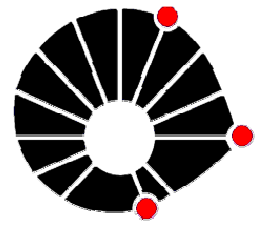


2014/2015

GONZALO CIÉRVIDE OJER



UNICAMP

**[ DIMENSIONAMENTO E  
PROJETO DE CATAVENTO DE  
BAIXA POTENCIA ]**  
ENGENHARIA MECANICA

# ÍNDICE

## 0. Descrição das Atividades e Metodologia

1. Energia Eólica Mundial.....	2
1.1. Evolução da energia eólica nos últimos anos.....	2
1.2. Situação atual.....	4
1.3. Futuro Energia Eólica Mundial.....	5
2. Energia Eólica BRASILIA .....	7
2.1. Regiões adequadas para geração.....	7
2.2. Sistema eólico brasileiro atual.....	9
2.3. Comparação com as principais fontes de energias renováveis. ....	11
3. Tipos de cataventos.....	13
3.1. Situação do eixo.....	14
▪ Turbinas de eixo vertical. ....	14
▪ Turbinas de eixo horizontal. ....	15
3.2. Número de pás .....	16
3.3. Rotor barlavento/sotavento.....	17
4. Tipos de controle de potencia.....	18
4.1. Ângulo de passo. Controle de potencia aerodinâmico. ....	19
4.2. Ângulo de Yaw.....	21
5. A Teoria do Elemento Pala de Glauert.....	22
5.1. Estudo das forças.....	22
5.2. Estudo das velocidades .....	24
5.3. Conservação do Momento Angular e do Momento Axial.....	25
5.4. Método iterativo .....	27
5.5. Cálculo dos valores dos coeficientes de empuxo e torque. $C_T$ e $C_Q$ .....	27
6. Exemplo. ....	28
7. Bibliografía .....	29

## 0. Descrição das Atividades e Metodologia

Esta fase de projeto será executado conforme segue.

- 1.1. Pesquisa a bibliográfica para levantar o potencial mundial e também o potencial brasileiro para geração de energia a partir dos ventos, identificai no Brasil regiões adequadas para geração, nível de vento, instalação em operação potencial e riscos de implantação, comparação com outras fontes de energia renováveis.
- 1.2. Identificação dos tipos mais utilizados e faixa de potencia, tipo de tecnologia, etc.
- 1.3. Modelos de cataventos de baixa potencia, operacionais, relatar experiência de controle, países.
- 1.4. Fazer uma pesquisa bibliográfica dos modelos aerodinâmicos mais usados, partes, controle, etc.
- 1.5. Escolher um modelo e investigar a aerodinâmica deste tipo de catavento.
- 1.6. Estudar a aerodinâmica do rotor, os parâmetros mais importantes e possíveis metodologias de calculo. Fazer um calculo aproximado global para avaliar as dimensiones básicas usando por exemplo teoria de disco ideal. Discussão e verificação das possibilidades de implantação
- 1.7. Preparação do relatório.

## 1. Energia Eólica Mundial.

### 1.1. Evolução da energia eólica nos últimos anos.

Nos últimos 25 anos a evolução da energia eólica "moderna" no mundo tem sofrido um grande avanço pelo fato das múltiplas vantagens que serão comentadas. No primeiro lugar, temos que realçar o fato de que os desenvolvimentos técnicos permitem alcançar maiores potencias, melhores rendimentos e maior disponibilidade.

O levantamento da geração de energia eólica mundial é uma realidade devido aos principais fatores:

- O maior benefício ambiental que pode ser ligado à geração eólica é a não emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) os principais culpáveis. Os efeitos do aquecimento global já podem ser vistos no mundo com as modificações nos padrões climáticos, o derretimento dos polos
- É uma fonte de energia inesgotável.
- Nomeadamente, as energias renováveis têm um impacto ambiental 31 vezes inferior às energias convencionais. Evidentemente as energias renováveis

também têm consideráveis impactos ambientais, contudo, estes efeitos são em proporção menores que os das energias convencionais. Mais concretamente, cada kWh produzido pela energia eólica tem 21 vezes menor impacto ambiental que o produzido pelo petróleo, 10 vezes menor que o da energia nuclear e 5 vezes menor que o de gás.

Contudo, em algumas nações, o preço pago pelas distribuidoras aos produtores depende da tecnologia de geração, além de que fica regulado pelas leis cada vez mais exigentes com os produtores de energia renovável. O mesmo acontece na Espanha, onde a moratória imposta devido aos incentivos que foram dados para as energias renováveis, modifica as decisões dos principais grupos do investimento. Consequentemente, nas nações onde isso ocorre deve-se fazer a seguinte reflexão, como seria o cenário se os governos impusessem impostos pela contaminação do meio ambiente.

A consciência de vários países do mundo está mudando, assim os investimentos em energias renováveis tem aumentado nos últimos anos.

Apesar das vantagens citadas anteriormente, 2013 foi o primeiro ano na história onde o crescimento da capacidade de energia eólica anual decresceu, obtendo um crescimento negativo de 21%. Foi a primeira vez na história em que isto ocorreu, e se deu devido as incertezas políticas dos impostos no Estados Unidos, onde no ano em questão se instalou só 1 GW enquanto que no ano anterior foram instalados 12 GW.

O último crescimento significativo foi no ano de 2009 onde o salto do mercado foi de 40% em relação ao ano anterior, com 38 GW instalados. Depois disso a quantidade de GW instalados tem sido aproximadamente de 40 GW por ano.

No gráfico a seguir, pode-se visualizar a evolução da acumulação de capacidade de energia eólica de 1996 até 2013.

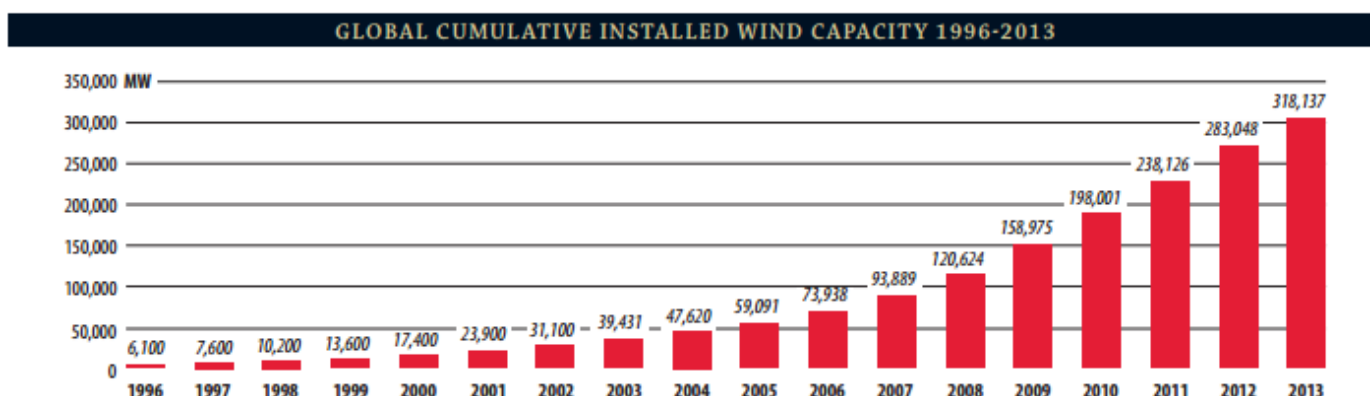


Ilustração 1 Capacidade de energia eólica acumulada por ano. (Global Wind Energy Council (GWEC) 2014)

## 1.2. Situação atual.

Atualmente, mais de 90 países em todo o mundo há energia eólica comercial, o que permitiu que o ano passado 3% da energia fornecida fosse eólica. Os principais países em geração de energia eólica acumulada são China, com uma diferença mais que considerável, seguido de Estados Unidos, Alemanha, Espanha, Índia e Reino Unido. Ao final de 2013, 24 países produziram mais de 1GW incluindo 16 países na Europa, 4 na Ásia-Pacífico, (China, Índia, Japão e Austrália), 3 na América do Norte (Estados Unidos, Canadá México) e 1 na América Latina (Brasil). (Fried, Sawyer, Shukla, & Qiao, 2013)

China é o maior mercado do mundo, com uma discrepância muito alta em relação aos outros mercados, obtendo no final de 2013 91.4 GW produzidos. Isso foi graças a uma grande aposta do país asiático pela energia eólica. Em 2013 a energia eólica aumentou 24.1% desde 2012. Consequentemente, a China é a líder mundial na geração e acumulação de energia eólica. No gráfico posterior se mostra o crescimento extraordinário no setor eólico na China. (Fried, Sawyer, Shukla, & Qiao, 2013)

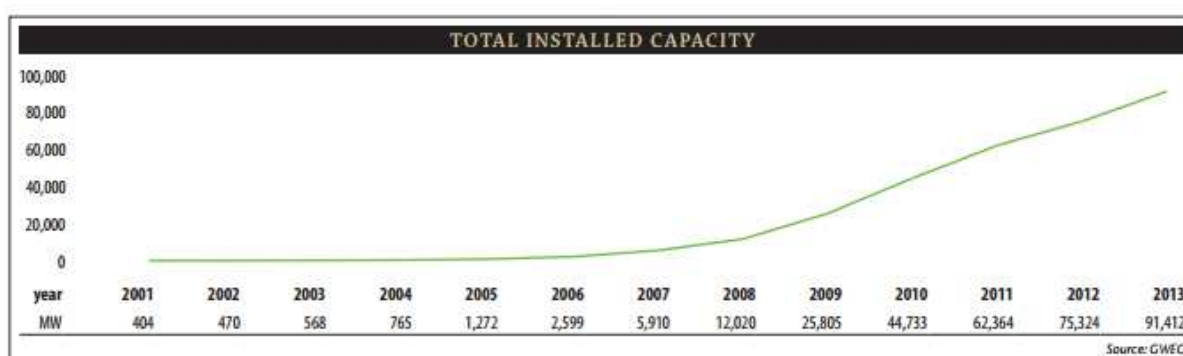


Ilustração 2 Capacidade de energia eólica instalada por ano. (Global Wind Energy Council (GWEC) 2014)

Acordo com o Conselho Mundial de Energia Eólica (GWEC), no final de 2013 a energia eólica global acumulada foi de 318.137 MW, o que representa um incremento de quase 200.000 MW nos últimos 5 anos. Contudo as novas instalações no mercado anual se reduziram quase 10 GW, sendo um total de 35.467 MW, devido ao fato da caída nas instalações do Estados Unidos por causa dos problemas políticos criados no congresso estadunidense em 2012. Além disso o ano de 2013 também foi complicado para o setor, já que teve só o 12.5% do crescimento acumulado.

O ano passado foi ótimo para os países como Alemanha e Reino Unido, além disso, foi o primeiro ano no qual Canadá instalou mais energia eólica que Estados Unidos. (Fried, Sawyer, Shukla, & Qiao, 2013)

A energia eólica acumulada no final do 2013 se repartiu da seguinte forma:

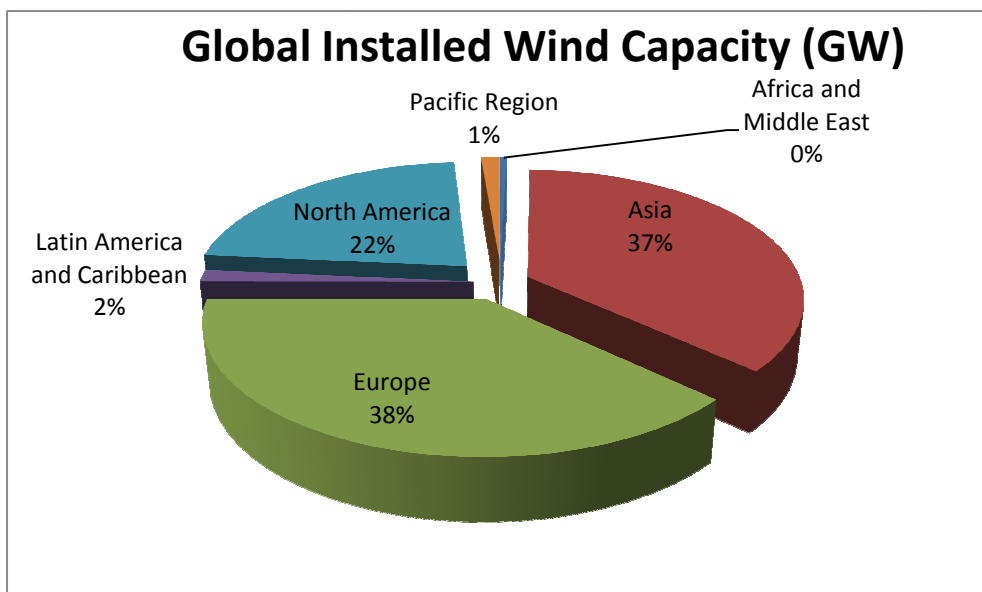


Ilustração 3 Distribuição da energia eólica global. (Global Wind Energy Council (GWEC) 2014)

Región	GW
África and Middle East	1,255
Asia	115,939
Europe	121,474
Latin America and Caribbean	4,709
North America	70,885
Pacific Region	3,874
<b>Total</b>	<b>318.137</b>

Tabla 1 Distribuição da energia eolica mundial. (Global Wind Energy Council (GWEC) 2014)

Quanto aos tipos de geradores instalados, o principal mercado é o mercado dos grandes geradores com potencias instaladas entre os 2-6 MW no Europa, e os 2-3 MW na Ásia e Estados Unidos.

### 1.3. Futuro Energia Eólica Mundial.

#### Próximos anos 2014-2018

Geralmente, os mercados eólicos tendem a continuar com seu crescimento como os últimos anos. Com a diferença de que os mercados fora da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) começaram a ter mais importância. Dentro da OCDE a briga pelo domínio do mercado cada vez é mais dura .

Geralmente os conflitos nos países exportadores do hidrocarbonetos e a falta dos mesmos provocará um aumento nos preços dos tipos de combustíveis. Além disso a crescente consciência ecológica também influenciará no aumentando dos preços.

As principais potencias mundiais possuem importantes planos de inversão na matéria de energia eólica. Os principais mercados continuam com sua aposta pela energia eólica.

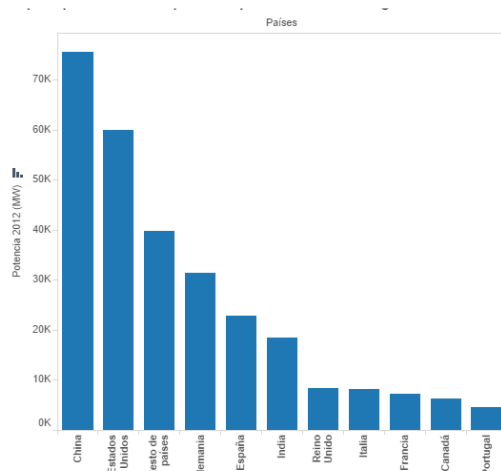
Estados Unidos criaram vários programas, tal como, RPS para eletricidade cujos objetivos se variam bem de estado à estado, vão desde 10% até mais de 20% de geração de sua energia com energia eólica. A associação americana de energia eólica (AWEA) informa que o vento produz atualmente 25.100 MW de eletricidade.

Por outro lado, a motivação por apostar na energia eólica também chega com força no principal país investidor das novas tecnologias, China, onde o governo tem um programa para obter os 200 GW para o ano 2020, o que significa um aumento de 15.5 GW para cada ano durante esta década.

Atualmente no Japão a revolução da era paralisa depois de Fukushima pelo fato de que a reforma do mercado da eletricidade não foi feita ainda. Provavelmente, devido a sua posição geográfica, a energia eólica offshore será a principal protagonista.

Contudo, a pesar dos esforços das principais potencias eólicas, os maiores crescimentos nos próximos 5 anos acontecerão na Ásia, America Latina e África pelo fato de que são as regiões onde a demanda aumentará mais.

Segundo Sawyer, secretario general do GWEC, se espera que ao final do ano 2014 o Brasil duplique sua capacidade eólica (4 GW no 2013). Em 2015 também se espera um grande aumento que será marcado pelas eleição de 2014. Outro mercado interessante pode ser o mercado Africano, com países como África do Sul, Tanzânia, Ken ia e Etiópia. Particularmente, Etiopia tem um dos melhores recursos eólicos do mundo com um objetivo para 2030 de 7 GW instalados. (Fried, Sawyer, Shukla, & Qiao, 2013)



**Ilustração 4 Classificação dos 10 países com maior capacidade de energia eólica instalada da energia eólica global. (Global Wind Energy Council (GWEC) 2014)**

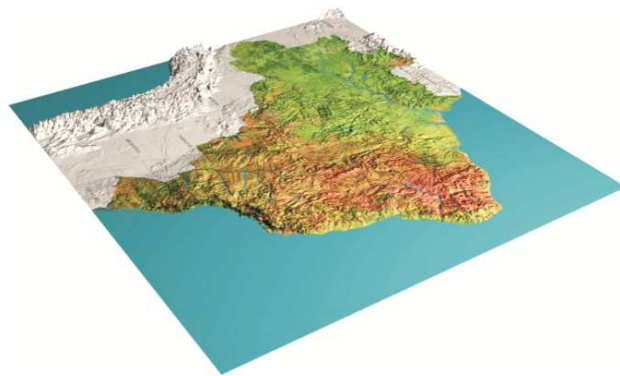
## **2. Energia Eólica BRASILERIA**

### **2.1. Regiões adequadas para geração.**

Com 8.514.215 km<sup>2</sup>, o Brasil é o quinto maior país do mundo e o maior da América Latina em área territorial. Estendendo-se entre as latitudes 5°16'N e 33°45'S e longitudes 32°23'W e 73°59'W. Sua geografia situada perto do mar Atlântico (7.367km) proporciona ao Brasil brisas marinhas com um alto potencial eólico. (Camargo do Amarante, Brower, Zack, & Leite de Sá, 2001).

A principal característica do Brasil são suas planícies, poucas regiões superam os 2.000 metros de altitude, e seu pico mais alto é o Pico da Neblina, antigo 3.014 m. Consequentemente no Brasil é muito complicado encontrar brisas montanha-vale.

A seguir, é mostrado um mapa topográfico do estado do Brasil onde podemos apreciar a escassa altitude, especialmente na parte oeste.



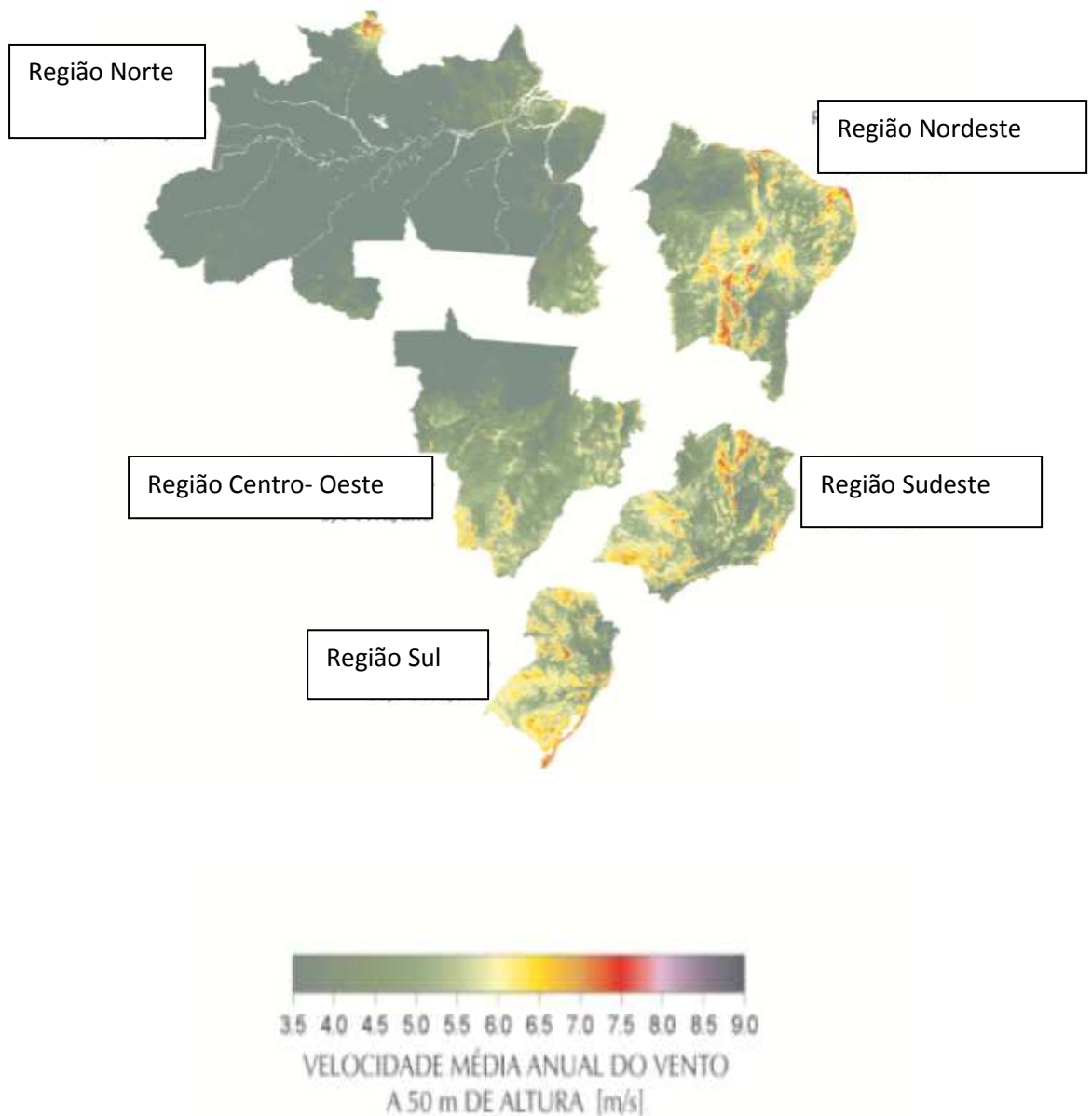
**Ilustração 5 Mapa relevo. (Associação Brasileira de Energia Eólica)**

Dentre os ventos, podemos distinguir os ventos globais (grandes movimentos hemisféricos), os ventos de escala media (ventos locais, tormentas locais, brisa de mar) e os ventos de escala pequena pelo efeito dos edifícios, vegetação e rugosidade do terreno.

Agora, analisaremos em primeiro lugar os ventos globais do Brasil, ventos que são influenciados pelo efeito da força de Coriolis que é uma força fictícia que desvia os ventos para a direita no hemisfério Norte e para a esquerda no Sul. Devemos lembrar que a força do Coriolis é nula no Equador e vai crescendo conforme a latitude.



No Brasil, podemos distinguir as seguintes diferentes regiões:



**Ilustração 6 Mapa velocidade média anual do vento no Brasil. (Associação Brasileira de Energia Eólica)**

▪ Norte: Na depressão Equatorial situada na parte este do Amazonas, os ventos são muito leves e é uma zona de baixas pressões. As velocidades médias anuais do vento a 50m de altura nessa região são inferiores a 3.5m/s devido, fundamentalmente, à vegetação densa e, consequentemente, à alta rugosidade do terreno. Entretanto, esta zona tem uma faixa estreita com ventos anuais de 8m/s a 10m/s na camada entre 1.000m e 2.000m acima da superfície. A faixa se inicia no Atlântico e estende-se para o oeste sobre a porção norte da Bacia Amazônica.

- Nordeste: Esta região tem uma faixa de aproximadamente 100 km, tem uma zona costeira muito ampla onde os ventos são controlados pelos alísios de leste e pelas brisas terrestres marinas. Consequentemente, os ventos alcançam valores entre 5 m/s e 7,5m/s na parte norte e entre 6m/s a 9m/s na parte sul. Nessa região, os ventos são mais rápidos pelo fato de que a vegetação é mais escassa e os solos são mais uniformes, o que faz com que a temperatura do solo seja maior e, portanto, aumente a diferença de temperaturas entre a parte terrestre e a marinha, originando maiores brisas marinas.

- Centro-Oeste: Esta zona se estende desde o margem esquerda da Bacia do Rio São Francisco até as fronteiras com Bolívia e Paraguai. É a zona com os ventos mais fracos com velocidades entre 3m/s a 4m/s na zona norte e entre 4m/s a 6m/s na zona sul.

- Sudeste : A maior parte da costa do Sudeste possui ventos entre 3.5 m/s a 6m/s com exceção da zona de entre as latitudes de 23° S e 23° S (sul do Espírito Santo e nordeste do Rio de Janeiro), onde as velocidades podem chegar a alcançar os 7.5 m/s.

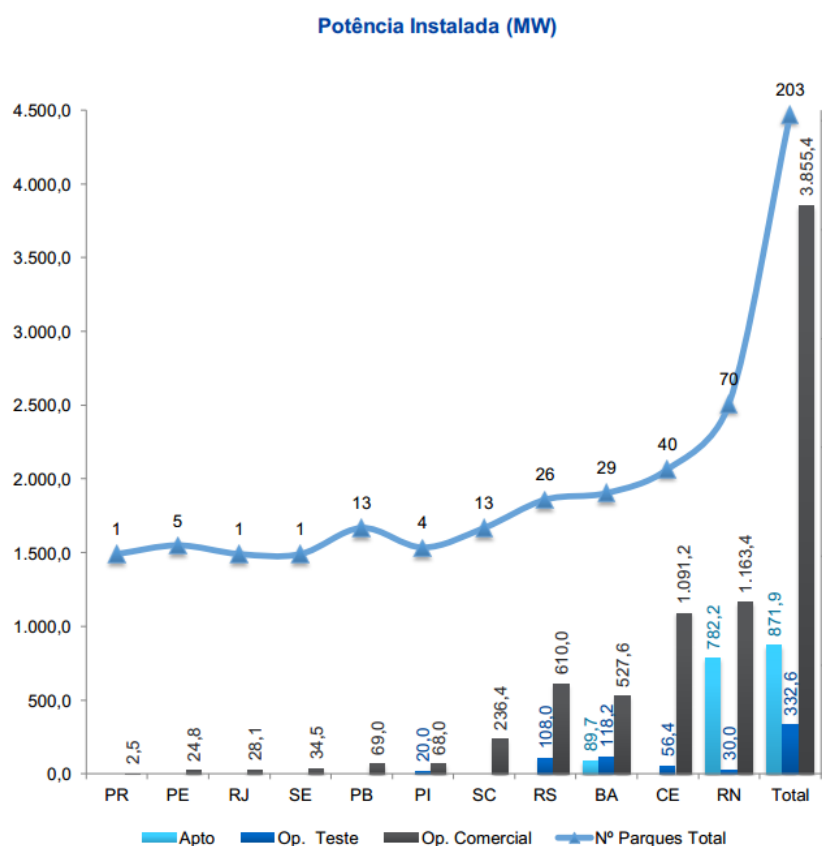
Obviamente, os maiores ventos ficam nas partes mais elevadas onde o efeito da pressa o é maior.

- Sul: Nesta zona, os gradientes de pressão entre a Depressão do Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico induzem um escoamento persistente do nordeste ao longo dessa área. Consequentemente, as velocidades medias anuais alcançam valores tais como 5.5m/s a 6.5m/s.

Logo, os ventos mais fortes acontecem nas zonas mais elevadas e montanhosas, como Campos de Palmas, e também na zona litoral sul onde os efeitos dos ventos da zona nordeste se acentuam pela brisa marinha. A zona do Nordeste tem ventos muito apropriados para geração de energia, mas geralmente, todo o pais tem condições adequadas para aproveitar a energia do vento.(Camargo do Amarante, Brower, Zack, & Leite de Sá, 2001).

## **2.2. Sistema eólico brasileiro atual.**

Atualmente, Brasil ocupa a posição numero 15 na geração de energia eólica pelo fato de que sua instalação operante é de 5.1 GW repartidos entre 201 usinas ao longo do território brasileiro divididos como é mostrado no gráfico..... mostrado abaixo . Isso só representa, aproximadamente, 4% da energia elétrica anual produzida pelo pais. Espera-se uma mudança dessa porcentagem para 9% no próximo ano de 2015. Contudo, o potencial eólico brasileiro foi estimado em 300 GW, consequentemente, nos encontramos num nicho de mercado inexplorado e com muito potencial para Brasil.



**Ilustração 7 Mapa velocidade média anual do vento no Brasil. (Associação Brasileira de Energia Eólica)**

PR	PARANÁ
PE	PERNAMBICO
RJ	RIO DE JANEIRO
SE	SERGIPE
PB	PARAIBA
PI	PIAUI
SC	SANTA CATARINA
RS	RIO GRANDE DO SUL
BA	BAHÍA
CE	CEARÁ
RN	RIO GRANDE DO NORTE

**Tabla 2 Estados do Brasil.**

Nas regiões com maior potência instalada são: Rio Grande do Norte, situado no Nordeste que conta com 1.16 GW, e Ceará, situado no Nordeste que conta com 1.09 GW. Os dois estados possuem mais da metade da energia eólica comercial do Brasil.

Entre as regiões que mais aumentaram seu potencial de instalação, temos que destacar Rio Grande do Norte (nordeste), atualmente o estado com maior potencia eólica

instalada. Esta foi a zona que mais aumentou sua capacidade eólica no 2014 com a instalação de 542.5 MW. (Associação Brasileira de Energia Eólica)

Atualmente, entre outros projetos eólicos, no dia 31/07/2014 Brasil firmou uma importante relação bilateral com Alemanha, que pretende aproveitar o potencial dos ventos no País com objetivo de conseguir a diversificação da matriz energética do Brasil. O programa contaria com empréstimos alemães no valor de 25 milhões de euros, além das contribuições e recursos brasileiros ,e buscaria a construção de parques eólicos com capacidade de gerar 330 MW aproximadamente.

As perspectivas para o final de 2017 indicam 8.7 GW de energia eólica em operação na matriz elétrica brasileira, e segundo o presidente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a energia eólica deve corresponder a 11% da matriz energética brasileira.

### 2.3. Comparação com as principais fontes de energias renováveis.

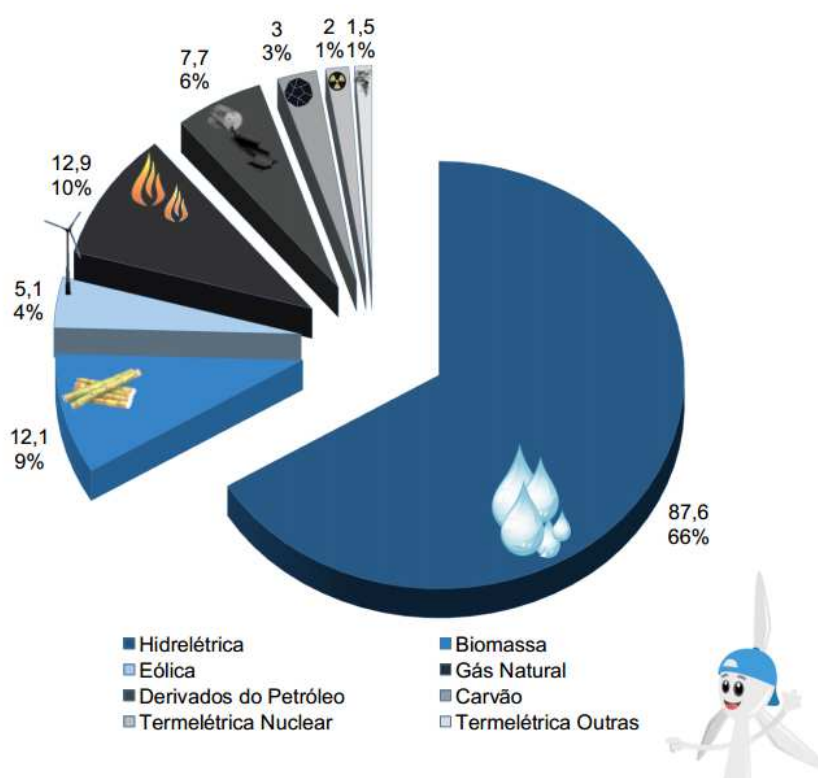


Ilustração 8 Distribuição da energia gerada no Brasil. (Associação Brasileira de Energia Eólica)

Falta mencionar que a energia fotovoltaica possui 12.3 MW de capacidade instalada.

No primeiro lugar entendemos como energia renovável qualquer tipo de energia que se obtém de fontes naturais virtualmente inesgotáveis , já seja pela enorme quantidade de energia que contêm, ou pela capacidade de regenerar-se por meios naturais.

Seguidamente, analisamos o estado das diferentes energias renovável em comparação com a energia eólica.

#### ▪ **Energia Hidrelétrica.**

Atualmente, como podemos observar no diagrama anterior, a energia hidrelétrica é com muita diferença a maior fonte de geração de energia, já seja renovável ou não do Brasil, representando 66% da energia consumida pelo país. Contudo a maioria deste tipo de energia se encontra repartida entre grandes represas, consequentemente Brasil tem 3 das 15 maiores represas do mundo. Elas são a represa de Itaipu, que é a presa com maior produção do mundo com 14.000 MW de capacidade instalada, a presa de Tucuruí com uma capacidade instalada de 8370 MW e o complexo hidroelétrico Paulo Afonso. (WIKIPEDIA)

Se bem que a maioria da potência está concentrada nas grandes presas, isso produz grandes e prejudiciais efeitos contra a natureza, pelo fato de que obrigam a mobilizar muitas pessoas. Além disso, as mudanças nas direções dos rios provocam novas inundações, assim como modificações na fauna local. Logo, também devemos considerar os fluxos de chuvas no Brasil, que no ano 2001 provocaram uma importante crise no setor hidrelétrico, os fluxos dos ventos não são um problema tão considerável no caso na energia eólica.

#### ▪ **Biomassa.**

A biomassa representa o 12.1 % da energia gerada no Brasil. A biomassa é toda forma de energia orgânica não fóssil, com origem animal ou vegetal. A biomassa pode ser aproveitada de muitas formas, como alimento de muitos tipos de organismos, a combustão de combustíveis fósseis obtidos a partir dela, pelas transformações físicas correspondentes

Mas geralmente a energia correspondente da biomassa se refere a energia obtida da combustão direta, consequentemente o rendimento deste tipo de geração está delimitado pelo rendimento da combustão, por conseguinte temos energia liberada como perda de calor.

#### ▪ **Derivados do petróleo**

O petróleo é uma mistura homogênea de compostos orgânicos, principalmente hidrocarbonetos insolúvel em água. Se produz no interior da Terra pela transformação da matéria orgânica acumulada em sedimentos do passado geológico e pode se acumular nas armadilhas geológicas naturais, onde se extrai pela perfuração de poço.

O petróleo é a fonte de energia com maior importância do mundo, pelo fato de que é constituído como a base da economia produtiva mundial. Assim um controle nos pontos de petróleo garante uma vantagem competitiva nos setores importantes como o setor do transporte. Além da geração de combustíveis como a gasolina, querosene, óleo diesel o petróleo poder ser utilizado para a fabricação de diversos produtos industrializados.

Uma das maiores desvantagens da fonte de energia relacionada com a queima dos derivados do petróleo, é a emissão de gases que favorecem o efeito estufa. Além disso, na combustão de combustíveis fósseis para a geração de energia, se emitem gases poluentes como os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e restos de partículas. As emissões

destes tipos de gases além dos problemas ambientais, também podem produzir efeitos negativos na saúde das pessoas originando problemas respiratórios, agravando doenças cardíacas, especialmente em crianças, idosos e asmáticos.

Outras das desvantagens da energia produzidas a través da queima de derivados do petróleo é que o preço pode variar significativamente pelo fato das tensões políticas que afetam ao mundo do óleo.

O preço meio do petróleo na última década foi três vezes maior que o preço que prevaleceu no século passado. Um dos principais fatores que explica a variação mencionada é as mudanças na tendência de consumo.

Enquanto o consumo dos países industrializados diminuiu um 6%, o das nações em desenvolvimento se incrementou em 47%, fazendo que atualmente, estes países estão muito cerca de superar aos principais consumidores de petróleo.

A variação no tipo de oferta também é um fator chave nas mudanças de preço. Por exemplo, o esgotamento nas reservas de petróleo nos países da Ocde, a desaceleração do crescimento da oferta nos subministradores tradicionais agrupados na Opep, e o crescimento acelerado da oferta fora dos países que não são da Ocde e a Opep, com maiores custos de produção.

Se analisamos que o 75% do aumento neto da oferta mundial de petróleo na última década vem dos produtores não tradicionais, vemos que isso implica um aumento dos custos pelo fato das novas infraestruturas necessárias, para transportar, receber e processar o petróleo.

Além disso, não podemos esquecer os fatores geopolíticos que afetam ao preço do petróleo. Primeiro foi a Primavera Árabe que influenciou aos produtores do norte da África, chegando a parar a produção do Líbia. Seguidamente os diferentes conflitos entre Europa, Estados Unidos e Iran o que produziram a parada de exportações aos países mesmos. Isso provocou até 15% de aumento nos preços.

Não podemos esquecer o esgotamento das reservas de petróleo mais fáceis de explorar

Consequentemente, os fatores comentados anteriormente não influem à energia eólica, tendo uma vantagem na variação de preços.

### **3. Tipos de cataventos.**

Geralmente, a principal classificação se faz conforme a disposição do eixo das turbinas: as turbinas de eixo vertical, e as turbinas de eixo horizontal.

### **3.1. Situação do eixo.**

- **Turbinas de eixo vertical.**

Os cataventos do eixo vertical se caracterizam principalmente pelo fato de sua construção, com um eixo vertical ao solo e ao a direção do vento. As principais vantagens que apresentam são as seguintes:

1. A possibilidade de poder colocar o gerador e o multiplicador no solo sem ter que utilizar uma torre, com os correspondentes custos eliminados.
2. Não precisa colocar um sistema de alienação para colocar as pás contra ao vento.
3. São mais silenciosas que os cataventos de eixo horizontal.
4. Tem a capacidade de geração de 360 graus, portanto, são mais eficientes nas zonas com ventos que não são muito consistentes.

Contudo, as turbinas do eixo vertical têm várias desvantagens que são as causas de sua menor utilização. As principais são as seguintes:

1. As velocidades do vento próximas ao solo são muitos mais baixas, conseqüentemente, assim que não precisam da torre, as velocidades do vento no rotor são mais baixas.
2. A maquina pode precisar de cabos para sua sustentação, o que produz um maior impacto médio ambiental e um aumento de custo do material.
3. Para a troca do rolamento principal, tanto as máquinas do eixo horizontal como as do eixo vertical, precisam de desmonte do rotor. De modo que, nas maquinas do eixo vertical isso implica um desmonte completo.
4. Geralmente têm uma eficiência 50% menor das turbinas do eixo horizontal.
5. A máquina não é de empuxo automático.
6. A manufatura das pás é mais complicada e custosa.

#### **Tipos de turbinas do eixo vertical**

- **Turbina de Darreus:** A turbina posse umas curvas de perfil aerodinâmico que estão sujeitas no eixo vertical. As pás são simétricas e tem zero angulo do aparelho. A turbina precisa ser arrancada pelo trabalho de um motor para funcionar já que não tem para de arranque. Seu rendimento e velocidade de giro são comparáveis com aos turbinas de eixo horizontal. Contudo, tem a desvantagem de que suas pás são submetidas a altas flutuações pelo efeito da sombra da torre. Alem disso, a sua estrutura precisa ser fixada ao solo mediante tensores, para assim, assegurar a estabilidade do catavento.

- **Turbina Giromills:** Provêm da patente de Darreus, e seu diferença é uma modificação nas pás, que passam a ser retas verticais unidas por uma barra horizontal. Trabalham muito bem na condição de muita turbulência .

▪ Turbinas de Savonius: Suas pás estão formadas por metade do um cilindro cortado pela sua geratriz, e mudados de forma lateral. Seu giro se produz pelo fato da diferencia de resistência ao avanço da parte movida pelo vento e da parte contra o vento. Tem a vantagem de seu par de arranque e seu fácil montagem, contudo, seu mal rendimento e a sua reduzida velocidade de giro fazem que sua aplicação seja principalmente a bombeamento pistão.

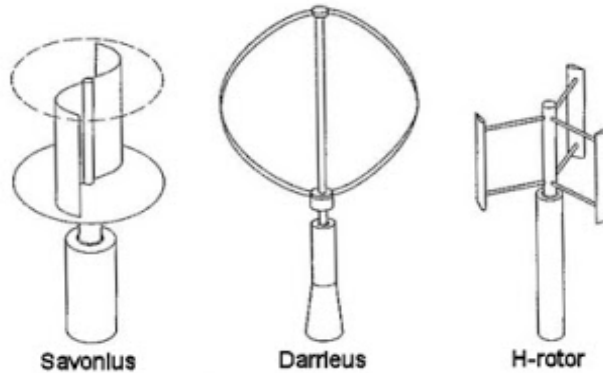


Ilustração 9 Tipos de cataventos de eixo vertical.

▪ **Turbinas de eixo horizontal.**

Os cataventos de eixo horizontal são os mais utilizados para alta geração de energia nos principais mercados como América, Europa e China. Têm o rotor e o gerador elétrico na parte superior da torre de sustentação. As principais vantagens que apresentam são as seguintes:

1. Nos desenhos de pás, a velocidade do rotor e a potencia de saída pode ser controlada mediante o controle de pitch. Além disso o controle de pitch é a melhor forma de proteção contra os ventos extremos.
2. Maior capacidade de geração de eletricidade com condições de ventos baixos.
3. Menor impacto médio ambiental
4. Podem trabalhar com velocidades do vento maiores que os cataventos de eixo vertical.
5. Maior eficiência.
6. Finalmente, o desenho favorece o maior desenvolvimento nas pás, um fator decisivo.

Contudo, também têm algumas desvantagens frente aos cataventos de eixo horizontal:

1. Maior complexidade na manutenção pelo fato de que o rotor e o gerador elétrico estão na parte superior da torre.
2. Maior índice de mortes provocadas aos pássaros.
3. Precisam de uma cola ou motor para direcionar as pás. Em consequência o custo aumenta.



Os cataventos de eixo horizontal se classificam de varias formas. As principais classificações são as seguintes:

1. Numero de pás
2. Rotor barlavento/sotavento
3. Tipos de controle

### 3.2. Número de pás

O número de pás é um fator importante pelo fato de que representa uma parte significativa no custo total do catavento. Dependendo da função final do catavento, se instala um número determinado.

Os **cataventos de duas pás** têm a vantagem do um preço mais baixo, assim como um peso inferior. Além disso tem a desvantagem de que precisam de uma maior velocidade para a geração de energia, por conseguinte um maior ruído.

As máquinas **de uma pá**, que ainda são mais baratas, têm os mesmos problemas mais acentuados. Ademais, precisam de um contrapeso no lado da bucha contrario a pá.

Além de tudo, os dois tipos de cataventos precisam de um tipo de rotor mais sofisticado, com um eixo basculante, para assim evitar que as pás batem na torre pelas sacudidas da turbina quando alguma das pás está a frente da torre.

Finalmente se apresenta um gráfico onde se pode ver o maior funcionamento dos cataventos tripala.

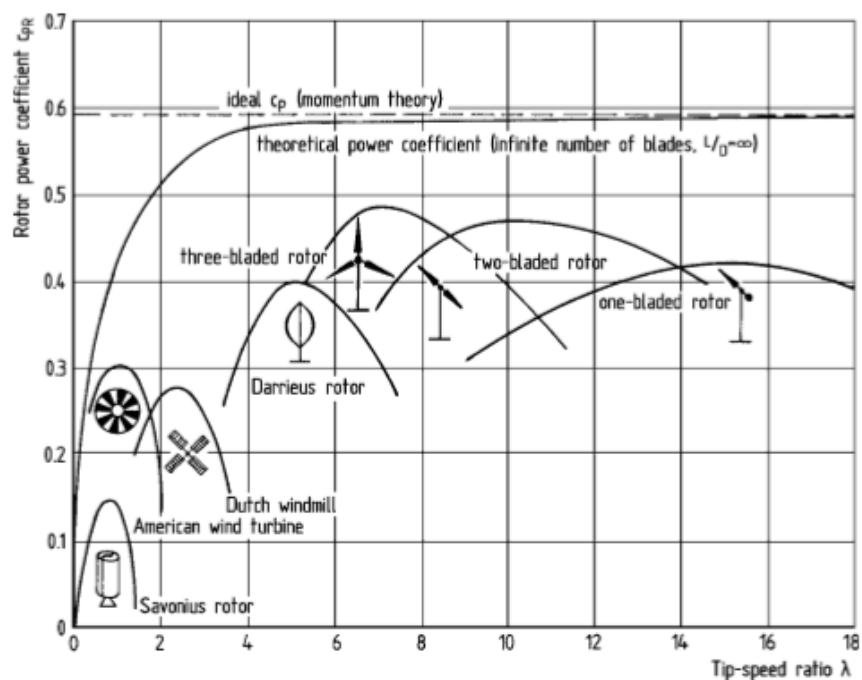


Ilustração 10 Variação do coeficiente  $c_p$  em função de  $\lambda$ .

No gráfico 10 se mostra a evolução do coeficiente  $C_p$  quando varia  $\lambda$  para os diferentes desenhos.

O fator de potencia  $C_p = \frac{P_{el}}{P}$  marca o cociente entre a potencia gerada pelo rotor, e a potencia que produziria o vento se não estiver o catavento.

O coeficiente  $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$  marca o cociente entre a velocidade tangencial,

e a velocidade do vento livre.

Assim se mostra a maior potencia de geração dos cataventos feitos com 3 pás, contudo

a instalação dependerá de outros fatores como o custo do projeto.

### 3.3. Rotor barlavento/sotavento

#### ▪ Rotor barlavento

Os cataventos com rotor ao sotavento são aqueles que têm seu rotor de costas (ESPALDAS) ao vento, e é a forma de construção mais comum no mercado. No primeiro lugar temos que saber que a torre produz abrigo ao vento detraís de ela, assim a potencia baixa enquanto uma pala está detraís da torre.

A maior desvantagem deste tipo de cataventos é o feito das palas, elas precisam ser mais rígidas para evitar batear á torre.

#### ▪ Rotor sotavento

São os cataventos que têm o rotor na cara sotavento da torre. Sua vantagem teórica é a suposta necessidade do mecanismo de orientação, quando o desenho do rotor e da gôndola são feitos para que a gôndola siga ao vento de forma passiva.

Contudo, isto não é uma completa vantagem nas grandes maquinas, pelo fato de que como a maquina segue a direção do vento, pode acontecer que só gire no mesmo sentido provocando a torção dos cabos internos necessários para levar a corrente fora. Nestes casos, não se pode instalar anéis coletores.

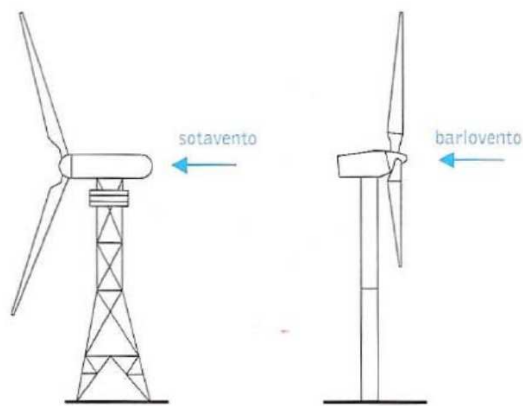


Ilustração 11 Tipos de cataventos barlovento/sotavento.

## 4. Tipos de controle de potencia.

Quando se tem altas velocidades do vento, a potencia capturada pela turbina excede a capacidade de resistência dos materiais com os que está feita a turbina. Se poderia suprir com um aumento do tamanho do catavento, o que aumentaria os custos de produção. Além disso temos que considerar o fato de que a potência de saída do catavento está delimitada pela máxima potência permitida pelo gerador.

Nos desenhos dos cataventos, o tamanho dos componentes, assim como os materiais com que estão feitos, estabelecem uns limites de tensão que não se podem superar. As altas velocidades do vento podem originar erros estruturais devido ao fato da superação dos limites de tensão. Além disso, a potencia de saída está delimitada pela potencia permitida pelo gerador.

Outro fator importante é manter a velocidade do rotor num valor constante ou entre valores determinados. Por exemplo, isso é chave quando o torque do rotor se perde e a velocidade cresce incontrolavelmente podendo originar a destruição da turbina. Consequentemente o rotor precisa de um controle aerodinâmico para seu ótimo funcionamento.

Pelo tanto, as forças aerodinâmicas de condução podem ser modificadas mediante a variação do ângulo de ataque, diminuindo a seção varrida pelas pás (variando o ângulo de Yaw ou trocando a orientação), ou variando a velocidade efetiva das pás do rotor. Como a velocidade do vento não pode ser modificada, a velocidade efetiva só pode ser mudada mudando a velocidade do rotor.

Pese a que a variação da velocidade do rotor pode ser uma forma de controle da potência do gerador, não é uma solução muito utilizada pelo fato de que o rango de velocidades do rotor é muito reduzido. Assim, na realidade, este tipo de controle só é um complemento. . (Hau, 2006)

## 4.1. Ângulo de passo. Controle de potencia aerodinâmico.

### ▪ Controle de potencia mediante o ângulo de *pitch*

A melhor forma de mudar o ângulo de ataque, e por tanto a potencia de entrada, é pela variação do ângulo de *pitch*. Isso consiste em girar a pala longitudinalmente mediante um sistema de controle atuador .

O sistema de variação do ângulo de ataque pode-se fazer de duas formas. O método mais utilizado é aumentar o ângulo de pitch (mais positivo) para assim diminuir o ângulo de ataque, dessa forma, se reduz a potencia da entrada, e se tem uma maior capacidade de ajuste á potencia desejada. A outra opção é diminuir o angulo de pitch (sendo mais negativo) para até chegar no ângulo critico de ataque, onde se produz o escoamento.

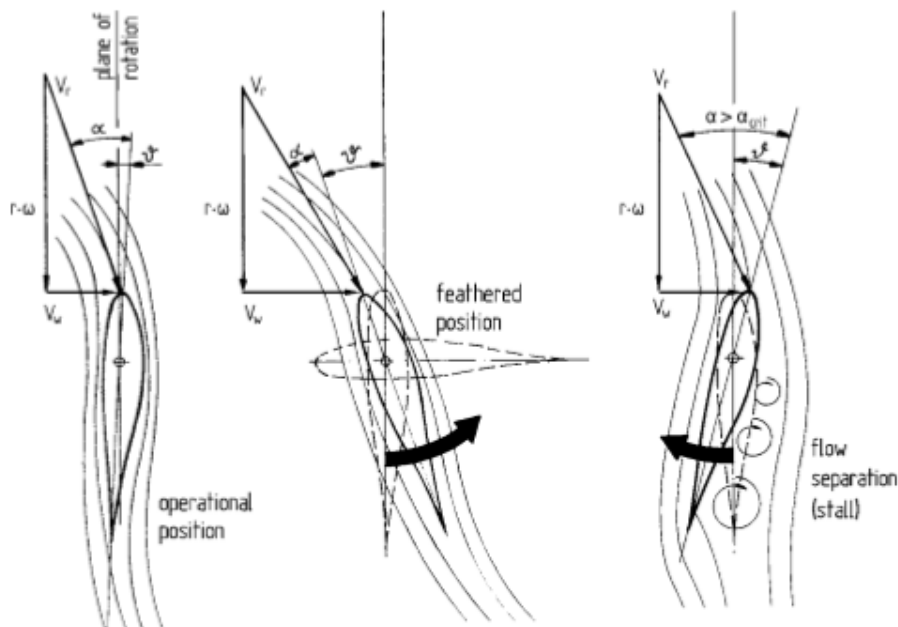
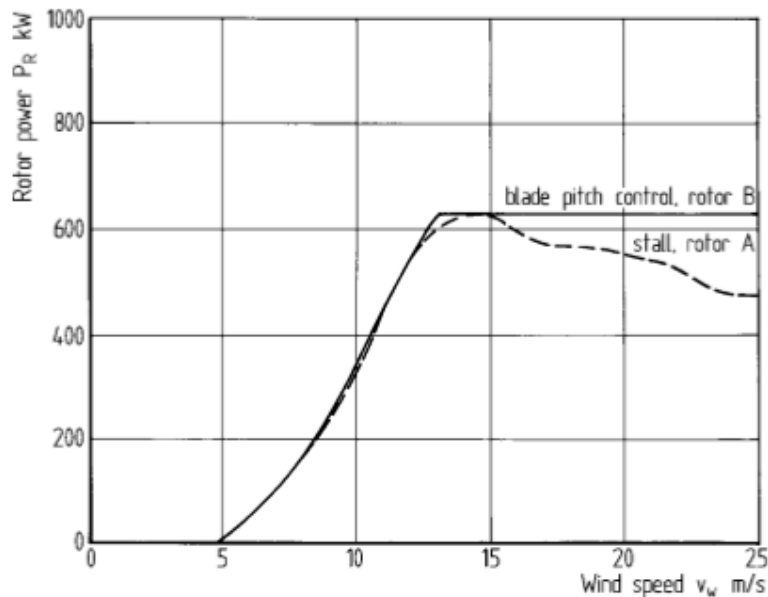


Ilustração 12 Controle de potencia mediante o angulo de pitch.

diminuindo a potencia de entrada. Este método se conhece como *stall*. Contudo, este ultimo método tem algumas desvantagens, como poder ser umas maiores tenções no rotor. Alem disso, a capacidade de geração de energia nas altas velocidades de vento é maior nos cataventos com um sistema de pitch que os cataventos com um sistema de stall (pela sua capacidade de adaptação), já como se apresenta na gráfica seguinte.

Para limitar as tenções ao controle de pich enquanto as rajadas, esta técnica se usa geralmente junto á velocidades variáveis.



**Ilustração 13** Potencia do catavento frente á velocidade do vento.

O mecanismo de pitch pode ser instalado no qualquer seção da pá, não se precisa de colocar na base da pá. Como sabemos, nas extremidades das pás, se produz a maior parte da potencia gerada, pelo tanto, se poderia pensar que colocar o mecanismo de pitch quase no final da pá (25-30%), seria suficiente. Contudo, o controle de pitch da pá completa é a seleção mais eficiente e satisfatória. Uma das causas é que nos cataventos com o sistema de pitch no longo da pá, as cargas estacionarias perto do eixo e no eixo são maiores. Além disso, temos que considerar o baixo torque de arranque nestes tipos de cataventos.

A solução de um controle de pitch ao longo da pá se utiliza nos cataventos de duas pás, pelo fato de que assim se pode construir o eixo e parte das duas pás numa só peça.

#### ▪ **Controle de potencia mediante *stall* passivo com ângulo de pitch fixo**

Outro método de controle de potencia consiste em quando se mantém a velocidade de giro e ângulo de pitch constante, e aumenta a velocidade do vento. Nas altas velocidades do vento a aerodinâmica das palas é o único método de limitar a potencia do rotor.

A franja de velocidades do vento onde o rotor vai iniciar a diminuir sua potencia de entrada geralmente começam a partir de 15 m/s.

A continuação se apresentam alguns das principais desvantagens do controle de stall passivo:

- A rigidez do rotor, e da turbina completa, deve ser mais maior pelas altas cargas aerodinâmicas. Isso produz a necessidade de componentes mais grandes e caros.

- O rotor deve ter um mecanismo de freio para evitar a perda de controle no caso de perda do torque. Nestes casos, o freio é liberado pela atuação de um sensor centrífugo.

- O rotor deve ter um bom par de arranque.

- O desenho aerodinâmico das pás do catavento com sistema de stall passivo são mais complicados.

- Em operação, o número de desvantagens aumenta à medida que se incrementa o tamanho do rotor.

- Falta de precisão. Não se conhece exatamente quando se produz a perda. Temos que considerar os diferentes fatores que podem influir na curva de potência destes cataventos, como por exemplo, a densidade do ar. Para evitar perdas na entrega de energia, um ângulo diferente de pitch deve ser selecionado com baixas densidades do ar, e a velocidade de giro também deve ser adaptada.



## 4.2. Ângulo de Yaw.

O ângulo de yaw se produz pela intersecção do plano formado pelas pás do rotor, e a direção de incidência do vento. É a medida mais antiga usada para a redução da potência de entrada do rotor. Atualmente, este sistema é muito comum nas rodas.

Um aumento do ângulo de yaw produz uma diminuição da área efetiva, assim se reduz a componente do ar perpendicular ao rotor. Na gráfica seguinte se apresenta a evolução do coeficiente de potência  $c_p$  com o aumento do coeficiente  $\lambda$  para diferentes ângulos de yaw.

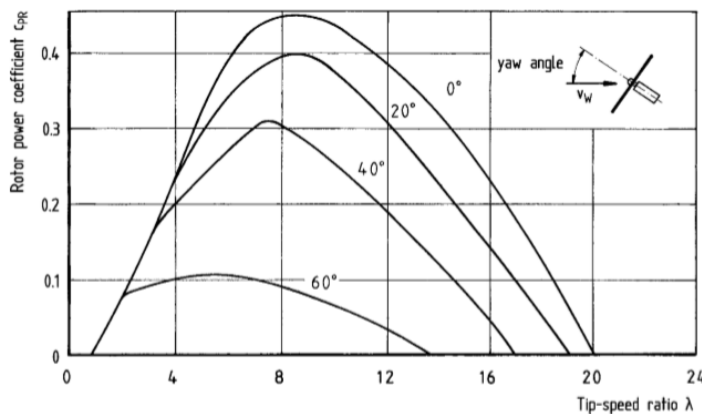


Ilustração 14 Coeficiente de potência  $c_p$  frente ao fator  $\lambda$ .

## 5. A Teoria do Elemento Pala de Glauert.

A teoria do elemento pala é outra alternativa para prever o rendimento do rotor. Foi proposta por Glauert em 1948, e neste método a pala se divide em um número determinado de partes independentes.

Na cada uma das seções se calculam as forças de sustentação e empuxo que aparecem pelo efeito do torque e do empuxo, além disso, se apresentam as equações do balance do momento angular e do momento axial. Depois, se realiza uma iteração com as equações disponíveis.

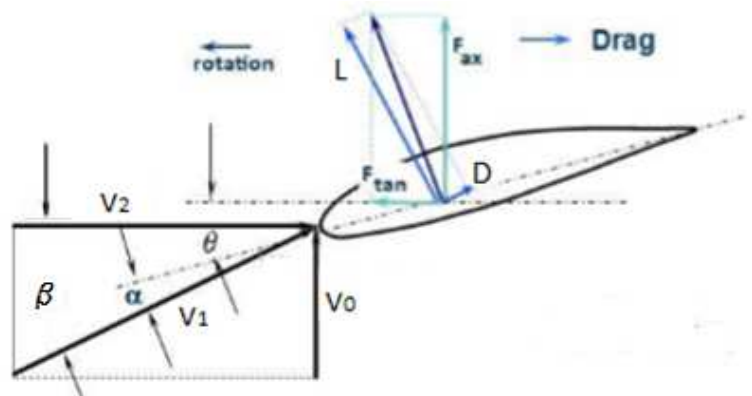
Nesta teoria se tem alguns fatores a considerar

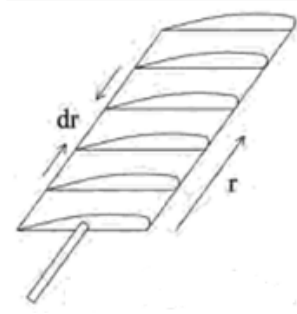
- As forças aerodinâmicas só dependem de  $C_D$  e  $C_L$ .
- Se considera ao ar como fluido ideal sem viscosidade e incompressível (densidade constante).
- Os cálculos se realizam no modo estacionário e com caudal constante.
- Se consideram velocidades uniformes nas seções paralelas ao rotor.

Além disso, a teoria não inclui efeitos em 3D como as velocidades induzidas pelos escoamentos e as componentes radiais do ar induzido pela aceleração angular devido ao rotação das pás. Assim, os resultados não são tão exatos como os de a teoria da linha de sustentação, onde em cada seção se tem em conta o efeito das velocidades induzidas pelas demais seções.

### 5.1. Estudo das forças

Na teoria do elemento pala de Glauert, em cada seção, se considera que só se tem velocidade com componentes axial e tangencial, tal e como se apresenta na seguinte figura.





**Ilustração 15 Perfil da pá. Análise de forças.**

Sendo;

$L$  : Força de sustentação

$D$  : Força de arrasto

$F_{tan}$  : Força tangencial. A causante do giro do rotor.

$F_{ax}$  : Força axial. Relacionada com o empuxo que sofre o catavento.

Cada uma das seções da pá tem um ângulo de pitch, ângulo  $\theta$ , que com a componente da velocidade marcará um ângulo de ataque, ângulo  $\alpha$ . Sendo a resta de ambos o ângulo  $\beta$ , ângulo definido pelas linha horizontal de referencia e a suma das velocidades axial e tangencial.

$$\beta = \theta - \alpha$$

Vendo a representação do perfil com as respectivas forças, vemos a seguinte relação;

$$\frac{F_{tan}}{r} = D \cos \beta + L \sin \beta \qquad F_{ax} = L \cos \beta - D \sin \beta$$

As componentes das forças de sustentação e de arraste se calculam da seguinte forma;

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V_1^2 c \cdot dr \qquad D = C_D \frac{1}{2} \rho V_1^2 c \cdot dr$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $c$  é a corda do perfil, pelo tanto,  $c \cdot dr$  é o área onde atuam as forças.

Considerando os ângulos mencionados anteriormente, e para um rotor que tem  $Z$  pás, as equações das forças tangencial e axial são as seguintes;



$$Q = F_{tan} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) \cdot Z \cdot r \cdot dr \quad (1)$$

$$T = F_{ax} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) \cdot Z \cdot dr \quad (2)$$

## 5.2. Estúdio das velocidades

Dentro das simplificações que a teoria tem, se incluem as aproximações para as velocidades que se mostram na figura 15,  $V_o$  e  $V_2$ .  $V_o$  se estabelece como a velocidade do vento livre, mas na realidade é menor pelo efeito tampa das palas .

A velocidade  $V_2$  pode-se igualar á velocidade de rotação  $\omega \cdot r$ , mas é menor pelo efeito do remoinho que surge enquanto o ar atravessa o rotor. (es mayor en el caso de un molino no?? ya que a la salida de las palas va aumentando la velocidad de rotación...)

Assim, as velocidades  $V_2$  e  $V_o$  têm a seguinte forma;

$V_o = V_{inf} - a \cdot V_{inf}$ , sendo  $a$  o fator axial.

$V_2 = \Omega \cdot r + b \cdot r \cdot \Omega$ , sendo  $b$  o fator angular.

Aplicando a conservação da quantidade de movimento, e considerando a incompressibilidade do ar, vemos como a velocidade na saída do catavento é menor pelo fato de que o área aumenta.

A velocidade resultante da soma das velocidade axial e a velocidade tangencial, com seu correspondente ângulo  $\beta$ , se obteve da seguinte forma;

$$V_1 = \sqrt{(V_o^2 + V_2^2)} \quad (3)$$

$$\alpha = \theta - \tan^{-1} \left( \frac{V_o}{V_2} \right) \quad (4)$$

### 5.3. Conservação do Momento Angular e do Momento Axial.

O princípio de conservação do momento do ar se pode aplicar na direção axial e na direção radial.

Na direção axial, a variação do momento ao longo do tubo, numa seção do disco do rotor, tem que ser igual ao empuxo recebido por este elemento de pá. Assim, a variação do momento axial é da forma seguinte;

$$\Delta T = \text{variação no momento axial} = \text{massa do fluxo de aire} \times \text{variação de velocidade} \\ = \rho 2\pi r dr V_o (V_{inf} - V_w)$$

Onde, *massa do fluxo de aire* =  $\rho \cdot \text{área} \cdot \text{velocidade}$ , e  $2\pi r dr$  é a seção onde se estuda a variação de empuxo.

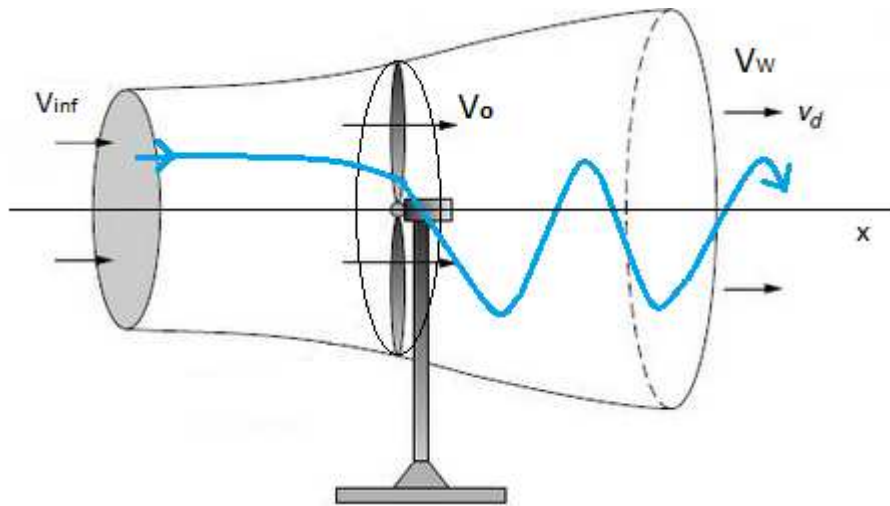


Ilustração 16 Estudo de velocidades.

Na figura 16 se mostra o volume de controle implicado para o estudo da conservação do momento axial. O volume de controle foi escolhido de tal forma que se expande ao través do rotor da aeroturbina pelo fato de que o vento diminui enquanto se acerca ao rotor, assim, para manter o caudal constante, a seção que determina o fluxo tem que aumentar.

Consequentemente o fator axial relaciona a velocidade no disco atuador, com a velocidade do vento livre.

$$a = \frac{V_{\infty} - V_o}{V_{\infty}}$$

Assim,  $V_o = V_{\infty}(1 - a)$ .

Considerando  $p^-$  a pressão do ar justo antes do disco atuador e  $p^+$ , a pressão justo depois, Aplicando a equação de Bernoulli e a conservação do momento para obter a seguinte igualdade:

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 = p^+ + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2(1-a)^2$$

$$p^- + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2(1-a)^2 = p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_w^2$$

Com as duas equações temos;

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_w^2) \rightarrow F_{ax} = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_w^2)A \quad (5)$$

Alem disso temos sabemos que o empuxe é

$$T = F_{ax} = \rho AU(U_\infty - U_w). \quad (6)$$

Pelo tanto, com as equações (5) e (6) chegamos ao seguinte,

$$\frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_w^2)A = \rho AV_\infty(1-a)(V_\infty - V_w) \rightarrow V_w = V_\infty(1-2a)$$

Finalmente,

$$\Delta T = \rho 2\pi r V_{inf}(1+a)(V_{inf}(1+2a) - V_{inf}). dr$$

$$\Delta T = \rho 2\pi r V_{inf}^2(1+a)2a. dr$$

$$\Delta T = \rho 4\pi r V_{inf}^2(1+a)a. dr \quad (7)$$

Anteriormente não tivemos em conta o efeito da rotação que sofre o ar depois de atravessar as pás, no momento no qual se exerce um par sobre o catavento, provocando o giro. Devido ao efeito de ação-reação o ar também experimenta um giro no sentido oposto ao disco.

Em quanto ao momento angular, vemos que o ar vai girar pelo momento que fazem as pás. Uma das considerações que se tem em conta nesta teoria, é o comportamento do ar, o qual girará pelo efeito das pás. O giro total se compõem de um giro antes de bater com as pás e um segundo giro depois de interpor-se às pás. Consideramos os giros induzidos iguais. Aproximação feita pela experiência do caso da conservação do momento axial. Assim o valor

da velocidade do giro na saída das pás, no pinto  $X=W$  será dobro que a velocidade no disco do catavento.

$$V_{\theta}(X = W) = 2b\Omega r$$

Para o momento angular,

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \text{variação no momento angular } \times \text{radio} \\ &= \text{fluxo do ar no tubo } \times \text{variação na velocidade circunferencial } \times \text{radio} \end{aligned}$$

$$\Delta Q = \rho 2\pi r dr V_o. (V_{\theta}(X = W) - 0(X = 0)).r \quad (8)$$

Finalmente, para resolução do sistema não linear composto pela equações (1), (2), (3), (4), (7) e (8), que contem as incógnitas  $F_{ax}$ ,  $F_{tan}$ ,  $a$ ,  $b$ , se utiliza um método iterativo.

## 5.4. Método iterativo

No método iterativo, no primeiro lugar se estima um valor para os parâmetros  $a$  e  $b$ , seguidamente se utilizam os parâmetros para obter as componentes da velocidade de entrada ao perfil,  $V_o$  e  $V_2$ , mediante as equações (3) e (4). O seguinte passo é, mediante os fatores característicos do perfil, utilizando as equações (1) e (2), obter os valores do empuxe axial e o valor de torque. Com esses valores obtidos, mediante as equações (7) e (8), se obtém os valores iniciais dos parâmetros  $a$  e  $b$ .

Obviamente, a convergência do método iterativo não está garantida. Quando os valores de  $a$  e  $b$  convergem, se obtém o valor do torque e de empuxe mediante as equações (1) e (2).

## 5.5. Calculo dos valores dos coeficientes de empuxe e torque. $C_T$ e $C_Q$ .

O valor total de empuxe e torque produzido por uma pá será calculado pela suma de cada valor obtido nas seções da pá.

$$T = \sum \Delta T \quad Q = \sum \Delta Q$$

Desta forma os valores dos coeficientes de empuxe e torque podem ser calculados.

$$C_T = \frac{T}{(\rho n^2 D^4)} \quad C_Q = \frac{Q}{(\rho n^2 D^5)}$$

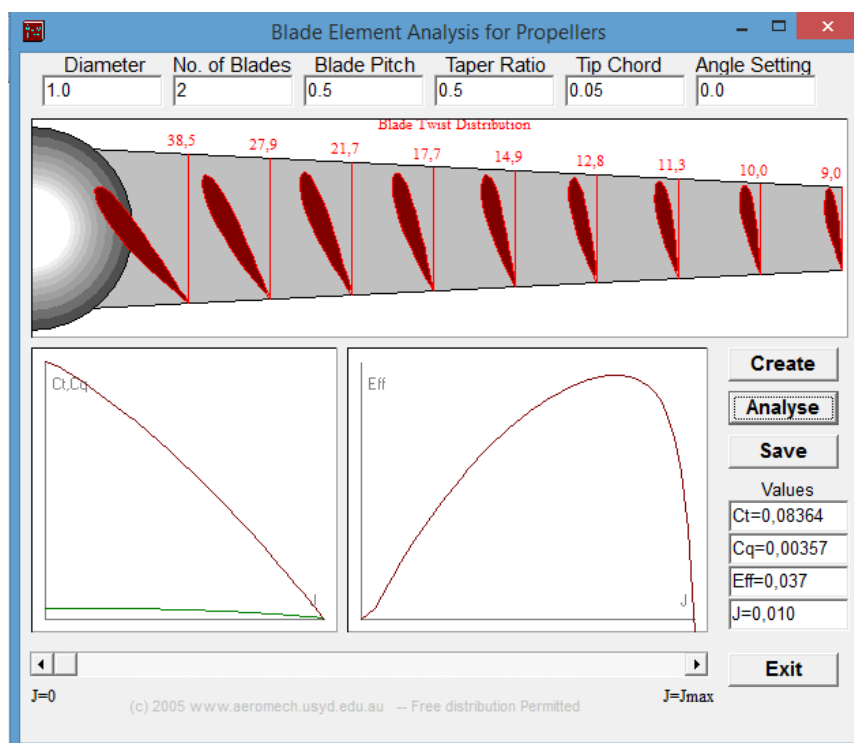
para  $J = \frac{V_{inf}}{(nD)}$ ; onde  $n$  é a velocidade de rotação da hélice em revoluções por segundo e  $D$  é o diâmetro da hélice.

A eficiência nestas condições é:

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{C_T}{C_Q}$$

## 6. Exemplo.

A continuação se mostra os cálculos feitos com o programa Propel, onde o calculo do Torque e Empuxe corresponde a um perfil standard.



Os análises dos diferentes tipos de perfis serão feitos com o programa PropCal e Open Prop.

**NOTA:** Os pontos dos objetivos não feitos serão parte do trabalho na entrega final.

## 7. Bibliografia

Associação Brasileira de Energia Eólica.

Camargo do Amarante, O. A., Brower, M., Zack, J., & Leite de Sá, A. (2001). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*.

Fried, L., Sawyer, S., Shukla, S., & Qiao, L. (2013). *Global Wind Report, Global Wind Energy Council (GWEC)*.

Global Wind Energy Council (GWEC) 2014.

Hau, E. (2006). *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*.

WIKIPEDIA.