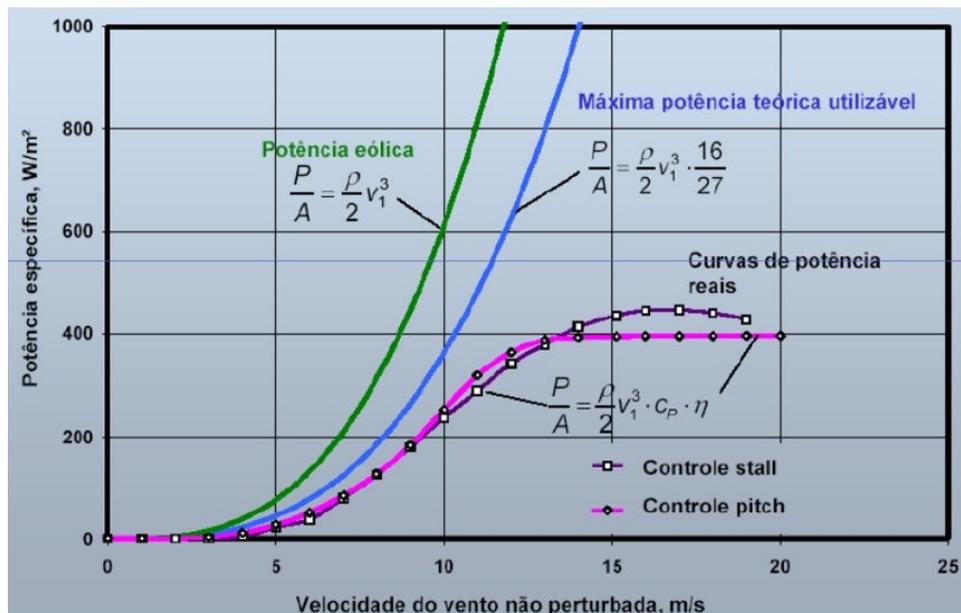


Figura 49 - Exemplo de comportamento das diferentes curvas de potência e suas equações.

Observando o gráfico podemos concluir que existe uma diferença entre o valor de **potência eólica** e a **máxima potência teórica utilizável**, porém ambas continuariam tendendo para o infinito. Agora quando adicionamos as limitações do nosso equipamento vemos que chega a um ponto, não importa o quanto aumentarmos a velocidade do vento, a potência se estagna.

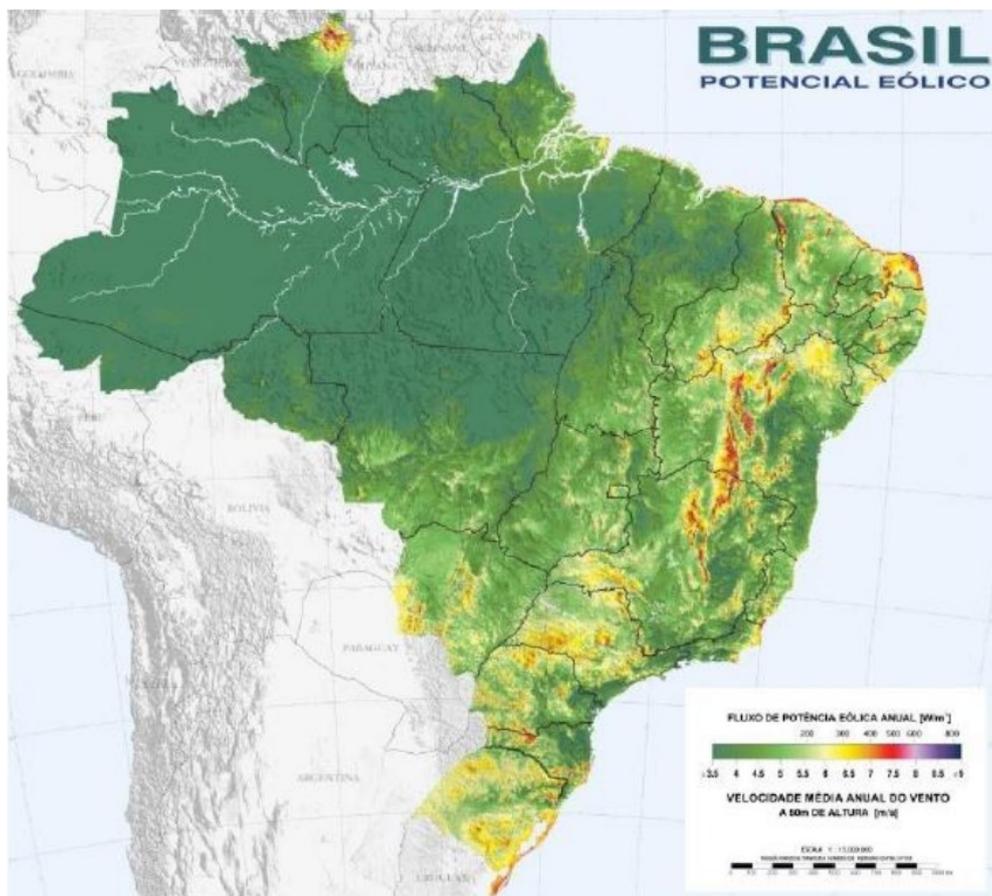
---

LINKS INTERESSANTES

<https://www.scielo.br/j/eagri/a/4P6ZsjpTXrzP4tLDvSMTyHw/?lang=pt>

## 10. Eólica *Onshore* (continental)

Em 2001, foi publicado o **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** identificando regiões do território brasileiro de grande potencial para o uso de energia eólica. A maior parte desse potencial eólico está localizada nas regiões nordeste, sudeste e sul (Silva et al., 2005). Outro aspecto observado no Atlas Eólico é a predominância dos ventos favoráveis nas regiões costeiras onde se encontra a maior densidade de linhas de transmissão em função da proximidade de grandes centros urbanos e que aliado à densa malha viária local repercute favoravelmente para redução do custo dos projetos eólicos.



**Figura 50-** Mapa do potencial eólico brasileiro.  
**Fonte:** Amarante et al. (2001).

Desde então foram divulgados estudos mais atuais sobre o potencial eólico, porém ao nível estadual e seguindo cada qual seu conjunto de restrições, modelos e premissas, refletido o potencial à sua época de edição em locais com velocidade acima de 7 m/s. Os resultados indicam que o Brasil possui um enorme potencial eólico onshore a ser explorado no horizonte de estudo do PNE.

Estados	Data da Publicação	Potência Instalável (MW)			Energia Anual (GWh)		
	Altura	75m 80m* 70m**	100m	150m 140m*	75m 80m* 70m**	100m	150m 140m*
Alagoas	2008	336	649	n.d.	822	1.340	n.d.
Bahia	2013	38.600*	70.100	195.200	150.400*	273.500	766.500
Ceará	2019	23.144*	41.770	94.274	82.660*	153.065	362.162
Espírito Santo	2009	448	1.143	n.d.	1.073	2.397	n.d.
Minas Gerais	2010	24.742	39.043	n.d.	57.812	92.076	n.d.
Paraíba	2017	6.000**	14.700	42.100	23.690**	58.770	167.880
Paraná	2007	1.363	3.375	n.d.	3.756	9.386	n.d.
Pernambuco	2017	6.600*	10.725	20.830*	25.775*	42.100	84.159*
Rio de Janeiro	2002	1.524	2.813	n.d.	4.835	8.872	n.d.
Rio Grande do Norte	2003	19.431	27.080	n.d.	55.901	69.293	n.d.
Rio Grande do Sul	2014	n.d.	102.800	245.300	n.d.	382.000	911.000
São Paulo	2012	15	564	n.d.	48	1.753	n.d.
<b>Total dos Atlas</b>		<b>122.203</b>	<b>314.762</b>	<b>597.704</b>	<b>406.772</b>	<b>1.094.552</b>	<b>2.291.701</b>

**Figura 51** - Potencial eólico dos atlas estaduais.

**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-523/05.02%20Energia%20Eolica.pdf>.

## → O nascimento da eólica no Brasil

Em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, entrou em operação o primeiro aerogerador instalado no Brasil, resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), com financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter.

Durante os dez anos seguintes, a energia eólica pouco cresceu, em parte pela falta de políticas, mas principalmente pelo alto custo da tecnologia.

Durante a crise energética de 2001, houve a tentativa de incentivar a contratação de empreendimentos de geração de energia eólica no país. Criou-se então, o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA).

→ **Proeólica**

Objetiva a contratação de 1.050 MW de projetos de energia eólica até dezembro de 2003. Esse programa, no entanto, não obteve resultados e foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA.

→ **PROINFA**

Tem o objetivo de incentivar o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética. Abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no Brasil com exigências de conteúdo nacional para os aerogeradores fruto desse programa.

No final de 2009, ocorreu o primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica. Este leilão, denominado Leilão de Energia de Reserva (LER), foi um sucesso com a contratação de 1,8 GW e abriu portas para novos leilões que ocorreram nos anos seguintes. O 2º LER ocorreu em dezembro de 2009 e contratou usinas eólicas com início do suprimento em 2012 e cujo prazo dos contratos era de 20 anos.

No ano de 2014, a contratação foi de 2,25 GW, também em três leilões: um A-3 (1º LER), o 3º LER e um A-5 (2º LER). Em 2015, o montante total de energia eólica contratado no 3º LFA, 22º LER (A-3) e 8º LER foi de 1,2 GW.

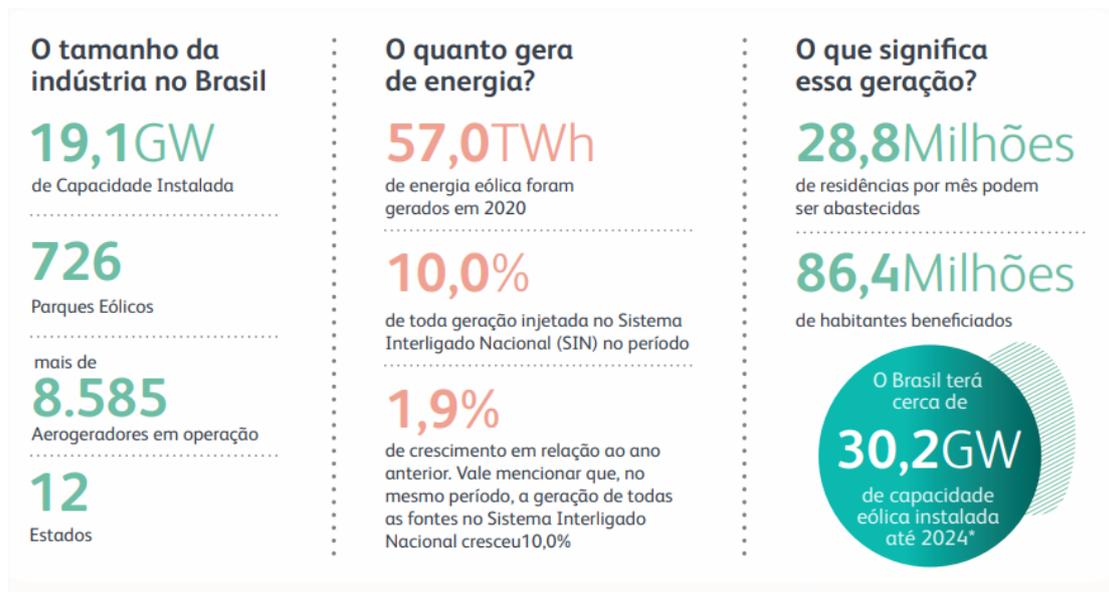


Figura 52- Infovento 21.

Fonte: [http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021\\_06\\_InfoVento21.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021_06_InfoVento21.pdf).

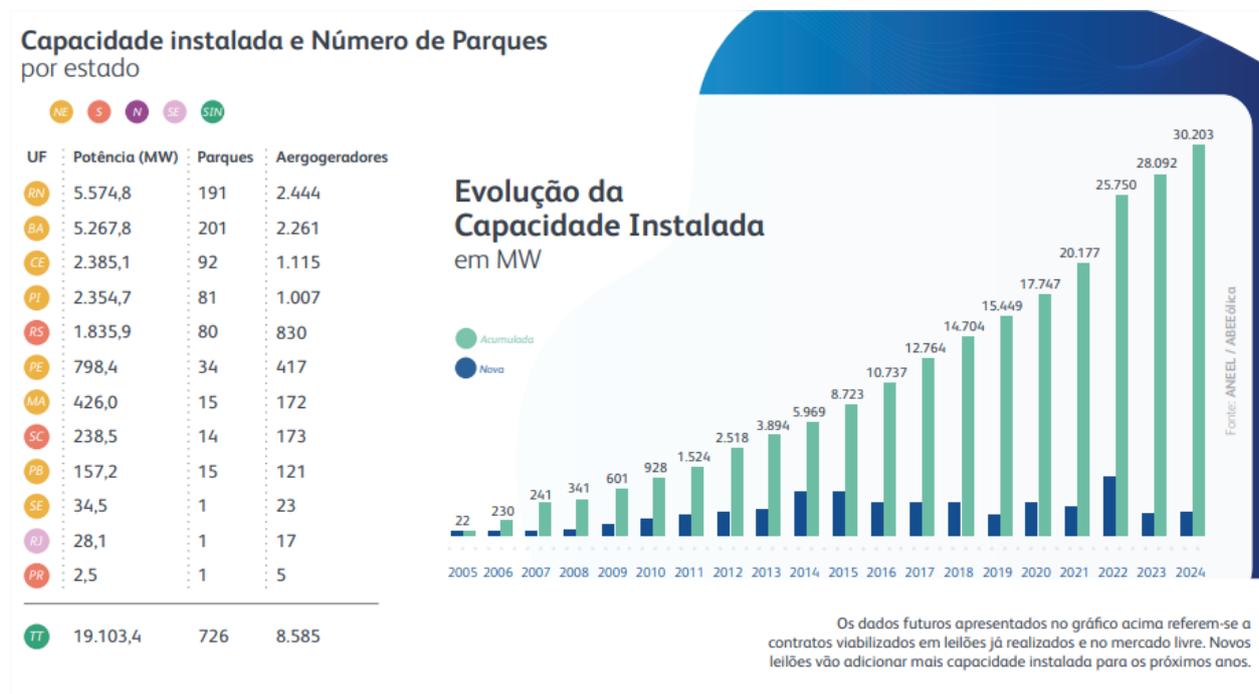


Figura 52- Infovento 21.

Fonte: [http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021\\_06\\_InfoVento21.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021_06_InfoVento21.pdf).

LINKS INTERESSANTES

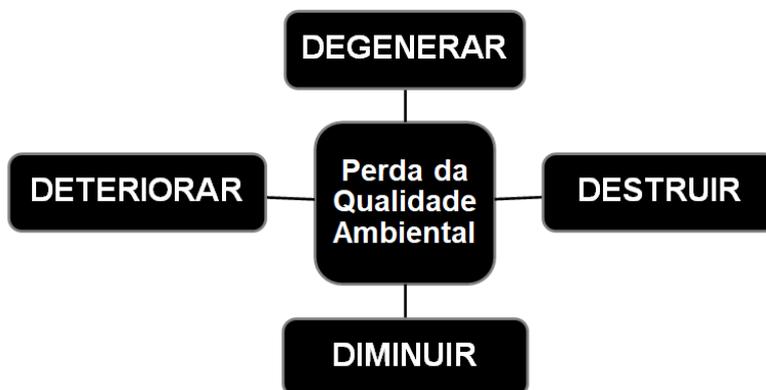
- [https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)
- <https://www.youtube.com/watch?v=HqCVgRbPQcQ>
- <https://www.youtube.com/watch?v=fb8HBxqP8Gc>

## 11. Impactos ambientais da energia eólica

### → Definindo Meio Ambiente

Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (Estocolmo – 1972) - “O meio ambiente é o conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos e sociais capazes de causar efeitos diretos ou indiretos, em um prazo curto ou longo, sobre os seres vivos e as atividades humanas.”

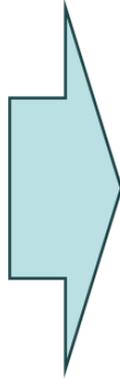
Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA - Lei nº. 6.938/81) define meio ambiente como "o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abrigar e reger a vida em todas as suas formas".



PNMA - Lei Nº. 6.938/81 define degradação ambiental como *“a alteração adversa das características do meio ambiente”*

# IMPACTO AMBIENTAL

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:



- **Água:** Quantidade, qualidade, acesso, sazonalidade;
- **Solos:** Erosão, produtividade da cultura, salinidade, nutrientes;
- **Fauna:** Populações, habitat;
- **Flora:** Composição e densidade da vegetação natural, produtividade, espécies chave;
- **Saúde:** Vetores de Doença, Patogenias;
- **Ecossistemas especiais**

Resolução CONAMA nº 01/86

## → Benefícios da eólica onshore

- ❖ O mais importante benefício ao meio ambiente da geração eólica é a não-emissão de dióxido de carbono na atmosfera durante a geração;
- ❖ Reduz a dependência de combustíveis fósseis, sendo o vento um recurso abundante e renovável;
- ❖ As centrais eólicas ocupam um pequeno espaço físico e permitem a continuidade de atividades entre os aerogeradores (pastagens e agricultura);
- ❖ Melhora a economia local e oferta de empregos;
- ❖ É uma indústria em grande ascensão e com bom potencial no Brasil;
- ❖ Contribui para a diversidade de suprimento de energia e pode ser conectada à rede;
- ❖ A tecnologia está completamente dominada e ainda em grande desenvolvimento, com redução constante de custos de construção e geração.

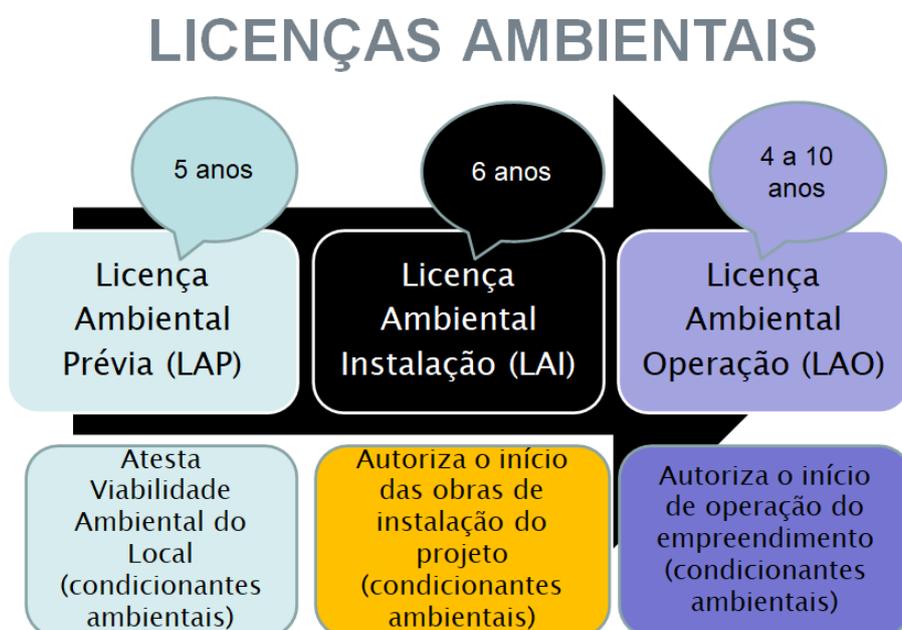
## → Impactos negativos

- ❖ Devido a terraplanagem, fixação, fragmentação, desmatamento e compactação, modificando a morfologia, topografia e fisionomia do local, as

modificações desencadeiam no desequilíbrio na regulação do aporte de sedimentos e mudanças no nível hidrostático do lençol freático, afetando diretamente o abastecimento de água local;

- ❖ Impacto visual;
- ❖ Poluição sonora;
- ❖ Efeito estroboscópico;
- ❖ Interferência eletromagnética;
- ❖ Danos à fauna;
- ❖ Conflitos de uso da terra;
- ❖ Os impactos sociais atingem diretamente as comunidades tradicionais, como os pescadores artesanais, artesãos, caiçaras, entre outros, que retiram desses locais o sustento da família. Os principais impactos são a destruição de moradias e a inaccessibilidade às praias, sendo feita a retirada das populações tradicionais do seu lugar de origem, além do ruído.

→ **Projetos para implementação de parques eólicos devem seguir os passos do Licenciamento ambiental**



LINKS INTERESSANTES

---

<https://www.youtube.com/watch?v=4O9QwDRVcoA>

<https://www.youtube.com/watch?v=PRdfdTzsBFs>

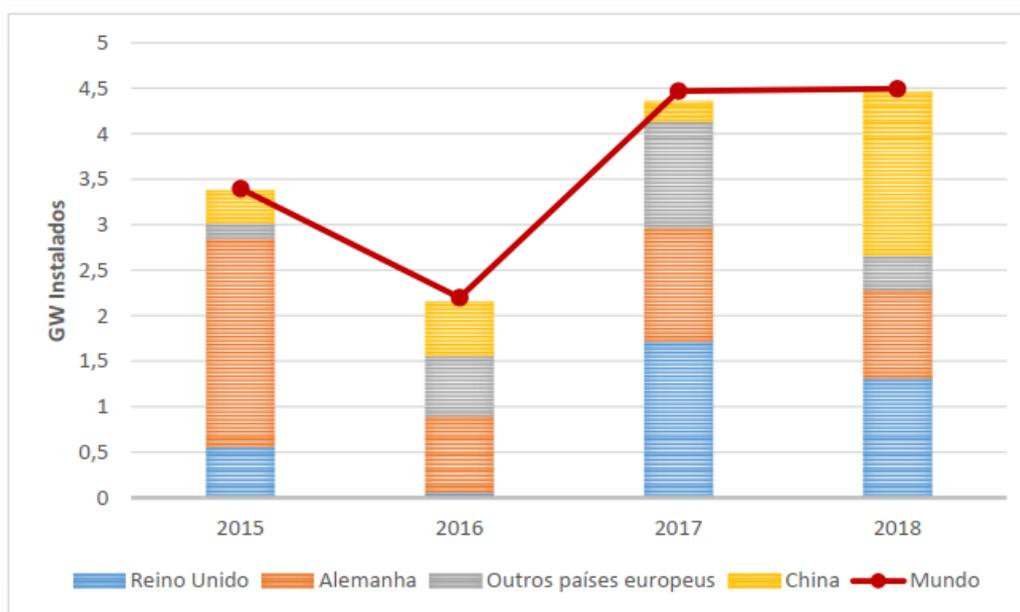
<https://www.youtube.com/watch?v=r5a164SMTkE>

<https://www.youtube.com/watch?v=KcGTgYkNWKk>

<https://www.youtube.com/watch?v=6VyrXAH-UpQ>

## 12. Eólica *Offshore* (marítima)

Ao redor do mundo, a energia eólica offshore tem se mostrado uma opção cada vez mais viável para geração de energia renovável, impulsionada por políticas energéticas de apoio, em resposta a preocupações ambientais, e por avanços tecnológicos, desenvolvidos por cadeias de suprimentos amadurecidas em locais com uma grande quantidade de projetos implantados. Do total de instalações offshore no mundo, Reino Unido, Alemanha e China concentram mais de 90% dos 23,1 GW instalados (GWEC, 2019a). Em 2018, um total de 4,5 GW foram instalados, sendo que, pela primeira vez, a China foi responsável pela maior parte dos projetos instalados.



**Figura 53-** Evolução da instalação de novos parques eólicos offshore no mundo nos últimos 4 anos (adaptado de GWEC, 2019a).

**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

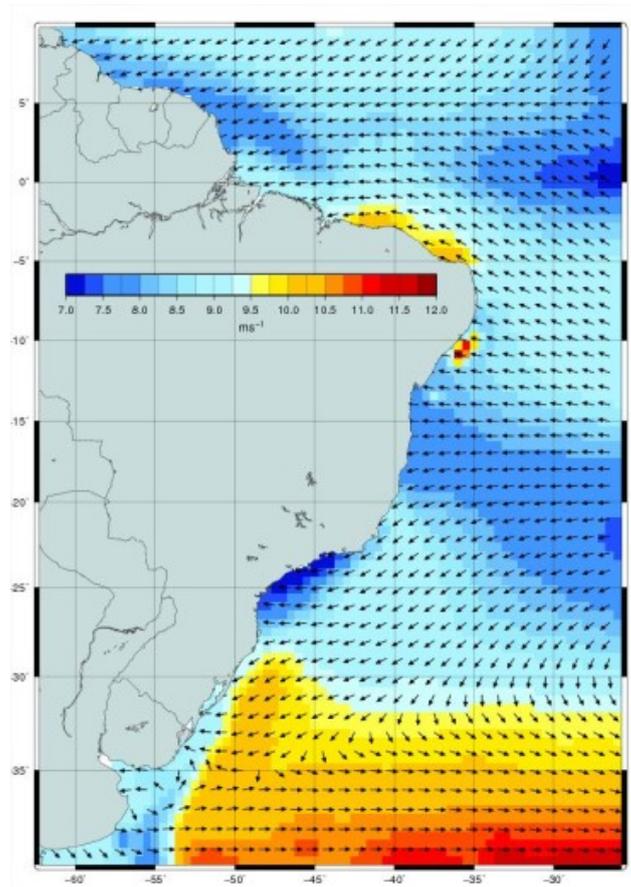
Os primeiros estudos da EPE sobre o potencial eólico offshore foram realizados no âmbito do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Após a publicação deste estudo, com estimativa do potencial de 1.780 GW para a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) (EPE, 2018), a EPE continuou analisando o assunto e

foi verificada a necessidade de atualizar as estimativas iniciais. Os principais fatores motivadores para essa nova análise foram:

- ❖ Disponibilidade de novas bases de dados;
- ❖ Mudança no tamanho e capacidade dos aerogeradores offshore no mercado.

A média da magnitude do vento offshore no Brasil pode apresentar variação entre 7 e 12 m/s, com valores mínimos próximos à costa de São Paulo e valores máximos próximos à costa de Sergipe e Alagoas. Três regiões de alta magnitude de vento são destacadas:

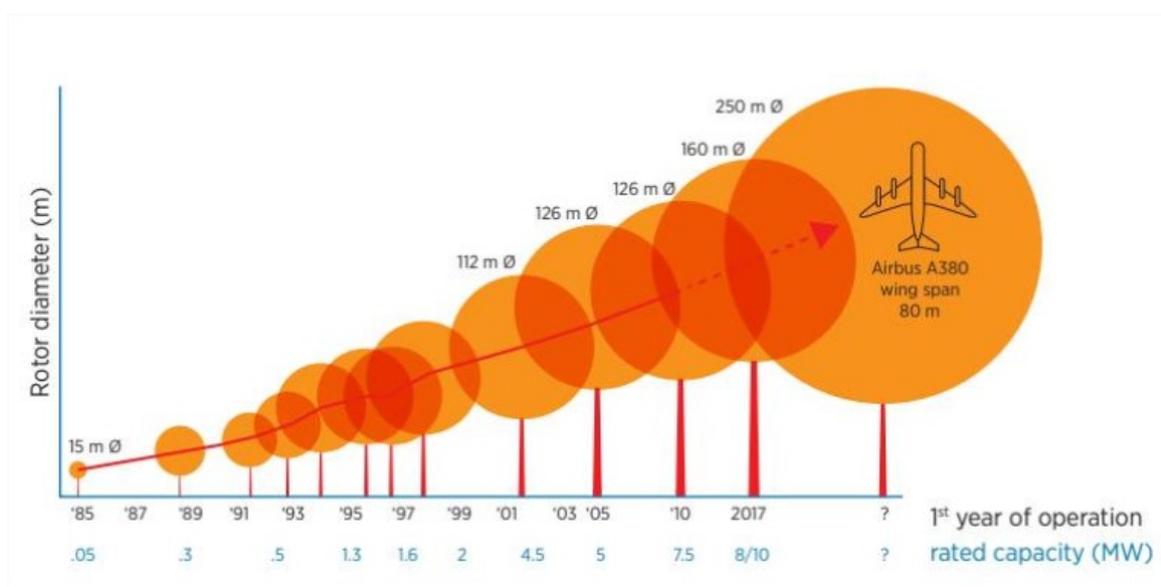
- ❖ Margem de Sergipe e Alagoas;
- ❖ Rio Grande do Norte e Ceará;
- ❖ Rio Grande do Sul e Santa Catarina.



**Figura 54-** Campo de vento médio calculado no período entre agosto de 1999 até dezembro de 2009.  
**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

## 12.1 Estrutura

As turbinas eólicas offshore foram inicialmente baseadas nas turbinas utilizadas em projetos onshore, mas, com as particularidades do recurso, projetos de equipamentos específicos foram sendo desenvolvidos. As turbinas offshore utilizadas têm sido aprimoradas constantemente, assim como o conhecimento sobre as condições de operação no mar (IRENA, 2012). A Figura xx apresenta a evolução do diâmetro e potência das turbinas instaladas em parques eólicos offshore.



**Figura 55-** Evolução do tamanho de turbinas eólicas (IRENA, 2016c).

**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

Como pode-se observar, uma tendência das turbinas eólicas offshore é o aumento do seu tamanho físico, tanto em termos de altura quanto em área de varredura (IEA, 2018b). Além disso, as pás mais longas permitem uma maior área de varredura e possibilitam atingir maiores capacidades nominais. No entanto, por estar em ambiente marinho, os componentes devem ser projetados contra o efeito de corrosão, e para a ação das ondas e marés.

Com o amadurecimento dos projetos e aumento de diâmetros e alturas, os valores de fator de capacidade observados estão cada vez maiores. Atualmente os locais de desenvolvimento desses projetos estão cada vez mais longe da costa, permitindo projetos em maior escala e acesso a um recurso de maior densidade energética.

O desempenho das turbinas eólicas offshore tem melhorado ao longo da última década, acompanhado de maior eficiência no sistema de transmissão e maior captação de energia para um determinado local (NREL, 2017), com o aumento da potência específica (expressa pela razão entre a potência do equipamento e a área varrida pelo rotor, dada em  $W/m^2$ ).

### → **Fundações**

A estrutura usualmente encontrada para turbinas offshore possui duas partes distintas: uma situada sobre o nível do mar e bastante semelhante às que se encontram acima do terreno nas estruturas onshore, e outra sob o nível do mar. Assim, a fundação offshore é definida como toda a estrutura de suporte para a instalação da turbina eólica no mar, ou seja, toda a estrutura abaixo da linha do mar.

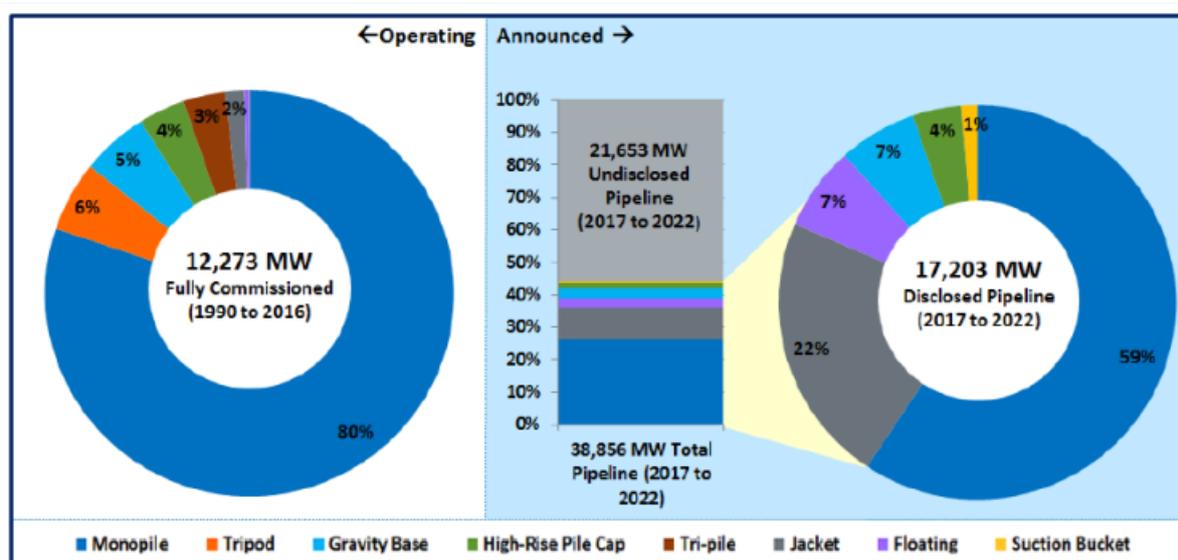
As fundações de projetos eólicos offshore estão evoluindo para atender às novas demandas associadas a águas mais profundas e a turbinas maiores e mais pesadas. Projetistas e fabricantes estão inovando simultaneamente para diminuir os custos (NREL, 2017):

- ❖ Adotando geometrias mais eficientes, e que buscam minimizar materiais e simplificar a fabricação;
- ❖ Otimizando as operações de instalação, diminuindo o tempo e/ou reduzindo as dependências de embarcações mais caras;
- ❖ Com o amadurecimento da cadeia de suprimentos, incorporando equipamentos e processos mais eficientes

### → **Seleção do tipo de fundação**

Os principais aspectos para a seleção de um tipo de fundação incluem a profundidade da água, as condições do solo marinho, as características da turbina, as massas do rotor e da nacelle, a velocidade do rotor, a experiência e capacidade

da cadeia de suprimentos (tanto na fabricação quanto na instalação das fundações) (IRENA, 2016a).



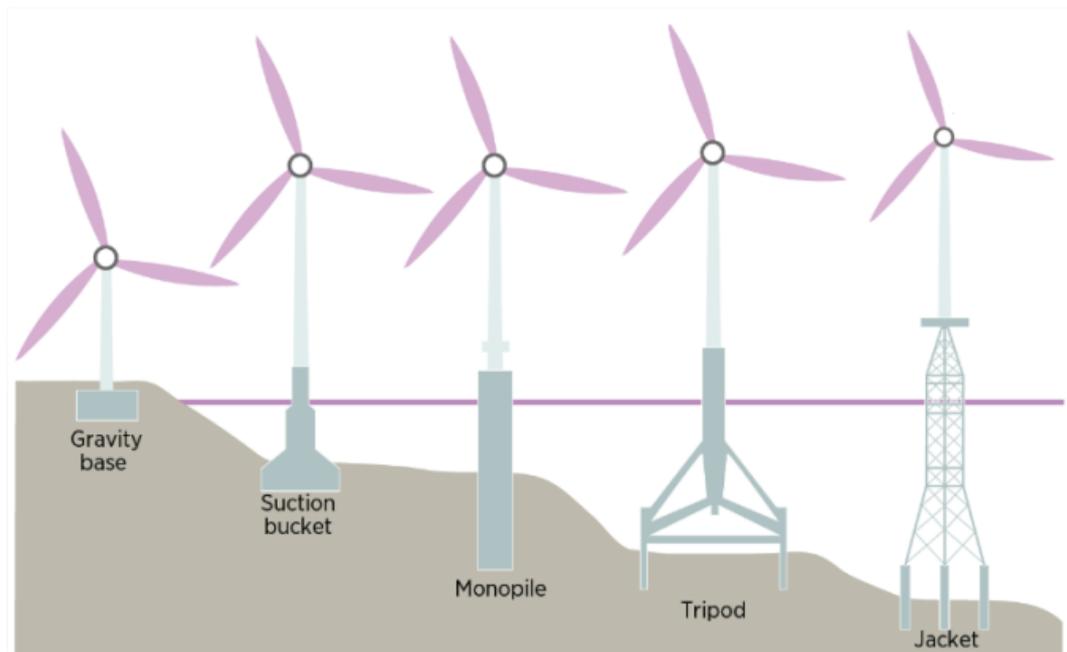
**Figura 56-** Tipos de fundações utilizadas para turbinas eólicas offshore (NREL, 2017).  
**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

As fundações de estruturas eólicas offshore podem ser divididas pela profundidade de instalação ou pelo tipo de fixação no fundo do oceano – fixos ou flutuantes. As Figura xx e Figura xx mostram os principais tipos de fundação existentes para projetos eólicos offshore.

**Gravity base:** O monopile é, hoje em dia, o mais utilizado dentre os tipos disponíveis de fundação para eólicas offshore, principalmente pela sua simplicidade, consistindo em um tubo metálico único, com diâmetro variando de 3,5 a 4,5 m (IRENA, 2018a). Não requer preparação do solo marinho e é cravada ao solo com a aplicação de pressão no sentido descendente, não sendo por isso recomendado para fundações em rocha. Este tipo de fundação evoluiu significativamente, sendo o mais competitivo em termos de custo – mesmo com turbinas maiores e em profundidades superiores a 35 m (IRENA, 2016b).

**Monopile:** O monopile é, hoje em dia, o mais utilizado dentre os tipos disponíveis de fundação para eólicas offshore, principalmente pela sua simplicidade, consistindo em um tubo metálico único, com diâmetro variando de 3,5 a 4,5 m (IRENA, 2018a). Não requer preparação do solo marinho e é cravada ao solo com a

aplicação de pressão no sentido descendente, não sendo por isso recomendado para fundações em rocha. Este tipo de fundação evoluiu significativamente, sendo o mais competitivo em termos de custo – mesmo com turbinas maiores e em profundidades superiores a 35 m (IRENA, 2016b).



**Figura 57-** Exemplos de estruturas com fundação fixa (IRENA, 2018a).

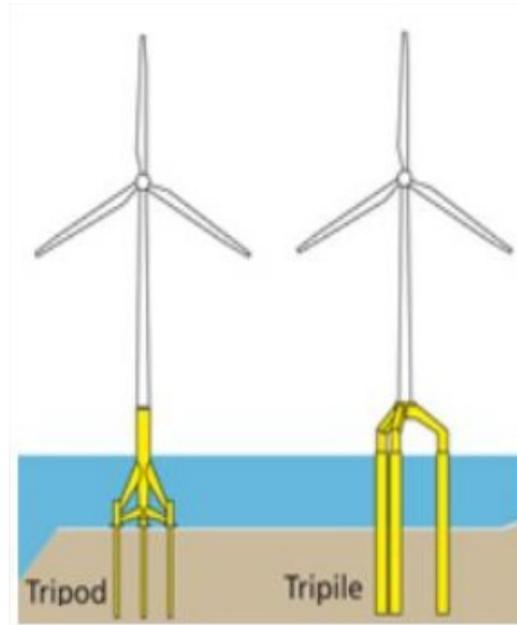
**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

**Suction bucket:** Combina as propriedades de uma fundação monopile e uma gravity base, com a base da estrutura oca. Após o apoio da estrutura no fundo do mar, procede-se a sucção da água de dentro da base, fazendo com que a casca metálica crave no subsolo por meio da diferença de pressão e do peso da fundação.

**Tripod:** Estas fundações trazem um pouco da expertise da indústria do petróleo e gás para as eólicas offshore. O tipo tripod trata-se de uma estrutura tubular com um tripé, onde os pés são fixados no fundo do mar por cravação, de forma semelhante à fundação monopile. Este tripé é conectado a uma seção tubular principal central, que faz a conexão com a torre da turbina. Esta estrutura é mais estável que o monopile, mas não é tão utilizada por apresentar maior dificuldade para transporte.

O tipo de fundação **tri-pile** é semelhante à tripod, podendo ser confundida com a mesma. Esta fundação é feita por três tubos de aço tubular, que se estendem

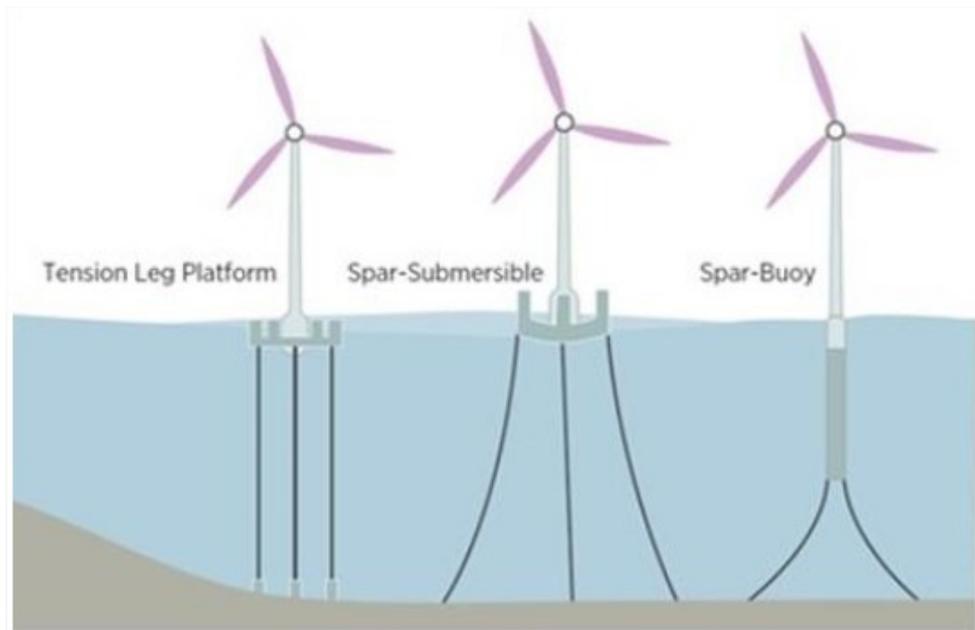
até ao fundo do mar, e uma peça de transição colocada sobre eles, onde também é conectada à turbina, conforme mostrado na Figura xx. A junção entre as tubulações e a peça de transição é realizada de forma permanente.



**Figura 58-** Fundações tipo Tripod e Tri-pile (adaptado de <https://www.offshore-stiftung.de/en/foundations>).  
**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

**Jacket:** Também oriunda da indústria de petróleo e gás, a sua utilização em eólicas offshore é recente. O tripé utilizado nas fundações tripod é substituído por uma estrutura treliçada, denominada jaqueta (jacket), com pés fixados por perfuração. Esta fundação tem a vantagem de ter maior resistência contra ondas, ideal para águas mais profundas e adequada para turbinas de grande porte por sua estabilidade. No entanto, seus custos de construção e transporte são superiores aos dos outros tipos de fundações fixas (IRENA, 2018a).

**Tension leg platform:** Estrutura flutuante ancorada ao fundo do mar por cabos tensionados, normalmente fixadas ao leito marinho por meio de estacas de sucção. Pode ser montada em terra e transportada para o local, mas o transporte é um pouco dificultado pela sua pouca estabilidade, necessitando, em alguns casos, a utilização de embarcações especiais. Recomendada para profundidades de 50 a 60 m (IRENA, 2016a).



**Figura 59-** Exemplos de estruturas com fundação fixa (IRENA, 2018a).

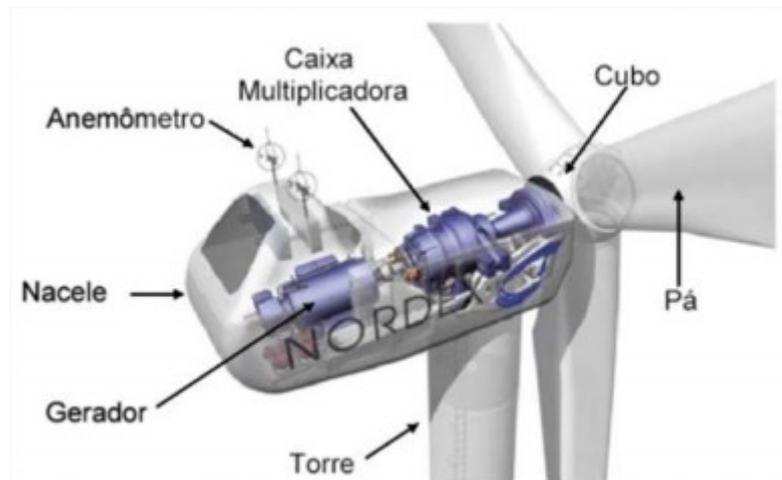
**Fonte:** <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

**Spar-submersível:** Trata-se de uma estrutura tripla que se assemelha à base de fundações tripod, fixadas por meio de âncoras ou linhas catenárias (linhas de base fixa). As colunas fornecem certa estabilidade hidrostática e flutuabilidade. Podem ser transportadas de forma totalmente montadas, por navios rebocadores convencionais. Possuem pouca estabilidade a movimentos críticos de onda (IRENA, 2016a).

**Spar-buoy:** Trata-se de uma estrutura tripla que se assemelha à base de fundações tripod, fixadas por meio de âncoras ou linhas catenárias (linhas de base fixa). As colunas fornecem certa estabilidade hidrostática e flutuabilidade. Podem ser transportadas de forma totalmente montadas, por navios rebocadores convencionais. Possuem pouca estabilidade a movimentos críticos de onda (IRENA, 2016a)

## 12.2 Componentes

A turbina eólica é composta basicamente pela torre e pela nacela. Essa última, por sua vez pode ser dividida em 5 subcomponentes (HANSEN, 2017).



**Figura 60-** Turbina eólica e seus componentes.

**Fonte:** [http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Eduardo\\_Moura\\_da\\_Silva\\_Ferreira.\\_MESTRADO-2019.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Eduardo_Moura_da_Silva_Ferreira._MESTRADO-2019.pdf).

**Rotor aerodinâmico:** O rotor é o sistema que recebe a energia do vento e a transforma em energia cinética. É composto basicamente por suas pás e um hub, ou cubo, mostrado na figura anterior, onde as pás são conectadas mecanicamente.

**Sistema de transmissão:** A energia mecânica do rotor é transmitida para o gerador através de um sistema de transmissão composto pelo eixo do rotor, sistemas de freio e a caixa de velocidade, ou caixa multiplicadora. A caixa de velocidade tem a função principal de, utilizando o eixo do rotor, converter o sistema de baixa rotação e elevado torque do rotor para um de alta rotação no eixo do gerador. O sistema de freio aerodinâmico tem a função de girar as pás para evitar o efeito do vento e o sistema de freio mecânico o complementa atuando para manter o sistema parado.

**Gerador:** Trata-se do componente que converte a energia mecânica em energia elétrica. Composto o gerador, o rotor se situa dentro de um estator e é responsável pela geração do campo magnético. A partir da rotação do sistema, uma voltagem é induzida nos terminais do estator. O gerador pode ser classificado em síncrono – no caso do campo magnético do estator estar em sincronia com aquele do rotor – ou assíncrono – no caso contrário. A vantagem do gerador síncrono é de não necessitar de uma corrente magnética reativa, entretanto, ele é mais complexo

e caro. Já o assíncrono é mais robusto e barato, apesar da necessidade de uma corrente magnética reativa, o que pode exigir o uso de equipamentos extras.

**Circuito Interface de ligação do gerador à rede:** A energia elétrica proveniente do gerador alimenta a rede através de um circuito de interface eletrônico. Ele deve ser definido de modo a satisfazer os requisitos tanto do gerador quanto da rede. Em relação ao gerador, deve-se assegurar que a velocidade de rotação da turbina esteja sendo continuamente ajustada para garantir a máxima eficiência. Em relação à rede, a interface deve estar de acordo com os requisitos para controlar a frequência, potência e controle de tensão.

**Sistema de controle da turbina:** o sistema de controle otimiza a operação da turbina eólica de modo a garantir a melhor performance independente das condições naturais. O objetivo principal é maximizar a produção de energia e, simultaneamente, reduzir o estresse nos componentes mecânicos, para, assim, prolongar a vida útil dos mesmos. Os três sistemas de controle comumente usados são: o sistema de controle stall, stall ativo e pitch.

- ❖ **Sistema de controle stall:** esse é o sistema mais simples e robusto dentre os três. As pás nesse caso são fixas no hub assim como seus ângulos, atuando passivamente. O design aerodinâmico do sistema garante que o rotor freie em velocidades acima da velocidade máxima especificada, pois entra em “stall”, ou seja, escoamento do ar em torno da superfície das pás se descola, aumentando a força de arrasto;
- ❖ **Sistema de controle stall ativo:** nesse caso, o ângulo de ataque é controlado ativamente e aumentado levando propositalmente as pás ao efeito do “stall”. Diferentemente do stall simples, aqui há a vantagem de poder compensar variações na densidade do ar.
- ❖ **Sistema de controle pitch:** Aqui os ângulos de ataque também são ativamente controlados, porém, diferentemente dos casos anteriores, ele é diminuído de modo a diminuir a velocidade de rotação do eixo do rotor.

## 12.3 Recursos eólicos offshore no Brasil

Ortiz & Kampel (2011) apresentaram um dos primeiros trabalhos que estimaram o potencial eólico offshore no Brasil

- até 10 km da costa: 57 GW;
- ZEE brasileira, potencial energético de 1,78 TW;

### POTENCIAL DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA MARGEM DO BRASIL

Ortiz, G. P.<sup>1</sup>; Kampel, M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
e-mail: gustavo.ortiz@cptec.inpe.br

Distância da costa	
0 a 10 km	57 GW
0 a 50 km	259 GW
0 a 100 km	514 GW
0 a 200 M (ZEE)	1.780 GW
Intervalo batimétrico	
0 a 20 m	176 GW
0 a 50 m	399 GW
0 a 100 m	606 GW

Potencial de geração de energia eólica em diferentes regiões da margem brasileira

Roadmap da energia eólica offshore no Brasil – EPE 2020.

Região	Áreas aproveitáveis (1.000 km <sup>2</sup> )			Potencial (GW)			Potencial (TWh)		
	Wind Atlas	CEPEL	ERA5	Wind Atlas	CEPEL	ERA5	Wind Atlas	CEPEL	ERA5
Norte	27	23	9	101	87	35	312	299	98
Nordeste	95	67	48	357	251	181	1.460	1.122	732
Sudeste	18	22	12	47	57	32	162	221	119
Sul	37	41	26	96	108	68	382	421	257
<b>Total</b>	<b>177</b>	<b>154</b>	<b>96</b>	<b>601</b>	<b>503</b>	<b>317</b>	<b>2.316</b>	<b>2.063</b>	<b>1.206</b>

Potencial da eólica *offshore* por região no Brasil, considerando 30 km da costa e velocidades acima de 7 m/s (EPE, 2020).

### → Vantagens

- ❖ Os ventos Offshore tendem a ser mais rápidos do que em terra (velocidade ao cubo na potencia...).
- ❖ •As velocidades do vento em alto-mar tendem a ser mais constantes do que em terra. Uma oferta mais estável de vento significa uma fonte de energia mais confiável.

- ❖ Muitas áreas costeiras têm necessidades energéticas muito elevadas. Grande parte da população vive em áreas costeiras. A construção de parques eólicos offshore nessas áreas pode ajudar a suprir essas necessidades de energia de fontes próximas.
- ❖ Os parques eólicos offshore têm muitas das mesmas vantagens que os parques eólicos baseados em terra: fornecem energia renovável; eles não consomem água; eles fornecem uma fonte de energia doméstica; eles criam empregos; e não emitem poluentes ambientais ou gases de efeito estufa na geração.

### → **Desvantagens**

Os parques eólicos offshore podem ser caros e difíceis de construir e manter, em particular:

- ❖ É muito difícil construir parques eólicos robustos e seguros em águas mais profundas do que cerca de 200 pés (~ 60 m);
- ❖ Embora as águas costeiras sejam relativamente rasas, nem toda região costeira é assim;
- ❖ A ação das ondas e mesmo ventos muito fortes, particularmente durante tempestades ou furacões, podem danificar as turbinas eólicas;
- ❖ A produção e instalação de cabos de energia sob o fundo do mar para transmitir eletricidade de volta à terra pode ser muito dispendiosa;
- ❖ Os efeitos de parques eólicos offshore em animais marinhos e aves não são totalmente compreendidos;
- ❖ Parques eólicos offshore construídos dentro da vista do litoral podem ser impopulares entre os moradores locais e podem afetar o turismo e os valores das propriedades;
- ❖ Podem influenciar outros usos dos oceanos, como rotas de transporte, pesca e lazer;

---

### LINKS INTERESSANTES

<https://www.youtube.com/watch?v=470cQt4xc4>

<https://www.youtube.com/watch?v=WqsrN8U1szo>

<https://www.youtube.com/watch?v=-4G21NkKq54>

[http://www.sectordialogues.org/documentos/proyectos/adjuntos/a6e629\\_Mapeamento%20e%C3%B3licas%20offshore.pdf](http://www.sectordialogues.org/documentos/proyectos/adjuntos/a6e629_Mapeamento%20e%C3%B3licas%20offshore.pdf)

<https://core.ac.uk/download/pdf/147520946.pdf>

[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/30709/1/Energiaeolica\\_Nunes\\_2020.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/30709/1/Energiaeolica_Nunes_2020.pdf)

[http://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3635/2/CI%C3%A1udsonOC\\_ART.pdf](http://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3635/2/CI%C3%A1udsonOC_ART.pdf)

[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap\\_Eolica\\_Offshore\\_EPE\\_versao\\_R2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf)

### 13. REFERÊNCIAS CONSULTADAS

AHRENS, C. Donald. Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere. Cengage Learning, 2014.

BURTON, Tony. Wind energy: handbook. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 617p.

Meteorologia Básica - Notas de Aula - Prof. Alice Marlene Grimm. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>. Acesso em: 28/07/2021;

TOLMASQUIM, Mauricio T., ENERGIA RENOVÁVEL. Hidráulica, Biomassa, Eólica, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Energia Eólica – Princípios e Tecnologia. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)

Spera, 2009. Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, 2 Ed. Editora ASME.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/321262140\\_O\\_mercado\\_brasileiro\\_da\\_energia\\_eolica\\_impactos\\_sociais\\_e\\_ambientais](https://www.researchgate.net/publication/321262140_O_mercado_brasileiro_da_energia_eolica_impactos_sociais_e_ambientais) Acesso em: 04/09/21;

Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil> Acesso em: 04/09/21;

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/265894758\\_Potencial\\_De\\_Energia\\_Eolica\\_Offshore\\_Na\\_Margem\\_Do\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/265894758_Potencial_De_Energia_Eolica_Offshore_Na_Margem_Do_Brasil) Acesso em: 04/09/21;

Disponível em:

[http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Eduardo\\_Moura\\_da\\_Silva\\_Ferreira.\\_MESTRADO-2019.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Eduardo_Moura_da_Silva_Ferreira._MESTRADO-2019.pdf) Acesso em: 04/09/21;