

UMA INTRODUÇÃO AO APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA

Miguel H. Hirata

Departamento de Mecânica e Energia
FAT/UERJ - Campus de Resende.
Resende, RJ
hirata@fat.uerj.br

Instituto de Mecânica
UNIFEI –
Itajubá, MG.
hirata@unifei.edu.br

Este mini curso tem como objetivo apresentar as idéias básicas sobre o aproveitamento da energia dos ventos.

Desta maneira, o mini curso inicia-se com a inserção do aproveitamento da energia dos ventos num contexto mais amplo, o aproveitamento das fontes alternativas de energia. Neste contexto, os aspectos econômicos e aqueles relacionados com a ecologia devem ser considerados.

Sistemas eólicos e híbridos que operam isoladamente e sistemas eólicos (parques eólicos) inseridos na rede de uma distribuidora são analisados, assim como seus componentes principais.

A atenção é focada, a seguir, na análise aerodinâmica de um sistema eólico simples, onde se definem as configurações básicas de um sistema eólico, os diferentes tipos de rotores eólicos e as grandezas gerais de interesse que são necessárias para a caracterização aerodinâmica de um sistema.

O regime dos ventos, sua definição, o seu levantamento e utilização compõem a próxima etapa do mini curso.

Com a caracterização aerodinâmica do sistema e a definição do regime dos ventos, viabiliza-se a análise operacional de um sistema eólico; aspectos operacionais, cálculo da energia gerada, etc são assuntos abordados nesta parte.

1. Introdução

Os movimentos do ar na atmosfera são conhecidos como ventos. Em essência, os ventos resultam da radiação solar que aquecem a atmosfera terrestre de maneira irregular. Assim sendo, os ventos podem ser considerados, em última instância, como uma manifestação da energia solar.

A energia cinética associada ao movimento de massas de ar (vento) é denominada de energia eólica ou energia dos ventos. A captação desta energia disponível nos ventos é feita através do que se denomina de sistemas eólicos; estes captam a energia dos ventos e a convertem em alguma forma de energia (energia mecânica ou energia elétrica) para ser aproveitada pelo homem.

Os ventos, desta maneira, podem ser considerados como uma fonte alternativa de energia (às fontes tradicionalmente utilizadas como, por exemplo, a hídrica, aos combustíveis fósseis, etc.).

Assim como as demais fontes alternativas de energia, a energia dos ventos, em geral, é utilizada em situações específicas (sistemas isolados e distantes da rede de distribuição de energia, por exemplo) e como uma fonte que complementa a energia gerada pelas fontes tradicionais; este último aspecto, porém, tende a mudar uma vez que em vários países do norte europeu a energia eólica já representa um percentual elevado da energia total utilizada.

Pelas razões acima expostas, a opção pela utilização da energia dos ventos deve ser precedida por uma criteriosa análise que permita avaliar a sua viabilidade técnica e econômica. Em muitas situações, questões políticas e de conteúdo social se sobrepõem às avaliações econômicas; isto acontece, principalmente, quando se utiliza a energia eólica para suprir de energia as redes isoladas. A importância das criteriosas análises técnica e econômica deve sempre ser respeitada, uma vez que a disponibilidade da energia dos ventos é de difícil avaliação dada ao seu caráter altamente dependente das condições climáticas. Aliás, a energia dos ventos apresenta duas características bem marcantes: a primeira refere-se à baixa densidade energética, o que exige instalações (sistemas eólicos) de grande porte para sua captação e conversão em alguma forma de energia a ser utilizada. A segunda característica está associada ao caráter aleatório com que os ventos sopram; este representa um complicador a ser considerado na utilização da energia dos ventos.

Por outro lado, o conhecimento adquirido ao longo dos tempos teve como consequência um enorme desenvolvimento tecnológico. Deste modo, o aproveitamento dos ventos como uma fonte de energia pode ser considerado como uma realidade viável tanto do ponto de vista técnico como do ponto de vista econômico; em outras palavras, dispõe-se de uma tecnologia madura e economicamente competitiva. Este fato é particularmente importante e impar quando se considera o vento como uma fonte alternativa de energia.

Como será visto durante o curso, o aproveitamento da energia transportada pelos ventos é uma preocupação que remonta aos primórdios do desenvolvimento tecnológico; em vários momentos (e regiões) do desenvolvimento da humanidade os ventos representaram uma fonte importante de energia. No entanto, a crise energética da década de 70 pode ser considerada como a razão primeira para a retomada racional pelo interesse no aproveitamento das fontes alternativas e da energia dos ventos em particular. O aproveitamento dos ventos como fonte de energia tem crescido de maneira sistemática no mundo todo, nos últimos anos.

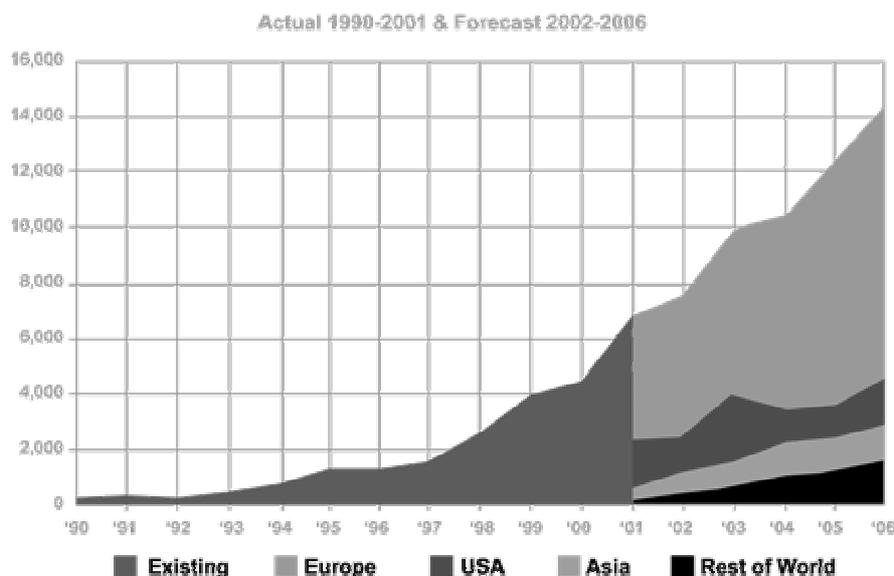


Figura 1.1. O aproveitamento da energia dos ventos e projeções para os próximos anos [1].

A Figura 1.1 ilustra claramente esta tendência e nela pode-se observar que as projeções para os próximos anos são, também, muito animadoras. Para isto, concorrem as novas fronteiras a serem exploradas, que são representadas pelas “fazendas eólicas” (conglomerados de turbinas eólicas interligadas formando uma verdadeira fazenda) instaladas em alto mar. No Brasil, as prospecções visando o aproveitamento da energia dos ventos tem sido muito intensas nos últimos anos e, as primeiras “fazendas eólicas” já são instaladas; estas prospecções mostram que o nosso potencial passível de ser explorado é enorme e ainda pouco conhecido. Como aconteceu em outros países, leis e incentivos específicos foram recentemente estabelecidos visando incentivar esta fonte de energia.

Completando esta rápida introdução, não se pode deixar de mencionar que os ventos como uma fonte alternativa de energia, não tem seu sucesso apenas por ser uma fonte técnica e economicamente viável. O aproveitamento da energia dos ventos é um aproveitamento ecologicamente correto; este aproveitamento não produz qualquer tipo de poluição, é perfeitamente compatível com outras atividades, não interfere com o meio ambiente e não produz qualquer risco conhecido.

2. O aproveitamento da energia dos ventos

O aproveitamento da energia transportada pelos ventos é uma preocupação que se verifica desde os tempos mais antigos. Teve sua importância em vários momentos e regiões como por exemplo quando a energia dos ventos foi utilizada para drenar as águas que inundavam os Países Baixos (Holanda), na conquista do oeste americano, etc.

A retomada do interesse racional pelo aproveitamento da energia dos ventos acontece na década de 70, motivada pela crise de energia que assola o mundo; desde então se observa um gradiente positivo quanto ao aproveitamento desta fonte de energia e as projeções mostram que este ímpeto deve continuar pelos próximos anos.

2.1. O aproveitamento da energia dos ventos através dos tempos

Os ventos encontram-se entre as primeiras fontes de energia exploradas pelo homem. Documentos antigos atestam que em 640 DC os ventos já vinham sendo utilizados na antiga Pérsia como fonte de energia mecânica.

Os primeiros sistemas eólicos foram construídos para a moagem de grãos, veja Figura 2.1. Estes sistemas possuíam rotores de eixo vertical, que era acoplado diretamente a um disco de pedra (a mó); os grãos colocados entre este disco e uma outra superfície plana eram “moídos”, obtendo-se a farinha.

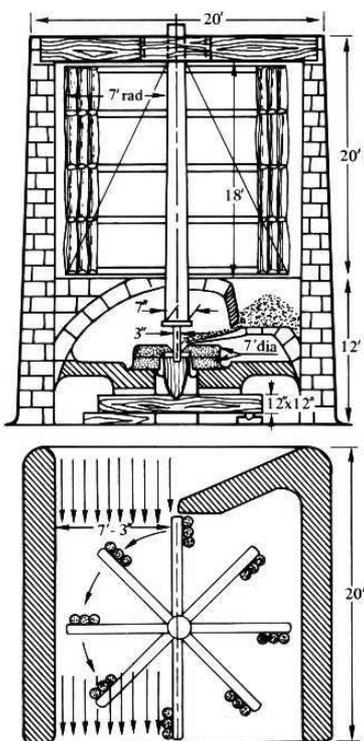


Figura 2.1. Moinho persa.

Somente no século 12 é que se observa a primeira grande inovação tecnológica quando, na Europa, é introduzido o “moinho de vento de eixo horizontal”; mais tarde este “moinho de vento” passou a ser conhecido como “moinho de vento holandês”, veja Figura 2.2. Os holandeses trouxeram este tipo de equipamento para os EUA, por volta de 1750, e o utilizava para a moagem de grãos e para o bombeamento de água.



Figura 2.2. Moinho holandês.

Pode-se considerar que o primeiro sistema eólico moderno foi introduzido na Dinamarca, por volta de 1900. Este sistema eólico era utilizado para a geração de eletricidade. Não se pode, também, deixar de mencionar os “moinhos de vento americanos”, que eram sistemas eólicos com rotores de múltiplas pás e eixo horizontal; mais de 6 milhões de unidades foram construídas e utilizadas no oeste americano para o bombeamento de água.

Nos tempos recentes, muitas iniciativas visando aproveitar a energia dos ventos foram observadas com diferentes graus de sucesso. Cabe mencionar as experiências de Jacobs (1930) e Smith-Putnam (1941) nos EUA, a experiência de Balackava (1931) nas vizinhanças de Yalta no Mar Negro, o sistema Gedser (1950), na Dinamarca e a turbina alemã Hutter (1950-60).

A Tabela 2.1 mostra os principais marcos observados no aproveitamento da energia dos ventos. Esta tabela indica que a crise energética que assolou o mundo na década de 70 serviu como ponto de partida para que se voltasse a atenção para as fontes alternativas de energia e em particular para a energia eólica. O interesse é centrado nas fontes não poluentes, uma característica que se torna mais marcante a partir dos anos 80.

Programas governamentais visando incentivar a utilização destas fontes limpas, que não agridem o meio ambiente, foram estabelecidas em vários países. Estes programas tinham como objetivo a utilização dos ventos como uma fonte de energia e, também, o desenvolvimento tecnológico e de pesquisas. Nos EUA observa-se uma popularização da energia dos ventos, na Dinamarca desenvolve-se uma forte indústria para a produção de sistemas eólicos, o mesmo acontecendo na Alemanha e mais recentemente na Espanha. No Brasil as primeiras iniciativas são observadas na década de 80, mas só recentemente estabelece-se um programa oficial – o PROINFA .

Tabela 2.1. Cronologia do aproveitamento da energia dos ventos.

600	Primeiros sistemas eólicos de eixo vertical, Pérsia.
1100	Moinho de Vento Holandês para bombeamento de água
1900	Aerogeradores para gerar eletricidade para rádios
1926	Sistema eólico Fletner
1929	Apresentado o projeto do rotor Savonius de eixo vertical
1930	Apresentado o projeto dos irmãos Jacobs
1931	Turbina russa de 100Kw construída em Balaclava
1931	O National Research Council (USA) avalia o projeto do rotor Darrieus
1941	Turbina Smith-Putnam é construída em Grandpa' Knob, Vermont
1954	Turbina francesa Enfield-Andreau de 100Kw
1957	Turbina dinamarquesa Gedser
1961	Turbina alemã Hutter com avançado projeto aerodinâmico
1970	Crise mundial de energia
1975	Turbina americana de 100Kw é desenvolvida pela NASA
1976	Turbina americana MOD-0
1980	Início da era moderna: utilização do conceito de fazendas eólicas
2000	As fazendas eólica são instaladas no mar.

2.2. O aproveitamento da energia dos ventos e suas perspectivas

Diferentes fóruns, recentemente realizados, apontam para a necessidade da utilização crescente de fontes renováveis e não poluidoras de energia; como exemplo menciona-se a Conferência Rio 92, a Rio + 10 (realizada no Rio de Janeiro em 2002), a Terceira Conferência das Partes (COP 3) da United Nations Framework Convention on Climate Change , em Quioto, Japão, em 1997, etc.

A Figura 1.1 ilustra o desenvolvimento da utilização da energia dos ventos como fonte energética; pode-se observar que, a partir de 1995, houve um crescimento acentuado da utilização desta fonte de energia e, nos últimos anos, este crescimento foi ainda mais acentuado.

As projeções indicam que até o ano 2006, a potência dos sistemas eólicos instalados no planeta deverá ultrapassar os 79.000 MW, sendo que a Europa sozinha, deverá responder por cerca de 54.000 MW; para maiores detalhes veja a Tabela 2.2.

Como observação final a respeito das perspectivas da utilização da energia eólica, cabe mencionar a nova fronteira que se descortina com o desenvolvimento da tecnologia para a instalação e operação de sistemas eólicos “offshore”. De fato, a exploração da energia eólica no mar torna-se uma realidade e observa-se atividades frenéticas visando a implantação de “fazendas eólicas” no Mar do Norte.

Tabela 2.2. Tabela potência instalada e projeções (MW).

TABELA 2.2 [1]			
POTÊNCIA INSTALADA E PROJEÇÕES (MW)			
	TOTAL	INSTALADO 2001	PROJEÇÃO 2006
USA	4.245	1.635	11.945
Canadá	214	75	1.214
América do Sul e Central	134	35	1.434
TOTAL DAS AMÉRICAS	4.593	1.745	14.593
Alemanha	8.734	2.627	20.484
Espanha	3.550	1.050	11.850
Dinamarca	2.456	115	3.606
Itália	700	276	2.250
Reino Unido	525	107	3.875
Holanda	523	52	1.348
Grécia	358	84	1.198
Suécia	318	53	1.718
Portugal	153	42	653
Irlanda	129	7	729
França	115	52	3.665
Áustria	86	17	286
Finlândia	40	1	365
Bélgica	34	15	229
Turquia	19	0	249
Noruega	17	4	787
Suíça	5	2	125
Outros	51	23	651
TOTAL DA EUROPA	17.812	4.527	54.067
Índia	1.456	236	4.256
China	406	54	1.706
Japão	357	217	1.657
Outros	18	4	118
TOTAL DA ÁSIA	2.237	511	7.737
África do Norte	137	0	912
Austrália + Nova Zelândia	106	41	1.156
GUS	20	1	530
Oriente Médio	18	0	235
Outros	5	0	115
TOTAL GERAL	286	42	2966
TOTAL OUTROS CONTINENTES	24927	6824	79362

O Brasil adotou um Programa Emergencial de Energia Eólica – PROEÓLICA –, resolução 24, de 5 de julho de 2001 para promover a utilização da energia eólica no país. Este programa tem como objetivo “viabilizar a implantação de 1.050 MW até dezembro de 2003, de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, integrada ao sistema elétrico interligado”, justificando-se este programa como uma “alternativa de desenvolvimento energético, econômico, social e ambiental e como promotor da complementaridade sazonal com os fluxos hidrológicos nos reservatórios do sistema interligado nacional”.

Posteriormente, através da lei 10.438 de 26 de abril de 2002 foi criado o PROINFA – Programa de Incentivo ao Uso de Fontes Alternativas de Energia visando aumentar a participação das fontes, eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas na matriz energética brasileira. Esta lei, regulamentada em 23 de dezembro de 2002, prevê a contratação pela Eletrobrás de 3.300 MW de energia gerada através destas três fontes.

Até o momento, o país conta com 22.000 KW já instalados e em operação. Adicionam-se a este valor, cerca de 6.000 MW em parques eólicos já autorizados pela ANEEL, com previsão para entrarem em operação principalmente em 2005 e 2006.

Estes fatos apontam para a necessidade premente da formação de recursos humanos (RH), altamente qualificados para planejar, projetar, construir, implantar e operar os sistemas eólicos que irão gerar eletricidade a partir dos ventos.

De fato, estima-se que haverá uma demanda de aproximadamente uma centena de técnicos qualificados (com especialização em diferentes áreas relacionadas ao aproveitamento da energia dos ventos) por ano, nos próximos 10 anos, para suprir as necessidades do mercado nacional.

3. Os Ventos

Os movimentos do ar na atmosfera são genericamente denominados de ventos. Estes movimentos ocorrem porque o aquecimento do ar na atmosfera é feito de maneira irregular.

A fonte de calor, responsável pelo aquecimento do ar na atmosfera é o sol.

3.1. Origens

Pode-se dizer que os ventos constituem-se numa das conseqüências da incidência da radiação solar, isto é, a energia cinética transportada pelos ventos é, em última análise, uma forma com que se apresenta a energia solar.

A Figura 3.1. mostra como se distribui a energia solar incidente na Terra.

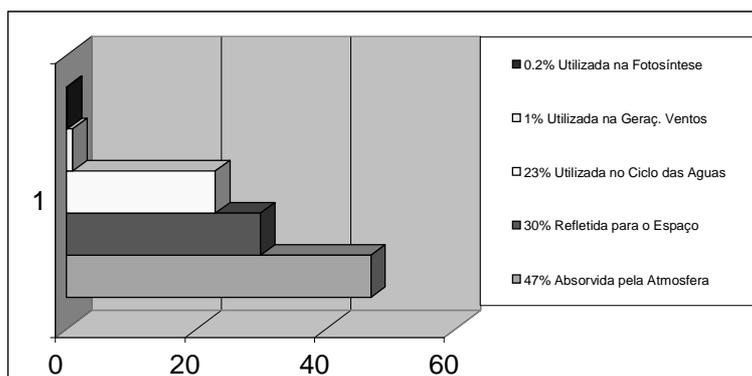


Figura 3.1. Distribuição da energia solar incidente na terra.

Uma parcela da energia irradiada pelo sol atinge a Terra numa razão de 1.4 Kw/m². Parte desta energia é refletida de volta para o espaço e a outra parte atravessa a atmosfera e, praticamente, não a aquece. Explica-se este fato lembrando que a radiação solar realiza-se com um comprimento de onda muito curto - da ordem de 4µm - uma vez que a superfície solar possui uma temperatura muito alta.

A energia solar atinge da Terra aquecendo-a, evapora a água dos oceanos, rios e lagos, serve para viabilizar a fotossíntese. A superfície aquecida da Terra (evidentemente, a uma temperatura muito inferior à superfície solar) é responsável pela radiação terrestre que se realiza com um comprimento de onda - da ordem de 20µm - maior do que o comprimento de onda da radiação solar, estando, portanto, apta a aquecer as partículas de ar da atmosfera.

O albedo é a grandeza utilizada para caracterizar a razão entre a radiação terrestre e a solar. Um baixo valor do albedo - da ordem de 6% -, como ocorre nos oceanos, significa que boa parte da radiação solar é absorvida pela superfície e que, por conseqüência, a radiação terrestre é baixa. Por outro lado uma absorção baixa, como ocorre na neve, corresponde a um alto valor do albedo, que é da ordem de 70%. Nas florestas o albedo assume um valor intermediário - da ordem de 20%. Verifica-se, portanto, que parte da irregularidade no aquecimento da atmosfera pode ser creditada a variação do albedo.

3.2. Mecanismos

O aquecimento irregular da atmosfera não é suficiente para explicar todos os complexos mecanismos responsáveis pela manifestação dos ventos.

Como será visto a seguir existem muitos mecanismos e fatores que interferem nos ventos. De uma maneira geral, pode-se considerar os ventos que sopram em escala global e os ventos que ocorrem em escalas menores as escalas locais.

3.2.1. Circulação global

Os grandes movimentos de ar (ventos) que se manifestam em escala global podem ser creditados à orientação dos raios solares com relação à Terra; o eixo de rotação da Terra encontra-se inclinado de 23º30' com relação ao plano de sua órbita ao redor do sol.

Estes movimentos do ar ocorrem na parte inferior da nossa atmosfera que contém aproximadamente 4/5 de toda a massa de ar e é denominada de troposfera. Esta camada possui uma espessura que varia entre 7km (nas regiões polares) e (pode atingir) 17 km, no equador. De uma maneira geral, pode-se assumir que a tropopausa que separa a troposfera situa-se em média a uma altitude de 11 km.

O ar se aquece nas regiões tropicais e tende a subir. Nas camadas inferiores, ele é substituído pelo ar frio que se desloca das regiões polares. Se este fosse o único mecanismo presente teríamos a formação de duas células, uma em

cada hemisfério, compondo o sistema de ventos que se denomina de Sistema de Circulação Global. Como ilustra a Figura 3.2A, no hemisfério norte, os ventos tomam a direção sul norte e retornam, junto à superfície da Terra, na direção norte sul. No hemisfério sul, os ventos assumem a direção norte sul para retornar, junto a superfície da Terra, na direção sul norte. Este mecanismo simplificado de circulação global é conhecido como Modelo de 2 Células.

Observa-se porém, que, no seu movimento em direção aos pólos, a temperatura das partículas de ar decresce rapidamente (1oC a 2oC por dia) e, após percorrer aproximadamente um terço da distância total, a temperatura já é suficientemente baixa e o ar começa seu movimento descendente. Parte da massa de ar descendente dirige-se em direção ao equador formando a célula tropical (uma em cada hemisfério) e o restante em direção aos pólos. A parcela da massa de ar que se dirige aos pólos, junto à superfície da Terra, sofre um novo aquecimento e assume um movimento ascendente para formar a célula temperada (uma em cada hemisfério). Novamente uma parcela deste ar ascendente toma a direção polar formando a célula polar (uma em cada hemisfério).

O movimento de rotação da Terra, porém, é responsável por três efeitos que modificam o simplificado panorama descrito acima.

O primeiro efeito, pouco influi na modificação do sistema descrito e consiste na compensação parcial da gravidade, causada pela aceleração centrífuga.

O segundo efeito está associado à força de Coriolis que atua sobre as partículas de ar. Esta força acelera as partículas de ar para a direção normal à direita de seu movimento, no hemisfério norte, enquanto o faz para a esquerda, no hemisfério sul. O resultado deste efeito faz-se sentir através dos ventos geostróficos que são observados, principalmente, em altitudes superiores a 600m.

De maior importância para o aproveitamento da energia eólica é o que se observa nas camadas inferiores da atmosfera, conseqüência direta da viscosidade que tende a manter as partículas de ar girando com a Terra. Este fato lhes imprime uma quantidade de movimento angular orientada de oeste para leste. À medida que as partículas se movem para os pólos elas também se aproximam do eixo de rotação da Terra e, para que a quantidade de movimento seja preservada, é necessário que assumam uma velocidade na direção de oeste para leste. Este efeito é muito pequeno nas vizinhanças do equador, mas torna-se bastante relevante nas zonas temperadas. O modelo descrito é ilustrado na Figura 3.2B, e é conhecido como Modelo de 6 Células.

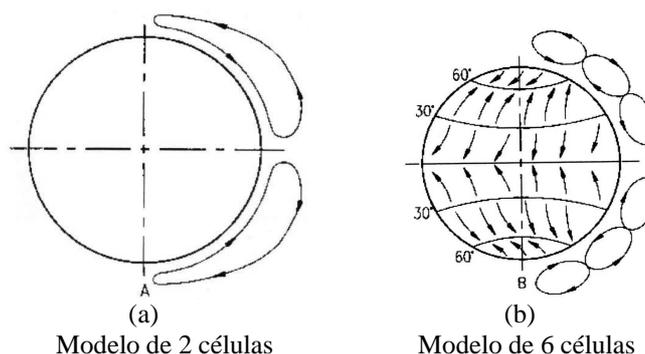


Figura 3.2. Modelos de circulação global.

As células de Hadley (ou tropicais) são formadas por ar quente que ascende na região equatorial, formando um sistema de baixa pressão na faixa de latitudes 10o S e 10o N.

O ar aquecido move-se, nas camadas superiores, em direção aos pólos até aproximadamente uma latitude de 30o, quando descem formam um sistema de alta pressão.

As células de Ferrel (ou de Latitudes Medianas) formada pelo ar descendente nas latitudes de 30o, transporta o ar quente até aproximadamente as latitudes de 60o, onde se encontram com o ar frio proveniente dos pólos.

As células polares constituem-se nos sistemas celulares mais fracos e trazem o ar frio dos pólos que é captado pelas células de Ferrel e distribuído pelas latitudes medianas. Veja Figura 3.3.

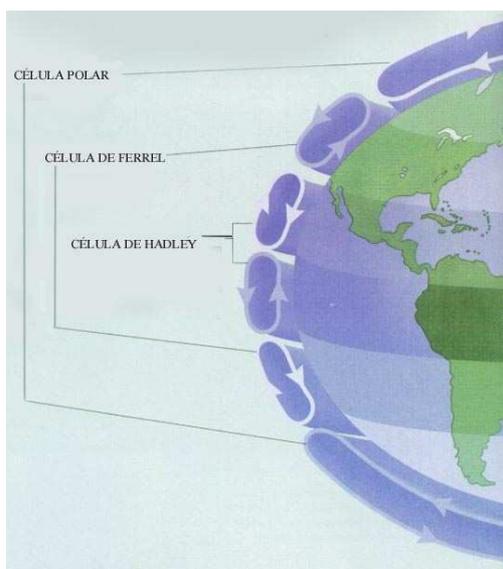


Figura 3.3. As seis células principais.

A força de Coriolis, nas latitudes dominadas pelas células de Hadley, faz com que os ventos junto à superfície soprem vindo da direção nordeste; são os ventos alísios no hemisfério norte e no hemisfério sul. Os ventos alísios alimentam a zona tropical de baixa pressão. Veja Figura 3.4.

Nesta zona de baixa pressão, localizada onde as células de Hadley se encontram, o ar quente e úmido sofre um movimento convectivo ascendente e, ao ganhar altura, resfria-se condensando o vapor d'água com a sua precipitação em forma de chuva. Nesta região, aparece um sistema de baixa pressão, resultando em calmarias conhecidas como doldrames.

Nas regiões subtropicais, perto das latitudes de 30o, surgem sistemas de alta pressão resultante do movimento descendente do ar das células de Hadley. Estas regiões caracterizam-se por possuírem índices pluviométricos baixíssimos, onde se encontram as regiões mais áridas do planeta: desertos do Saara, de Gobi e do México, no hemisfério norte, e desertos da Austrália e Kalahari, no hemisfério sul. Estas regiões são conhecidas, também, zona de calmarias subtropicais.

Nas regiões de latitude mediana, sopram os ventos orientais ou de oeste.

Nas regiões polares, sopram os ventos ocidentais, que são de um frio penetrante devido às origens geladas dos pólos.

3. 2.2. Ventos locais

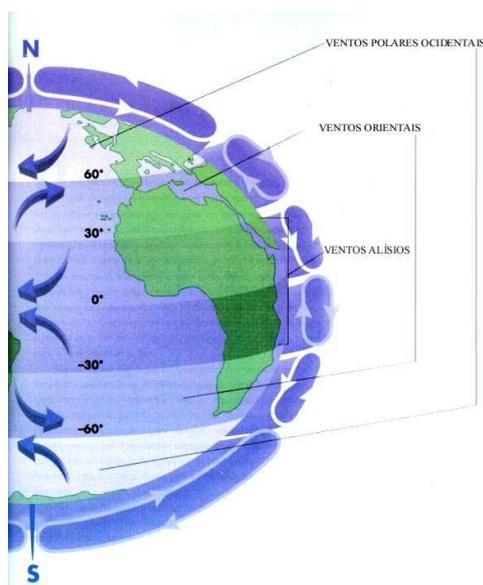


Figura 3.4. Os ventos, em escala global, que sopram na superfície da terra.

3. 2.2. Ventos locais

Ventos locais caracterizam-se por se manifestar em pequena escala. São, no entanto, de grande importância para a determinação precisa dos sítios onde os sistemas eólicos são instalados.

Talvez a mais conhecida manifestação local dos ventos acontece nas regiões costeiras de oceanos e lagos; nestes locais são observadas as brisas marinhas e terrestres.

Quando comparada com a água, a terra possui uma capacidade maior de refletir os raios solares. Como consequência, durante o dia, a temperatura do ar sobre a terra aumenta mais do que sobre a água e sobe. Forma-se uma corrente de ar, do mar para a terra, para substituir o ar que subiu; é a brisa marinha, como ilustra a Figura 3.5.

À noite a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, estabelece-se a brisa terrestre que sopra da terra para o mar, Figura 3.6. Normalmente, a brisa terrestre possui uma intensidade menor que a marítima devido a menor diferença de temperatura que se estabelece no período noturno.

Outra manifestação local dos ventos é observada nos vales encravados entre morros e montanhas, veja Figura 3.7.

Durante o dia o ar quente e normalmente úmido viaja paralelamente à superfície da terra, empurrado por ventos de alta pressão. Nas encostas das montanhas eleva-se perdendo gradualmente a temperatura; eventualmente o vapor se condensa em gotas de água. O ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu.

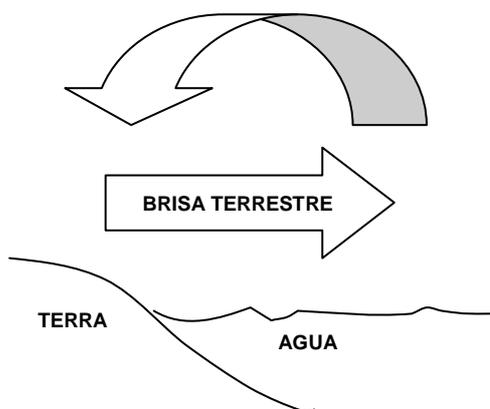


Figura 3.5. Brisa marinha.

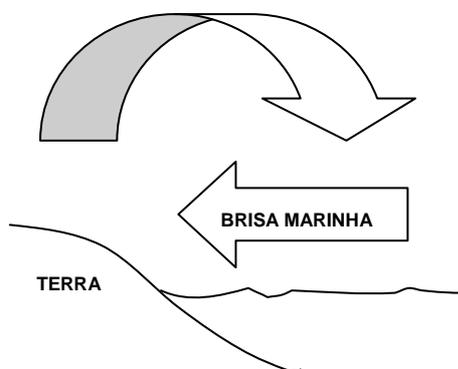


Figura 3.6 brisa terrestre.

No período noturno, novamente a direção em que sopra os ventos é revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

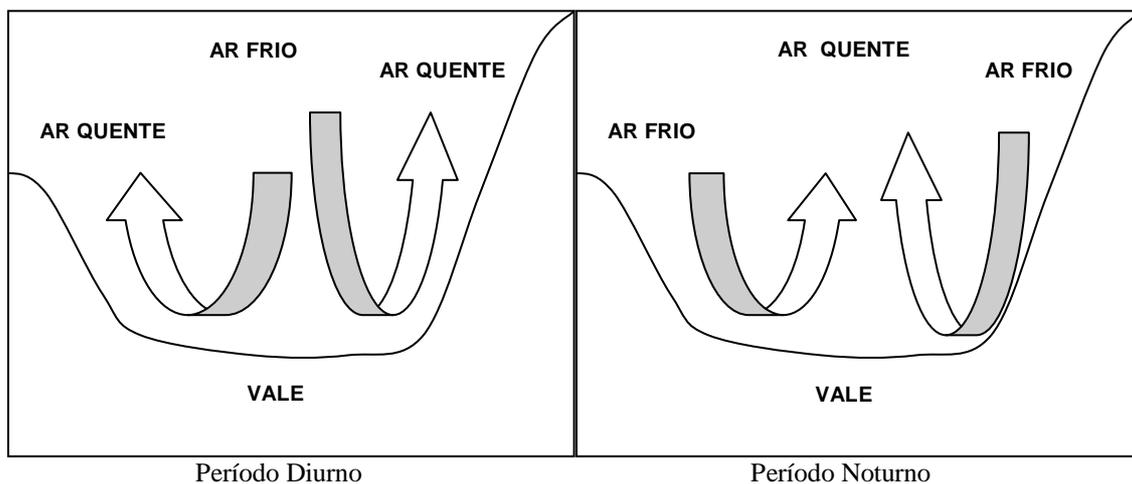


Figura 3.7. Vales e montanhas.

3. 3. Variação espacial da velocidade dos ventos

Os ventos, vistos como uma manifestação da energia solar e os mecanismos por eles responsáveis permitem antever a complexidade da análise dos ventos.

Não é difícil concluir que os ventos variam no espaço e no tempo. A análise da variação espacial dos ventos e suas causas e efeitos são apresentados a seguir. A análise da variação temporal dos ventos será apresentada mais tarde ao se estudar o regime dos ventos.

Para os fins imediatos a variação espacial de interesse é aquela que se manifesta com a altura, a partir do solo.

Dois aspectos são relevantes; a altitude (medida em escala global) é importante porque possui influência direta sobre a massa específica do ar e a altura (medida em escala local) porque possui influência sobre o posicionamento (altura da torre) do rotor eólico.

3.3.1. A camada limite

Os livros textos de Mecânica dos Fluidos mostram que a propriedade dos fluidos conhecida como viscosidade é responsável por grande parte dos fenômenos mais importantes que ocorrem no interior de uma massa de fluido em movimento.

Estes fenômenos são mais marcantes nas vizinhanças das fronteiras do fluido, principalmente quando esta fronteira é representada por uma superfície sólida. Experiências cuidadosamente realizadas em laboratórios mostram que o fluido em contato com uma superfície adquire a velocidade desta; este fato é conhecido como condição de aderência.

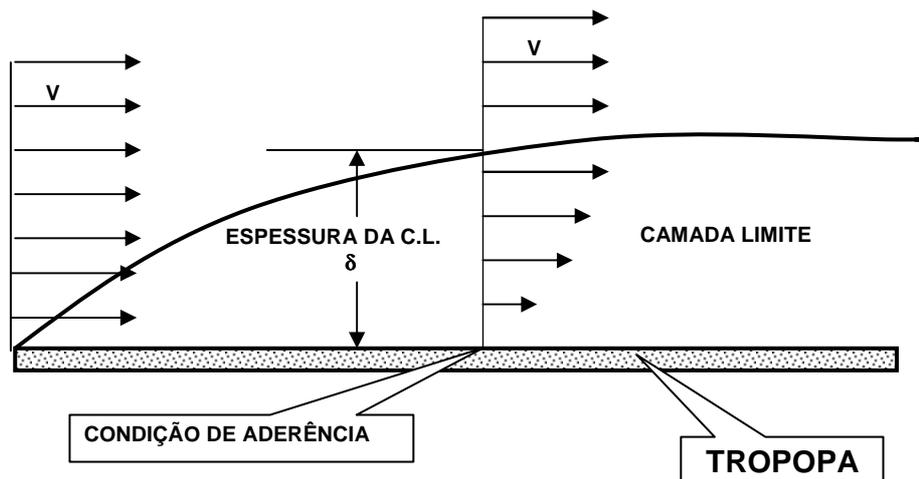


Figura 3.8. Camada limite sobre uma placa plana.

A condição de aderência faz com que a viscosidade atue de maneira marcante numa fina camada de fluido junto à superfície; esta camada é denominada de camada limite.

No interior desta camada a taxa de variação (gradiente) da velocidade é muito grande uma vez que ela assume o valor zero na superfície e cresce rapidamente até atingir a velocidade do fluido não perturbado. A figura 3.8 apresenta um perfil de velocidades típico encontrado sobre uma placa plana; ela ilustra como a velocidade distribui-se com a distância da placa. A espessura da camada limite, indicada por δ , assume valores muito pequenos e depende de vários fatores como as propriedades do fluido, a maneira como as partículas de ar se movimentam, a distribuição espacial da rugosidade da superfície, etc.

O escoamento no interior da camada limite é regido basicamente por dois tipos de força: a força inercial (que depende da velocidade e da massa específica do fluido) e da força viscosa (que, obviamente, depende da viscosidade do fluido, caracterizada pelo coeficiente de viscosidade, μ).

Quando há um predomínio das forças viscosas sobre as forças inerciais (o que, geralmente, ocorre quando as velocidades são baixas) as partículas de fluido movimentam-se de maneira ordenada e o escoamento é dito laminar. Um parâmetro importante e que é utilizado para caracterizar a importância relativa das forças mencionadas é o número de Reynolds, que é definido como:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad L \rightarrow \text{é um comprimento característico}$$

$V \rightarrow$ é uma velocidade característica

Se o número de Reynolds assume valores baixos, isto é, se $Re < 3000$ o escoamento é dito laminar.

Karman, 1921, ao analisar o comportamento da camada limite laminar assumiu que o perfil de velocidades possui uma forma parabólica e é descrito pela expressão:

$$\left. \frac{u(z)}{V} \right|_{\text{lam}} = \left(\frac{2z}{\delta} - \frac{z^2}{\delta^2} \right) \quad 0 \leq z \leq \delta$$

A utilização deste perfil produz resultados bastante satisfatórios para simular os fenômenos no interior de uma camada limite laminar de uma placa plana. A tabela apresentada, a seguir, fornece alguns valores calculados como exemplo:

$z \sqrt{\frac{\rho V}{\mu x}}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	4.0
$\frac{u(z)}{V}$	0.0	0.066	0.133	0.190	0.265	0.329	0.629	0.955

Ao se aumentar o valor do número de Reynolds (o que, em geral, é obtido com o aumento da velocidade) o escoamento começa a apresentar perturbações que destroem o movimento ordenado das partículas de fluido. Tem-se, inicialmente, o regime de transição cuja complexidade praticamente inviabiliza a sua análise.



De uma maneira geral, aumentando-se ainda mais a velocidade, as forças inerciais começam a dominar o cenário em detrimento das forças viscosas. Quando o número de Reynolds assume valores elevados ($Re > 10^4$) o escoamento é classificado como turbulento.

Nesta situação o movimento das partículas de fluido é completamente desordenado e caótico.

Para a análise do escoamento turbulento, costuma-se decompor a velocidade num valor médio que é somado a sua flutuação, isto é:

$$u = \bar{u} + u'$$

e, para quantificar a intensidade da turbulência, utiliza-se o valor médio do quadrado a flutuação

$$\overline{u'^2} = \text{intensidade da turbulência}$$

Como era de se esperar, a análise da camada limite turbulenta é muito mais complexa do que a correspondente para o caso laminar.

Como naquele caso, existe uma proposta simples para a forma do perfil de velocidades quando o regime é turbulento. Prandtl assumiu que o perfil de velocidades turbulento, na camada limite que se forma sobre uma placa plana, pode ser representado por uma lei de potência:

LEI DE 1/7

EFEITOS DA RUGOSIDADE

$$\frac{u(z)}{V} \Big|_{\text{turb}} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^{1/7} \quad \frac{u(z)}{u(z_r)} \Big|_{\text{turb}} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^n$$

onde $u(z)$ representa a velocidade (dentro da camada limite) calculada a uma distância z , V é a velocidade do escoamento incidente e δ é a espessura da camada limite. Esta lei é conhecida como a Lei de Potência (1/7). Esta expressão foi generalizada para incluir os efeitos da rugosidade da superfície da placa; estes efeitos estão embutidos na potência n da expressão da direita.

Numa distribuição típica (perfil de velocidades) que se encontra numa camada limite laminar a velocidade varia continuamente a partir da superfície até os limites desta camada, enquanto que no regime turbulento a velocidade varia rapidamente junto a superfície tornando-se menos acentuada a medida que se afasta em direção ao escoamento externo à camada limite.

No escoamento turbulento (sobre uma placa plana), podem-se identificar três camadas:

A primeira camada, junto à superfície, é denominada de camada da parede; esta se caracteriza pelo predomínio das forças viscosas. A camada mais externa e de maior espessura caracteriza-se por ser totalmente turbulenta.

Em 1937, Milikan formulou a lei logarítmica, válida na camada intermediária. Esta lei permite ajustar suavemente a lei da parede, válida na camada da parede, com a lei do déficit da velocidade, válida na camada mais externa.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{zu^*}{v} + B \quad \text{onde } u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \Rightarrow \text{velocid. de atrito}$$

$$k \cong 0.41 \Rightarrow \text{cte de von Karman}$$

B é uma constante

Levando-se em consideração os efeitos da rugosidade da superfície, esta lei pode ser modificada, assumindo a forma:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{\epsilon} + C \quad \text{onde: } u(\epsilon) = 0$$

C é uma constante.

3.3.2. A Camada limite atmosférica

A troposfera é a região da nossa atmosfera onde a temperatura decresce continuamente com a altura e que ocupa a região que vai do solo até aproximadamente 10 a 11 km.

Nas partes inferiores da troposfera, localizadas nas vizinhanças do solo, os processos de transferência propiciam a formação de condições apropriadas para o desenvolvimento da camada limite na superfície da Terra. Esta região é denominada de camada limite atmosférica – C.L.A. Como era de se esperar, esta camada limite é fortemente afetada topografia, pela rugosidade do terreno, pelo fluxo de calor na atmosfera, entre outros fatores.

Para fins de análises esta definição deve ser substituída por outra quantitativamente mais apropriada. Assim sendo, define-se a C.L.A. como sendo a região da troposfera diretamente influenciada pela superfície terrestre e que responde a estas (influências superficiais) em intervalos de tempo da ordem de uma hora ou menos. Esta definição nos leva a espessura da C.L.A. como sendo da ordem de 1.0 km.

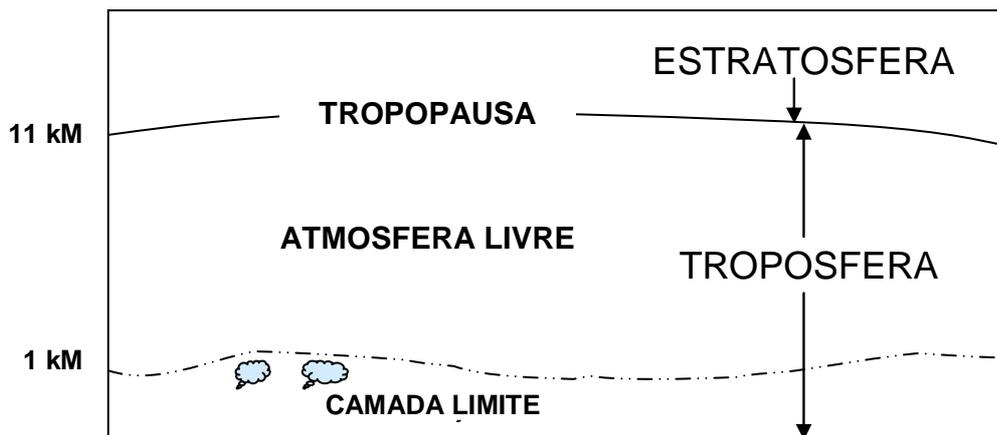


Figura 3.9. Camada limite atmosférica.

3. 3.2.1. A influência da altitude.

Para fins de aproveitamento da energia dos ventos (energia cinética) é importante o conhecimento da massa específica do ar. Esta, como a pressão e a temperatura variam com a altitude, veja a Figura 3.10.

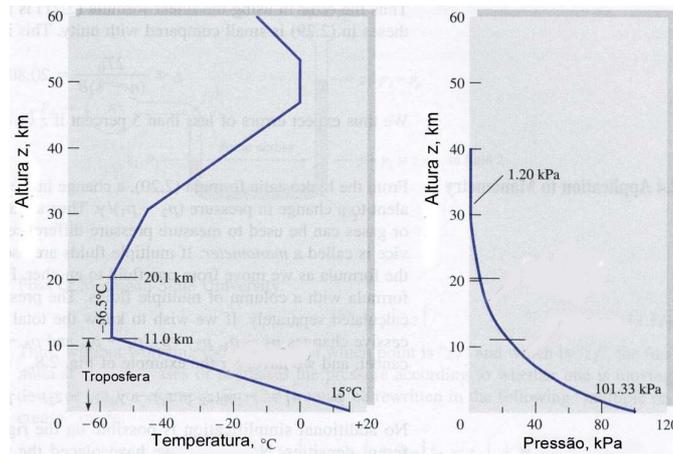


Figura 3.10. Variação da temperatura e da pressão na C.L.A.

Na troposfera, a temperatura varia de maneira aproximadamente linear com a altitude. De acordo com a “US Standard Atmosphere” a temperatura no nível do mar é assumida como sendo igual a 15o C, atingindo o valor de 56.5o C a 11.0 km de altitude.

Uma expressão aproximada para se estimar a temperatura é

$$T \approx T_0 - Bz \quad \text{onde } T \Rightarrow \text{a temperatura expressa em o K}$$

$$T_0 = 288.16\text{oK} \quad (\text{equivalente a } 15\text{o C})$$

$$B = 0.0065 \text{ K/m}$$

$$z = \text{altitude expressa em m.}$$

A pressão, por sua vez, pode ser estimada, na troposfera, através da relação:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{Bz}{T_0} \right)^{5.26}$$

onde $p_0 = 101.35$ pascal, a pressão reinante ao nível do mar.

Por sua vez a densidade do ar, que diminui com a altura, depende de vários fatores, principalmente da temperatura e da pressão. Uma expressão aproximada para o cálculo da densidade, quando se conhece apenas a altitude (z expressa em m), é:

$$\rho = 1.225 - (1.1948 \cdot 10^{-4})z$$

De uma maneira geral, porém, pode-se assumir que a densidade do ar decresce cerca de 10% a cada 1000m de aumento da altitude; lembrando, a pressão ao nível do mar, quando a temperatura é 15o C é igual a 101.35 pascal ou 1.115 kg/m³

3. 3.2.2. A influência da altura

Os mecanismos que dão origem aos ventos e que modificam a sua distribuição espacial na superfície da Terra são extremamente complexos, tornando-se impossível obter um modelo preciso para descrever exatamente a distribuição da velocidade do vento.

No entanto, podem-se utilizar os conhecimentos desenvolvidos no estudo da camada limite sobre uma placa plana para se estabelecer um modelo aproximado para a distribuição da velocidade do vento com a altura.

Assim sendo, para uma dada localidade, assume-se que a velocidade do vento varia como uma potência - n - da altura; o valor de n depende da rugosidade do terreno, o gradiente da temperatura na atmosfera, etc. Matematicamente, se $V(z)$ representa a velocidade numa altitude z , esta lei pode ser convenientemente escrita como:

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

onde z_r , em geral, é a uma altitude de referência.

A Organização Mundial de Meteorologia assume que o valor de referência, onde a velocidade dos ventos deve ser medida, é $z_r = 10$ m.

Esta lei é, também, conhecida como a lei dos (1/7) porque este é o valor recomendado para a potência n , quando não se possuem maiores informações sobre a rugosidade do terreno.

Sabe-se que, nas regiões costeiras, onde os efeitos viscosos atuam em menor escala, este valor é bastante apropriado [$n = (1/7) = 0.1429$]; no entanto, nas regiões mais interiores, com florestas e com ondulações este valor deve ser corrigido, sendo comum a utilização de n na faixa $0.2 < n < 0.3$.

É importante observar que o valor da altura de referência z_r não deve ser necessariamente a altura do anemômetro. Quando as condições topográficas do local são muito variáveis, a devida interpretação deve ser dada para a altura de referência; o valor de z_r deve ser determinado em função de uma vizinhança efetiva, muito maior do que a vizinhança imediata da base da torre.

Para as aplicações de Engenharia do tipo exploratórias os valores acima mencionados são suficientes, desde que a diferença ($z-z_r$) não seja grande.

Um modelo mais completo para o perfil de velocidades do vento deve, necessariamente, levar em consideração o comportamento dinâmico da atmosfera. O denominado perfil logaritmo exprime este modelo

$$V(z) = \frac{V^*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) + \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$

onde: V^* é a velocidade de atrito

k é a constante de Von Karman e assume o valor igual a 0,41

z é a altura, expressa em m

z_o é a altura (comprimento) de rugosidade, expressa em m

$\Psi(\)$ é a função de estabilidade

L é o comprimento de Monin Obukhov

A velocidade de atrito caracteriza a influência da tensão de cisalhamento na superfície (veja a análise da camada limite sobre uma placa plana) e pode ser calculada de maneira aproximada pela expressão

$$\frac{V^*}{k} = \frac{V_r}{\ln \left(\frac{z_r}{z_o} \right) + \Psi \left(\frac{z_r}{L} \right)}$$

nesta expressão $z_r = 10$ m e V_r a velocidade em m/s medida na altura de referência z_r .

O comprimento de rugosidade, z_o , caracteriza a influência da rugosidade superficial no desenvolvimento do perfil de velocidades. De fato, se o terreno for mais rugoso mais espessa será a camada atmosférica afetada pela rugosidade e a velocidade cresce mais gradualmente com a altura. Este comprimento pode ser interpretado como sendo aquele para o qual a velocidade $V(z)$ se anula.

3. 3.2.3. A influência do fluxo de calor

Na expressão do perfil logarítmico de velocidades, o comprimento de Monin-Obukhov caracteriza a influência dos fenômenos térmicos e é uma grandeza difícil de ser estimada. Por esta razão este comprimento é, em geral, tomado como uma constante empírica, sujeita as seguintes condições:

- $L > 0$ se as condições atmosféricas forem estáveis
- $L < 0$ se as condições atmosféricas forem instáveis
- $L \rightarrow \infty$ se a estratificação for neutra.

A função de estabilidade - ψ - caracteriza a influência da estabilidade atmosférica no desenvolvimento do perfil de velocidades. A literatura fornece as expressões abaixo, apropriadas para os problemas de Engenharia.

Atmosfera Neutra $\psi = 0$

Atmosfera Estável $\Psi = 4.5 \left(\frac{z}{L} \right)$ $z \leq L$

$\Psi = 4.5 \left[1 + \ln \left(\frac{z}{L} \right) \right]$ $z > L$

Atmosfera Instável

$$\Psi = -0.5 \left(\frac{z}{L} \right) \quad z \leq L$$

$$\Psi = -0.5 \left[1 + \ln \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad z > L$$

Estas considerações são utilizadas nos algoritmos dos softwares disponíveis para a análise do regime dos ventos (veja mais abaixo, regime dos ventos).

3.3.2.4. A influência da rugosidade

À medida que a rugosidade da superfície da terra aumenta, os perfis de velocidades modificam-se para se adaptarem a um valor maior da altura de rugosidade – veja Figura 3.11.; na expressão do perfil logarítmico de velocidades, esta altura (ou comprimento) é representada por z_0 .

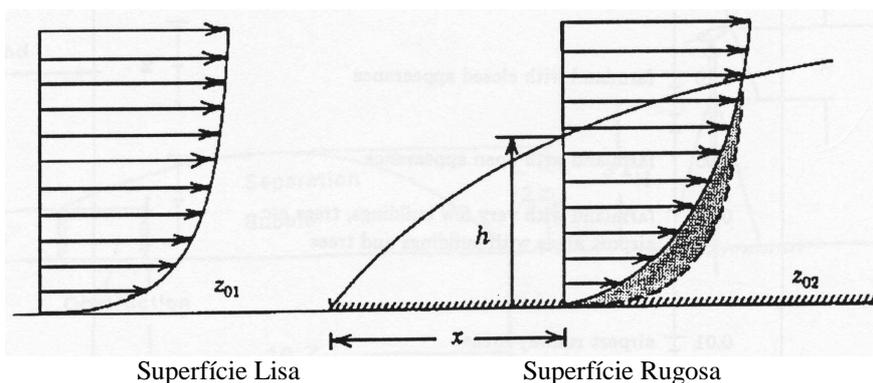


Figura 3.11. Influência da rugosidade no desenvolvimento do perfil de velocidades.

Para simplificar os raciocínios, considere uma atmosfera neutra, $\psi = 0$. Nestas condições o perfil de velocidades é definido pela forma simplificada.

$$V(z) = \frac{V^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]$$

Verifica-se que uma única leitura da velocidade numa altura z_1 não é suficiente para definir completamente a expressão, a menos que se conheça o comprimento da rugosidade, z_0 . Normalmente são necessárias duas medidas da velocidade, nas alturas z_1 e z_2 , para a definição do perfil de velocidades do vento.

Tabela 3. Altura de rugosidade.

z_0 (m)	Classe	Situações
10^{-4} a 10^{-3}	0	Mar, lagos, etc Areia Neve
0.01 a 0.05	1	Aeroportos Campos com algumas construções Campos com vegetação esparsa
0.05 a 0.15	2	Campos com vegetação fechada Arvores e arbustos
0.25 a 0.50	3	Subúrbios
0.50 a 1.00	4	Florestas e cidades

A altura da rugosidade em grandes extensões de água como no mar e nos grandes lagos é muito pequena ou praticamente nula. À medida que a rugosidade aumenta, os perfis de velocidade se modificam para se adaptar a um valor maior da altura de rugosidade, z_0 . Exemplos de superfícies rugosas e valores sugeridos para z_0 são fornecidos a seguir, na Tabela 3.

3.3.2.5. A influência do relevo

O relevo da região, onde o vento sopra, é de grande importância no desenvolvimento dos perfis de velocidade. Como a forma do relevo pode ser a mais variada possível, torna-se inviável a apresentação geral sobre o assunto. A Figura 3.12 ilustra algumas situações possíveis.

Nas análises da influência do relevo, no perfil de velocidades, é importante ter-se sempre em mente que:

- A instalação dos rotores deve ser feita nas posições onde a velocidade assume os maiores valores [como será visto, a potência varia com o cubo da velocidade].
- A operação dos rotores eólicos exige que estes sejam instalados onde a intensidade da turbulência atinge os menores valores.

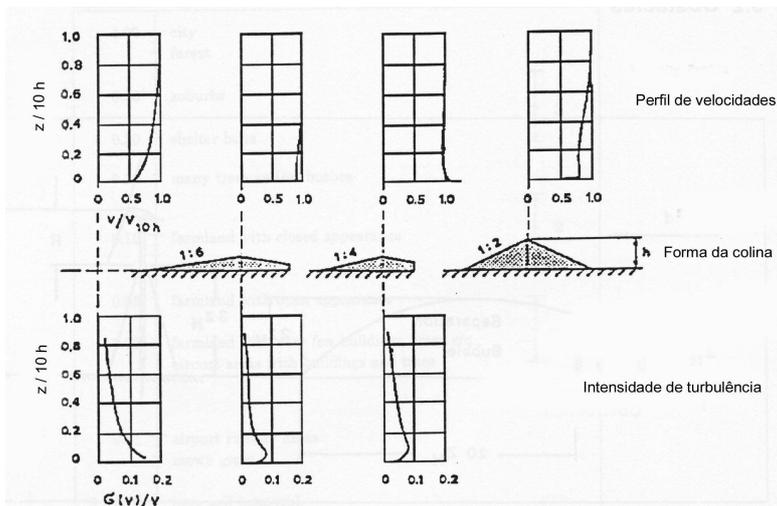


Figura 3.12. Influência do relevo no desenvolvimento do perfil de velocidades.

3.3.2.6. A Influência dos Obstáculos

Obstáculos são representados por edificações, aglomerados de árvores, cercas verdes, etc. que se localizam nas vizinhanças dos pontos onde se instala um sistema eólico. Observe que um obstáculo ou conjunto de obstáculos, se localizados a grandes distâncias do ponto de interesse, são interpretados como rugosidade do terreno. No momento um obstáculo é visto como algo que produz uma esteira, no interior da qual situa-se o ponto de interesse, no caso, um sistema eólico.

Como um sistema eólico funciona de maneira precária no interior da esteira de um obstáculo (as velocidades são baixas e no escoamento observam-se grandes formações vorticosas) a posição relativa e as dimensões do obstáculo são as grandezas de interesse. Este é um assunto a ser mais bem detalhado no futuro; no momento, a Figura 3.13. serve para definir algumas grandezas gerais a serem observadas quando da instalação de um sistema eólico em presença de obstáculos.

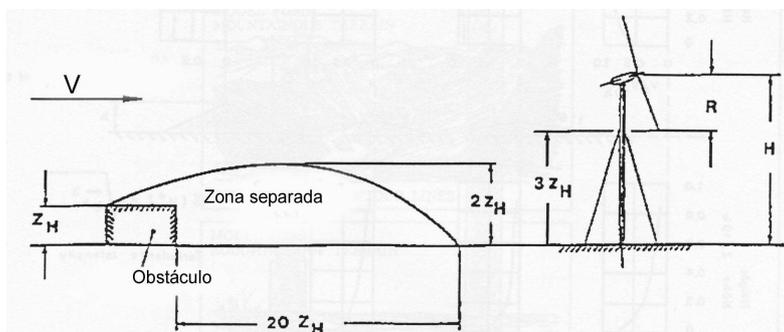


Figura 3.13. Relações importantes a serem observadas na instalação de uma turbina na presença de um obstáculo.

Outra grandeza de interesse ao se analisar a influência de obstáculos é a sua porosidade. Assume-se que um edifício possui porosidade nula, uma cerca verde pode apresentar, também, uma porosidade nula se ela for compacta ou um valor diferente de zero se for esparsa, etc.

3. 4. Variação temporal da velocidade dos ventos

Os ventos, uma manifestação da energia solar, variam no espaço e no tempo. A análise da variação espacial dos ventos foi assunto tratado no item anterior. A análise da variação temporal dos ventos é apresentada neste item, resultando no desenvolvimento dos conhecimentos necessários para se definir o **regime dos ventos**.

Devido ao caráter altamente aleatório dos ventos, na atmosfera, é de se esperar que se utilizem grandezas estatísticas para a definição do regime dos ventos. Além destas grandezas estatísticas, será necessário definir grandezas que quantifiquem o conteúdo energético dos ventos.

3. 4.1. Energia e potência disponível

A energia total – E - contida num sistema de massa m pode ser expressa como a soma de duas parcelas. A energia potencial, E_p , associa-se à posição da massa e a energia cinética, E_c , associa-se a velocidade, V, da massa em movimento.

Pode-se considerar que a energia transportada pela massa de ar em movimento, isto é o vento, é essencialmente a parcela associada à sua velocidade, isto é, a energia cinética. Assim, a energia transportada por uma massa de ar, m, que se movimenta com uma velocidade V, é expressa aproximadamente como:

$$E \cong E_c = \frac{1}{2} mV^2$$

Esta maneira de especificar a energia transportada pelos ventos é, no entanto, pouco prática uma vez que depende da massa, m, uma grandeza difícil de ser medida ou quantificada. Uma alternativa consiste em se especificar a energia transportada por unidade de volume do ar em movimento, isto é, a energia (cinética) específica, que é expressa como:

$$e_c = \frac{1}{2} \rho V^2$$

As expressões mostram que a energia cinética e, conseqüentemente a **energia transportada pelos ventos é proporcional à massa específica (densidade) do ar e ao quadrado da velocidade**. Esta observação é importante por dois motivos:

- a massa específica do ar varia com a altitude (recorde que a cada 1000m de aumento na altitude, o decréscimo da densidade é da ordem de 10%).
- um pequeno acréscimo da velocidade representa um ganho substancial na energia; nas fórmulas acima verifica-se que a energia cinética varia com o quadrado da velocidade.

A tabela abaixo fornece algumas grandezas de interesse e as unidades recomendadas na sua utilização.

Energia Cinética	Energia Cinética específica	Velocidade do Vento	Densidade do Ar
E_c	e_c	V	ρ
Wh ou n.m/s	Wh/m ³	m/s ou Km/h	Kg/m ²

Na conversão e no aproveitamento da **energia dos ventos** (ou **energia eólica**) a energia é a grandeza a ser maximizada!

Para fins de análise, no entanto, a potência é a grandeza mais adequada para ser utilizada. De fato, a potência definida como o trabalho realizado (ou energia gerada) por unidade de tempo, fornece uma forma de se especificar o grau da habilidade de um sistema para produção de energia (ou de trabalho).

Seja V a velocidade do vento. O fluxo de energia transportada pelas partículas de ar em movimento é denominado de **potência disponível**, - P_d . Ela é definida como:

$$P_d = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

- Para interpretar o significado desta definição, seja Δt o intervalo de tempo em que o vento passa através de uma superfície de área A e orientada perpendicularmente a sua direção (do vento).

- Nestas condições, a massa de ar que atravessa esta superfície é expressa por $m = \rho [A(V \cdot \Delta t)]$. De fato, o produto da velocidade V pelo intervalo de tempo Δt resulta num comprimento, $L = V \cdot \Delta t$, correspondente a distância percorrida

por uma partícula de ar; conseqüentemente o produto deste comprimento pela área A representa o volume de um cilindro de mesma área e comprimento L que atravessa a superfície no mesmo intervalo de tempo.

- Assim sendo, no intervalo Δt , a energia cinética transportada pelo ar em movimento e que atravessa a superfície de área A é expressa como:

$$\frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} \rho [A(V \cdot \Delta t)] V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \Delta t$$

- Finalmente, dividindo-se este valor por Δt , tem-se

$$\left(\frac{1}{2} mV^2 \right) \div \Delta t = \frac{1}{2} \rho A V^3 \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

que representa a energia cinética que atravessa a superfície de área A, pó unidade de tempo.

Considerando este resultado a expressão da potência disponível toma a forma mais conveniente:

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

Esta pode ser considerada a expressão mais importante quando se realiza análises visando o aproveitamento a energia eólica. Em analogia a energia específica, define-se a potência específica p_e , como

$$p_d = \frac{1}{2} \rho V^3$$

que é interpretada como a energia transportada pelo vento, através de uma superfície de área unitária, por unidade de tempo. Como a energia transportada por unidade de tempo, através de uma superfície de área A, é obtida pelo produto da potência específica pela área, esta grandeza é apropriada para representar as potencialidades energéticas de um dado sítio.

A tabela abaixo fornece algumas grandezas de interesse e as unidades recomendadas na sua utilização.

Potência Disponível	Potência Disponível específica	Velocidade do Vento	Área
P_d	p_d	V	A
W ou kW	W/m ²	m/s ou Km/h	m ²

Cabe, finalmente, algumas observações importantes:

- a **potência varia linearmente com massa específica e cresce com o cubo da velocidade**.
- a potência específica, como visto, é uma grandeza adequada para se especificar o potencial eólico de um dado sítio e esta é a grandeza que será preferencialmente utilizada; no entanto, alternativamente, pode-se utilizar a energia para especificar o potencial eólico. Por exemplo, se a potência específica é $p_d = 80 \text{ W/m}^2$, em um ano (8760 horas) tem-se 700 kWh/m², que serve para quantificar as potencialidades de um sítio.
- é interessante comparar o potencial eólico com o potencial solar que pode ser estimado em 1000 W/m²; a tabela abaixo fornece valores da potência específica, nas condições padrões. É importante observar, nesta comparação, que os valores referem-se à potência disponível; para se obter a potência realmente utilizável é necessário levar em consideração o rendimento dos sistemas de captação e conversão de energia, no caso, dos sistemas solar e eólico.

V[m/s]	3	5	7	10	15
P_d [W/m ²]	16.5	76.5	210	612	2067

- na falta de informações mais detalhadas, costuma-se utilizar a velocidade média na especificação do potencial eólico (cálculo da p_d). Este procedimento, no entanto fornece um valor subestimado da potência específica no período, uma vez que o valor médio, \bar{V} , de uma série de valores V, elevado ao cubo, é sempre menor que a média dos valores elevado ao cubo, da série.

3. 4.2. Medidas da velocidade dos ventos

As estações meteorológicas, em geral, utilizam anemômetros de três copos para medir a velocidade do vento. A organização meteorológica mundial recomenda que o **anemômetro seja localizado a 10m de altura do solo**.

As modernas estações meteorológicas possuem acoplado ao anemômetro, um sistema de armazenagem dos dados medidos ou um sistema de transmissão dos dados para uma central de processamento; estes sistemas registram continuamente os valores da velocidade como ilustra a Figura 3.14.

A figura ilustra, através de registros contínuos, a distribuição da velocidade dos ventos numa estação meteorológica nos meses de fevereiro, julho e novembro de 1969.

Uma primeira observação que se faz é relacionada com a variação acentuada que se nota no valor da velocidade registrada; ela atinge, com certa freqüência, picos de 20 a 25 m/s. A esta observação, deve-se adicionar o fato de que o registro é de médias horárias (um período de amostragem relativamente longo – veja o conceito mais abaixo) (que suaviza a curva e tem como consequência um desvio padrão calculado com um valor menor).

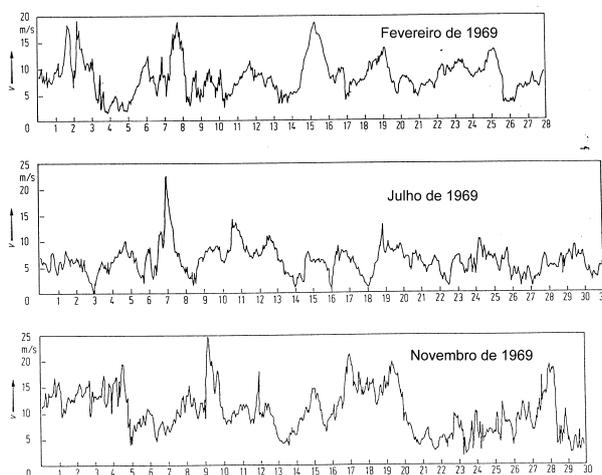


Figura 3.14. Registros típicos da velocidade do vento.

Outra consequência de se utilizar períodos de amostragem relativamente longos reflete-se na quase ausência de valores nulos da velocidade, como pode ser observado nos gráficos.

Os rotores eólicos, por possuírem uma inércia elevada, funcionam até certo ponto como um filtro para estas flutuações da velocidade, suavizando o funcionamento do sistema.

Observam-se, também, nos registros, que a velocidade média horária mantém-se, com bastante freqüência, valores elevados: as velocidades médias mensais assumem os valores 8.5 m/s, 6.2m/s e 10.3m/s para os meses de fevereiro, julho e novembro. Estes valores elevados são importantes e desejáveis para o aproveitamento a energia eólica.

Por uma questão prática, não se armazenam os valores instantâneos da velocidade. Nas estações meteorológicas os dados medidos sofrem um pré-tratamento, isto é, calcula-se o valor médio durante um período de tempo pré-determinado e o armazena, associando este valor a uma data e a um tempo. Para este pré-tratamento dos dados, duas definições são importantes:

Período de Amostragem: é definido como o intervalo de tempo - T - utilizado para o cálculo da velocidade média a ser armazenada. Esta velocidade é calculada utilizando-se o teorema do valor médio, isto é:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)dt$$

Freqüência de Amostragem: é definida como sendo o número de amostras (ou períodos de amostragem) colhidas num dia. Se o período de amostragem escolhido for de uma hora, evidentemente, a freqüência de amostragem é de 24 medidas diárias.

Se o levantamento dos dados de vento tem como finalidade as aplicações da energia eólica, é usual utilizar períodos de amostragem de 10 minutos e, preferencialmente, períodos de 1 minuto. Para aplicações mais refinadas, onde os efeitos da turbulência atmosférica são importantes, os períodos de amostragem costumam ser ainda menores.

Este processo é ilustrado na planilha mostrada na Figura 3.15, que contém os valores médios (horários) da velocidade durante os dias de um mês. Assim sendo, o valor indicado por V(1,1) representa a velocidade média na primeira hora do dia 1, o valor indicado por V(2,1) o valor da velocidade média na segunda hora do mesmo dia e assim por diante.

Como será visto adiante, dados relativos a direção dos ventos são também armazenados para análises e projeções.

Em algumas aplicações especiais o armazenamento de valores máximos ocorridos, em cada período, torna-se necessário.

Médias Horárias da Velocidade

Estação:

Latitude: Longitude: Altitude:

Tipo de anemômetro:

Altura do anemômetro:

Ano: Mês:

h	1	2	3	4	...	31	$V_m(h)$
1	V(1,1)	V(1,2)	V(1,3)	V(1,4)		V(1,31)	$V_m(1)$
2	V(2,1)	V(2,2)	V(2,3)	V(2,4)		V(2,31)	$V_m(2)$
3	V(3,1)	V(3,2)	V(3,3)				$V_m(3)$
4	V(4,1)	V(4,2)					$V_m(4)$
...							
24	V(24,1)	V(24,2)					$V_m(24)$

Figura 3.15. Planilha dos valores de velocidade média horária.

3. 4.3. Grandezas estatísticas que definem o regime dos ventos

De posse das tabelas que fornecem as médias horárias, grandezas estatísticas que são utilizadas para definir o regime dos ventos podem ser calculadas. Este processo é conhecido como Tratamento dos Dados.

Velocidade Média Diária: o valor médio das velocidades acumuladas durante um dia é conhecido como velocidade média diária – veja planilha da Figura 3.15. Em geral, este valor é muito pouco utilizado por não ser representativo, assim como o desvio padrão (variança) que pode ser calculado com estes valores.

Velocidade Média Mensal: o valor médio das velocidades acumuladas durante um mês é conhecido como velocidade média mensal; este valor é igual a média das velocidades médias diárias. A velocidade média mensal é uma grandeza importante porque o conjunto das velocidades médias mensais fornece uma indicação bastante clara da distribuição da velocidade do vento ao longo do ano.

Desvio Padrão Mensal: com os dados da planilha da Figura 3.15, o desvio padrão mensal pode ser facilmente calculado. Esta grandeza estatística fornece uma indicação da distribuição dos valores da velocidade em relação a velocidade média; ela será utilizada mais tarde na descrição da distribuição da velocidade.

OBS: o valor da velocidade média mensal é igual a média das velocidades diárias; esta propriedade se aplica igualmente para o cálculo da velocidade média sazonal, anual, etc. No entanto, esta propriedade não pode ser utilizada para o cálculo da variância (desvio padrão).

Dia Típico ou Representativo Mensal: o dia representativo mensal é definido pelo gráfico [$V_m(h) \times h$], com os dados da planilha da Figura 3.15. Este gráfico é bastante ilustrativo porque mostra como a velocidade do vento é distribuída (em média) ao longo do dia. Na planilha obtêm-se os dados para o traçado do dia representativo mensal utilizando a última coluna. O conhecimento do dia típico é de extrema importância para a operação de sistemas de distribuição de energia, abastecidos pela energia dos ventos; de fato, com o dia típico pode-se estimar a distribuição da potência (que é proporcional ao cubo da velocidade) ao longo do dia e, assim, analisar as disponibilidades de energia e compará-las com as necessidades do sistema de distribuição.

Utilizou-se uma planilha mensal para ilustrar como se efetuam os cálculos das grandezas de interesse na análise dos dados de vento; assim sendo, estas grandezas referem-se ao mês em que os dados foram coletados.

Tendo em vista o aproveitamento da energia dos ventos, os dados coletados ao longo de um único mês são muito pouco representativos e, por esta razão, não confiáveis. Recomenda-se a análise de dados de pelo menos um ano e, de preferência cinco ou mais anos.

Com dados de vários anos podem-se fazer análises mais seguras e, assim, calcular as grandezas para cada mês, para cada estação e para o ano.

Para efeitos de cálculos recomenda-se utilizar os seguintes valores:

Um mês possui 720 horas

Uma estação possui 2160 horas

Um ano possui 8760 horas.

3. 4.4. Distribuição temporal da velocidade dos ventos

3. 4.4.1. Análise da velocidade média

Considere, para efeito de ilustração, a planilha apresentada na Figura 3.16, que fornece, para um dado sítio escolhido como exemplo, as velocidades médias mensais para um período que vai de 1969 a 1976. A planilha mostra, também, as velocidades médias anuais para estes anos.

Com vistas ao aproveitamento da energia eólica, é oportuno observar que as velocidades médias mensais (apesar das variações observadas nos registros da velocidade do vento) apresentam-se num patamar relativamente constante e alto, embora se possa observar um pequeno declínio nos meses do meio do ano.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
1969	7,4	8,5	807,0	7,6	6,7	6,0
1970	6,8	7,6	8,1	7,8	7,5	6,3
1971	6,2	7,5	6,6	6,6	6,3	7,0
1972	8,0	6,5	7,7	8,4	7,4	6,0
1973	6,0	8,5	6,5	8,8	6,8	6,6
1974	8,0	7,5	7,3	7,0	6,9	6,8
1975	10,2	5,7	7,5	7,2	7,0	6,9
1976	10,7	7,3	7,3	7,4	6,2	5,9

Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
6,2	6,6	7,0	7,0	10,3	6,0	7,3
7,8	5,7	7,8	7,8	7,7	7,3	7,4
6,1	7,0	6,5	7,8	9,5	8,9	7,2
6,0	7,3	6,1	6,4	8,7	7,1	7,1
7,3	6,3	6,4	6,6	11,3	9,5	7,5
9,0	5,7	7,8	7,7	8,6	11,4	7,8
6,5	6,0	7,1	7,2	7,6	9,2	7,4
6,7	7,0	6,2	6,1	7,0	7,8	7,1

Figura 3.16. Velocidades média mensal e anual.

Verifica-se, também, uma evolução mais ou menos constante sem a presença de qualquer indício de problemas nas as extrapolações para anos futuros, quando o sistema eólico estará em operação. A velocidade média anual, para o período é:

$$\bar{V} = 7.4\text{m/s}$$

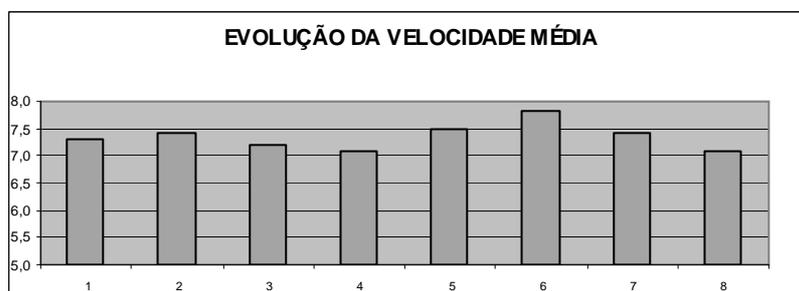


Figura 3.17. Evolução da velocidade média anual ao longo dos anos.

A evolução ao longo dos anos – veja Figura 3.17 -, da velocidade média anual, sem um caráter nitidamente monotônico (crescente ou decrescente) também é interessante. É um dos indícios de que não houve problemas na medida e na aquisição de dados e de que o regime com que os ventos sopram está estacionário (não se observam alterações climáticas resultantes de ação do homem ou de outras causas naturais).

Uma análise mais completa deveria incluir uma análise das velocidades médias mensais, por exemplo, com diagramas semelhantes ao apresentado na Figura 3.17.

3. 4.4.2. Análise do desvio padrão

A planilha, apresentada na figura abaixo, complementa aquela apresentada na Figura 3.16. Esta planilha fornece os valores mensais e anuais do desvio padrão.

A análise dos valores apresentados mostra valores relativamente altos do desvio padrão, mostrando a grande dispersão dos valores da velocidade. Em outras palavras, o vento apresenta grande variabilidade, uma característica não desejável quando se trata do aproveitamento da energia eólica.

Esta dispersão pode ser quantificada através do **Coefficiente de Variação**, que é definido como:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{V}}$$

No caso como $\bar{V} = 7.4\text{m/s}$, o coeficiente de variação assume um valor da ordem de 0.45 para quase todos os anos, ou seja, uma valor bastante alto!

3.4.4.3. Análise do dia representativo

Os dados apresentados nas planilhas anteriores não permitem que se represente o dia típico para a estação escolhida. No entanto, estes dados estão disponíveis (veja última coluna) nas planilhas do tipo apresentada na Figura 3.15. Os dados deste tipo de planilha referem-se às velocidades médias horárias, para um mês; com estes dados pode-se traçar o dia típico mensal, ao contrário dos dias típicos apresentados na Figura 3.19, que são anuais.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
1969	2,5	3,6	3,9	3,5	2,7	2,6
1970	2,6	3,4	3,5	3,5	3,3	2,4
1971	2,4	3,4	2,9	3,2	2,7	2,8
1972	2,9	2,0	3,6	3,4	3,4	2,6
1973	2,0	3,2	2,6	4,3	2,8	2,5
1974	3,0	3,2	3,0	2,6	2,9	2,8
1975	3,6	2,0	3,8	3,3	3,3	2,8
1976	5,9	2,5	3,0	3,5	2,7	3,0

Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
2,7	2,6	3,0	4,1	4,3	2,9	3,5
3,4	2,4	3,9	4,0	4,1	3,2	3,4
3,3	3,0	2,8	3,6	4,2	3,4	3,3
2,4	3,0	2,8	3,1	3,2	3,0	3,1
3,2	3,0	3,3	3,2	5,3	4,6	3,8
3,1	2,4	3,2	4,2	3,8	3,9	3,5
2,9	2,6	3,3	3,7	3,3	3,3	3,4
2,7	2,5	2,9	2,2	3,6	3,3	3,5

Figura 3.18. Desvios padrão mensal e anual.

Dias típicos para os anos de 1969 a 1972 foram traçados; a Figura 3.19 mostra dias típicos (anuais) de 1969 e de 1972. A análise destes gráficos mostra que, em média a velocidade distribui-se, ao longo do dia, de maneira análoga por um período de 5 anos, confirmando algo já observado: o regime com que os ventos sopram está estacionário (não se observa alterações climáticas resultantes de ação do homem ou de outras causas naturais).

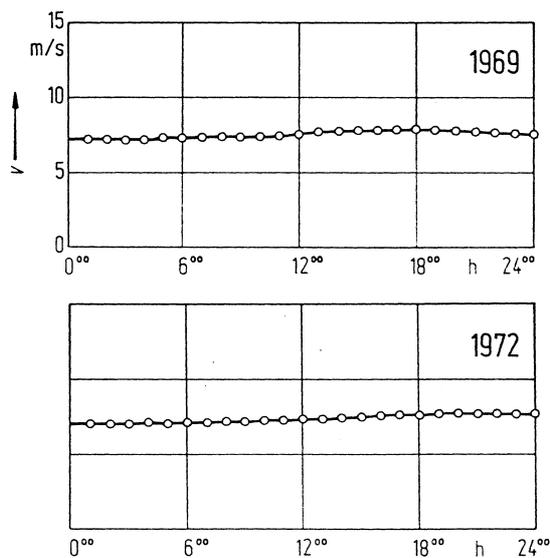


Figura 3.19. Dias representativos anuais.

O valor médio da velocidade mantém-se mais ou menos constante, com uma pequena elevação por volta das 18h. Este comportamento bastante uniforme, no entanto, não é esperado na grande parte dos sítios. Às vezes uma distribuição não uniforme pode ser mais interessante, dependendo da distribuição da demanda ao longo do dia; este fato é particularmente importante quando o sistema eólico supre uma rede isolada e, também, quando a energia eólica é utilizada para suprir os picos de consumo.

3.4.4.4. Análise da distribuição da potência

A planilha apresentada na Figura 3.20 mostra valores da potência específica (média) disponível ao longo dos meses, para os anos analisados.

Na última coluna, apresenta-se a distribuição da potência específica (média) anual, para os anos considerados.

A análise cuidadosa desta planilha mostra a importância de se dispor da distribuição mensal quando se trata da análise da potência disponível. Afinal, uma variação no valor da velocidade média - ΔV - representa uma variação da potência proporcional ao cubo desta variação, isto é, - $(\Delta V)^3$. Não é difícil, portanto, concluir que a energia disponível, calculada com a utilização da potência específica anual será diferente do valor calculado utilizando as potências específicas mensais.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
1969	254	392	475	319	199	151
1970	205	293	372	324	302	160
1971	157	275	211	222	177	229
1972	331	148	359	384	310	157
1973	133	351	181	531	214	183
1974	330	270	267	212	228	211
1975	665	103	364	272	351	211
1976	1126	223	259	298	177	166

Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
177	192	240	341	730	168	3637
337	126	378	405	396	284	3581
210	237	187	356	603	454	3316
147	259	164	215	404	252	3127
284	196	212	232	1074	704	4295
437	128	313	400	451	917	4163
199	156	274	325	316	479	3696
201	213	173	139	282	332	3588

Figura 3.20. Potência específica disponível.

Considere como ilustração o ano de 1969.

A energia calculada com a utilização da potência específica anual é feita como:

$$E = 8760 * 363.7 = 3186 \text{Kwh}$$

Por outro lado a energia calculada com a utilização da potência específica mensal é feita como:

$$E = \sum_{i=1}^{12} H(i) * p(i) = 24 * \sum_{i=1}^{12} N(i) * p(i) = 24[(31 * 254) + 28(392) + \dots + (31 * 168)] = 2644 \text{Kwh}$$

onde $H(i)$ é o número de horas do mês i (que é igual a $24 * N(i)$, $N(i)$ = número de dias deste mês) e $p(i)$ é a potência média específica.

Como pode ser constatado, o valor da energia disponível calculada com a utilização da potência específica anual foi superestimada!

Verifica-se, então, que se podem classificar os sítios de acordo com as suas potencialidades, ou mais especificamente, de acordo com a sua velocidade média anual (a energia ou a potência específicas poderiam ser igualmente utilizadas, uma vez que são respectivamente proporcionais ao quadrado e ao cubo da velocidade). A Tabela 3.2 fornece uma classificação normalmente aceita; um sítio de classe 2, por exemplo, possui uma velocidade média anual entre 4.4m/s e 5.1 m/s quando medida a 10m de altura. A tabela fornece, também, valores da potência específica.

Tabela 3.2. Classificação dos sítios.

10 m		CLASSE	50 m	
Potência (w/m ²)	Velocidade (m/s)		Potência (w/m ²)	Velocidade (m/s)
0	0		0	0
		Classe 1		
100	4.4		200	5.6
		Classe 2		
150	5.1		300	6.4
		Classe 3		
200	5.6		400	7.0
		Classe 4		
250	6.0		500	7.5
		Classe 5		
300	6.4		600	8.0
		Classe 6		
400	7.0		800	8.8
		Classe 7		
1000	9.4		2000	11.9

Observe que a altura de 10m é a altura recomendada para a medida da velocidade do vento pela Organização Mundial de Meteorologia. Para fins de aproveitamento da energia eólica é interessante conhecer a velocidade a uma altura maior e elege-se a altura de 50m; na tabela este valor relaciona-se com a velocidade a 10m por meio da lei de potência de (1/7).

O sítio cujos dados tem sido utilizados nos itens anteriores apresenta uma velocidade média anual de 7.4 m/s. As medidas foram realizadas a uma altura de 40m, assim sendo, utilizando a lei de potência (1/7) tem-se:

z (m)	(z/z ₀)	V(z) (m/s)
10	0.25	6.1
40	1.00	7.4
50	1.25	7.6

Conseqüentemente, de acordo com a tabela 3.2, o sítio é classificado como um sítio de classe 5

3. 4.4.4. Análise da distribuição da velocidade por classes: histograma

As análises da velocidade média, do desvio padrão, etc. fornecem, como visto, informações importantes para o estudo do regime dos ventos.

No entanto, o cálculo da energia disponível (veja o item anterior) mostra que, para um período longo, a utilização dos valores médios para se estimar o valor de uma grandeza pode levar a valores que desviam bastante da realidade.

O cálculo efetuado mostra, ainda, que a divisão de um período longo em sub-períodos mais curtos leva a resultados mais precisos, especialmente quando há uma grande dispersão dos dados (valores elevados do desvio padrão).

Uma alternativa para o cálculo da energia, por exemplo, também sugerida pelo procedimento anterior, consiste em agrupar os valores da velocidade em classes.

Com este propósito considere, inicialmente, o universo de valores medidos da velocidade e a classificação destes valores. Somando-se todos os valores (medidos da velocidade) que estejam entre 0 m/s e 1m/s, tem-se a frequência de ocorrência – f₁ - da velocidade neste intervalo ou na classe 1. Repetindo o procedimento para a classe 2, definida pelos valores 1 m/s e 2 m/s, tem-se a frequência de ocorrência – f₂ – da velocidade neste intervalo ou na classe 2 e assim por diante. Ao final do processo, pode-se elaborar a planilha mostrada na Tabela 3.3. Nesta tabela, tem-se:

- V_{min} indica o limite inferior da classe
- V_{max} indica o limite superior da classe
- V_m indica a velocidade média da classe
- f_i indica a frequência de ocorrência da classe i
- f_{ri} indica a frequência relativa de ocorrência da classe i.

OBS: A amplitude da classe é definida como:

$$A = V_{\max} - V_{\min}$$

Na tabela, a amplitude foi arbitrariamente tomada igual a 1 m/s. Nada impede que a amplitude seja tomada com um valor diferente; aliás, é aconselhável que a amplitude seja a menor possível.

Tabela 3.3. Classes de velocidade.

CLASSE	Vmim	Vmax	Vm	f _i	f _{ri}
1	0.0	1.0	0.5	f ₁	f _{r1}
2	1.0	2.0	1.5	f ₂	f _{r2}
3	2.0	3.0	2.5	f ₃	f _{r3}
...
9	8.0	9.0	8.5	f ₉	f _{r9}
10	9.0	10.0	9.5	f ₁₀	f _{r10}

Graficamente, a tabela pode ser representada por um **histograma** como ilustrado na Figura 3.21; este histograma foi elaborado com os dados já utilizados nas figuras anteriores (período de 1969 a 1976).

A análise do histograma mostra algumas propriedades que revelam as características do regime dos ventos do sítio considerado.

- O histograma apresenta uma forma assimétrica positiva (uma característica dos histogramas de velocidade dos ventos) isto é:

$$V_+ < V_e < \bar{V}$$

V_+ = moda ou valor mais freqüente (ou mais provável)

V_e = mediana ou valor equidistante dos valores extremos

\bar{V} = valor médio (velocidade média, no caso igual a 7.4 m/s).

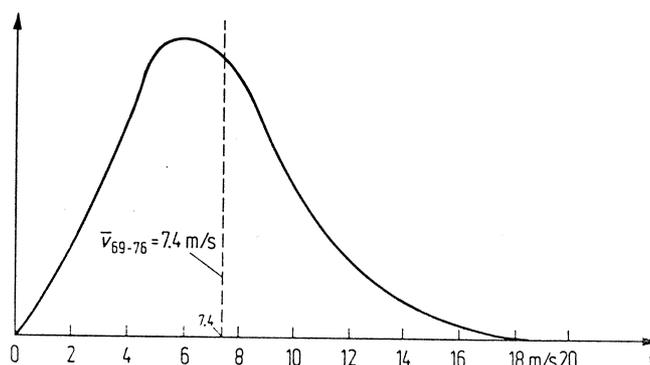


Figura 3.21. Histograma.

- O histograma apresenta-se bastante espalhado, indicando que a dispersão é grande, isto é, o desvio padrão assume um valor elevado, como já constatado.

- Da maneira como o histograma foi construído, pode-se interpretá-lo como uma distribuição de probabilidade, isto é, dado um valor da velocidade, a freqüência relativa pode ser interpretada como a probabilidade de ocorrência desta velocidade no sítio em consideração, em outras palavras faz-se

$$p(V) = f(V)$$

- Como consequência, se o valor da probabilidade de ocorrência da velocidade V for p(V) então, estatisticamente falando, o número de horas com que o vento sopra com esta velocidade é dado pelo produto desta probabilidade por 720, isto é:

$$HM(V) = 720 * p(V)$$

Para isto ser correto, é importante que o histograma refira-se aos dados medidos durante um mês (lembre-se, ainda, que foi assumido um mês de 720 horas). De maneira análoga pode-se calcular HE(V) e HA(V) o número de horas com que o vento soprou com a velocidade V numa estação ou num ano, respectivamente. É evidente a importância desta característica uma vez que a energia pode ser calculada multiplicando-se a potência do equipamento pelo número de horas.

- Com os dados da Tabela 3.3 pode-se traçar duas outras curvas, que complementam as informações contidas no histograma – veja Figura 3.23.

Curva de **freqüência acumulada** ==> {[F(V)] x [V]}

Curva de **duração** ==> {[1-f(V)] x [V]}

A freqüência acumulada é definida como:

$$F(V_n) = \sum_{i=1}^n f_r(V_i) = f_r(V_1) + f_r(V_2) + f_r(V_3) + \dots + f_r(V_n)$$

e corresponde a probabilidade de ocorrência de valores menores do que V_n ; é evidente que a curva de $F(V) \rightarrow 1$ a medida que V aumenta.

A duração é definida pela expressão

$$\text{Duração}(V) = 1 - F(V)$$

Qual é a interpretação da curva de duração?

3.4.4.5. A distribuição de Weibull

Neste ponto é oportuno observar que a análise do comportamento dos ventos é realizada com os dados medidos e armazenados. Efetua-se um tratamento dos dados e as grandezas estatísticas de interesse são calculadas. Esta análise refere-se a **fenômenos que já ocorreram**.

A especificação do **regime dos ventos** tem como finalidade **avaliar o comportamento (dos ventos), no futuro**, com vistas ao seu aproveitamento como uma fonte de energia. Para isto lança-se mão da **inferência estatística**, utilizando-se dos estimadores, especialmente a velocidade média e o desvio padrão.

Assume-se que os valores da velocidade média e do desvio padrão, calculados no período em consideração [no caso, que está servido de exemplo, o período vai de 1969 a 1972] devem se repetir nos anos futuros. O valor da velocidade média e do desvio padrão para o mês de janeiro deve-se repetir em janeiro dos anos vindouros e o mesmo deve acontecer para os demais meses e para o valor anual destas grandezas.

Com estas observações, assume-se que o regime dos ventos no sítio é definido pelas grandezas estatísticas analisadas: velocidade média, desvio padrão, histograma, etc.

Do ponto de vista prático, no entanto, é muito incômodo trabalhar com histogramas e freqüências relativas. Assim sendo, várias foram as tentativas de se determinar expressões analíticas que se ajustassem aos histogramas. Duas destas expressões (doravante referidas como distribuições) adaptam-se bem aos histogramas de distribuição de velocidades de vento.

A primeira delas é a **distribuição de Weibull** que é definida como:

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

Observa-se que esta é uma distribuição biparamétrica (fica definida pelos dois parâmetros c e k) e, em geral, ajusta-se satisfatoriamente bem aos dados medidos da velocidade do vento; veja a Figura 3.22 que representa a distribuição de Weibull para o sítio considerado nos itens anteriores.

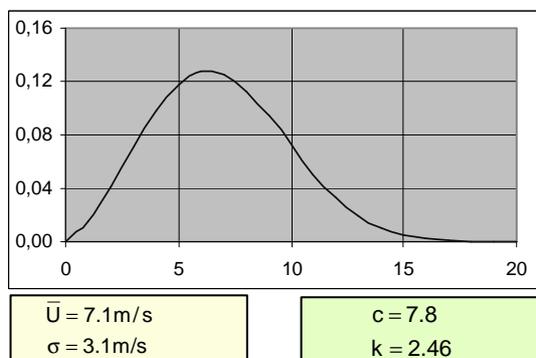


Figura 3.22. Distribuição de weibull.

O parâmetro c , **fator de escala**, define a escala da distribuição e está diretamente relacionado com a velocidade média. O parâmetro k é denominado de **parâmetro de forma** e, como o nome diz, define a forma da distribuição; ele está relacionado com o desvio padrão. Se k assume valores mais elevados o gráfico da distribuição apresenta-se mais concentrado e com um valor máximo maior e vice versa.

Os parâmetros que definem a distribuição de Weibull podem ser calculados a partir dos valores da velocidade média e do desvio padrão. Vários são os procedimentos disponíveis para se efetuar estes cálculos; os valores de c e k utilizados na Figura 3.22 foram obtidos com a utilização da seguinte formulação:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{U}} \right)^{-1.086} \quad \text{e} \quad \bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \cong (0.90 \pm 0.01)c$$

onde a função gama - $\Gamma(\dots)$ – pode ser encontrada nas rotinas das planilhas eletrônicas, por exemplo no Excell, e os seus valores encontrados nos manuais. Esta função é definida como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

O gráfico da Figura 3.22 deve ser comparado com o histograma referente a todo o período de observação; observa-se que a distribuição ajusta-se bem ao histograma.

Algumas relações importantes podem ser facilmente deduzidas a partir da distribuição de Weibull:

- Freqüência Acumulada

$$F(V_n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_n}{c}\right)^k\right]$$

- Velocidade Média

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

- Desvio Padrão

$$\sigma = c\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]$$

- Valor Médio dos Quadrados de Velocidade: importante para a avaliação da potência

$$\overline{V^2} = c^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)$$

- Valor Médio dos Cubos da Velocidade: importante para a avaliação da energia

$$\overline{V^3} = c^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

Finalmente as curvas de Freqüência Acumulada e de Duração podem ser traçadas, como mostra a Figura 3.23.

3. 4.4.6. A distribuição de Rayleigh

Quando se deseja um resultado de mais fácil obtenção, a distribuição de Rayleigh pode ser utilizada. Por ser uma distribuição uniparamétrica, ela fica determinada conhecendo-se apenas um parâmetro, no caso a velocidade média. Evidentemente, a distribuição de Weibull deve ser preferida em aplicações de maior responsabilidade.

As expressões que definem a distribuição de Weibull mostram que ela reduz-se a distribuição de Rayleigh quando os parâmetros c e k assumem os seguintes valores particulares:

$$k = 2 \quad \text{e} \quad c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{V}$$

assim sendo, tem-se:

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{V^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V}\right)^2\right]$$

$$F(V_n) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V_n}{V}\right)^2\right]$$

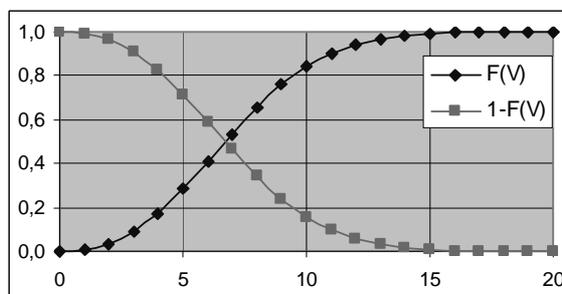


Figura 3.23. Frequência acumulada e duração.

3. 4.5. Distribuição espacial da velocidade dos ventos: rosa dos ventos

No projeto de instalações de grande porte, especialmente de fazendas eólicas, torna-se de fundamental importância as informações sobre a direção com que sopram os ventos. Assim sendo, é necessário descrever estatisticamente a distribuição espacial da velocidade dos ventos.

De fato, o registro contínuo da velocidade dos ventos permite, também, associar uma distribuição da direção com que o vento sopra e isto é feito com a rosa dos ventos.

Para o traçado da rosa dos ventos, os quatro quadrantes são divididos em setores e se identificam as mediatrizes destes setores. No exemplo são utilizados 12 setores de 30°; sendo contados no sentido horário a partir do norte.

Às circunferências concêntricas são associados valores da frequência relativa de ocorrência. Assim sendo, sobre cada mediatriz, marca-se um valor correspondente a frequência relativa de ocorrência de leituras da velocidade no respectivo setor. A união dos pontos marcados sobre todas a mediatrizes forma uma curva fechada, a rosa dos ventos de frequência. Veja na Figura 4.24, a ilustração do traçado da rosa dos ventos de frequência de ocorrência. Nesta figura pode-se identificar o setor 2 onde os ventos sopram com mais frequência, embora possa-se dizer que, em geral, os ventos sopram preferencialmente na direção nordeste.

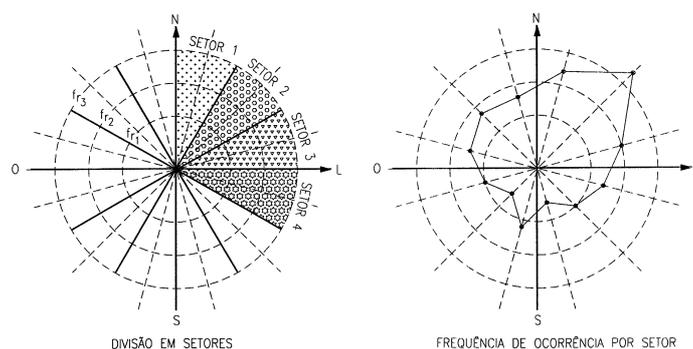


Figura 3.24. Rosa dos ventos: frequência.

Evidentemente, esta figura não é suficiente para se quantificar o fluxo energético, uma vez que não se conhece a velocidade com que os ventos sopram em cada setor.

Torna-se, então necessário, traçar a rosa dos ventos da velocidade média (ou da energia ou potência específicas), como ilustra a figura 3.25. Nesta figura verifica-se que realmente os ventos de nordeste (setor 2), além de serem mais frequentes apresentam as maiores velocidades. Velocidades médias igualmente altas são encontradas no setor 12.

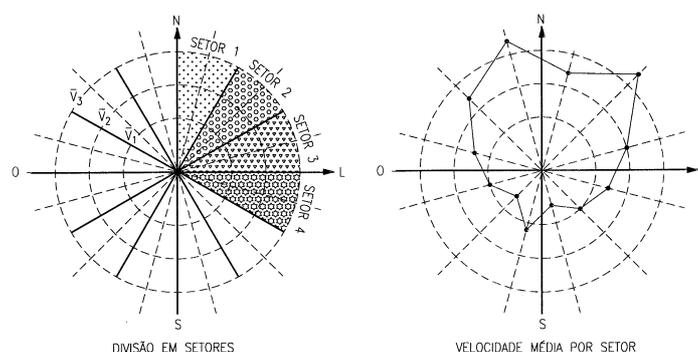


Figura 3.25. Rosa dos ventos: velocidade média.

4. Sistemas eólicos

O aproveitamento da energia dos ventos, feito desde a antigüidade, passou por várias fases, cada uma delas com peculiaridades marcantes. Não é de se estranhar, portanto, que diferentes termos são utilizados com o mesmo significado; eles possuem interpretações diferentes de acordo com a experiência e a cultura onde se originaram.

Mesmo entre nós, sem uma larga experiência no aproveitamento da energia eólica, diferentes denominações são utilizadas com o mesmo significado ou significados parecidos; por exemplo: cata-vento, papa-vento, moinho de vento, roda americana, aerogerador, turbina eólica, etc.

Para a realização da análise de um projeto, realizado com bases científicas exige-se, no entanto, definições precisas, isentas de ambigüidades.

Assim sendo, entende-se o **sistema eólico** como o conjunto de equipamentos que são utilizados para captar a energia dos ventos e transforma-la em alguma forma de energia utilizável; a estes equipamentos adicionam-se os equipamentos de apoio e que são necessários para a captação e transformação da energia.

4. 1. Sistemas isolados

Como já visto, os primeiros sistemas eólicos foram construídos tendo como finalidade a moagem de grãos – veja Figura 4.1 -, o bombeamento de água, etc.

A necessidade de bombear grandes quantidades de água, como aconteceu nos Países Baixos, pode ser creditada como um dos fatos responsáveis pela popularização do uso da energia eólica; esta mesma necessidade também pode ser apontada como a responsável pelo grande número de “moinhos de vento” construídos e instalados no oeste dos Estados Unidos.



Figura 4.1. Sistema eólico com pás de tecido.

Mesmo nos dias atuais uma importante aplicação da energia eólica continua sendo o bombeamento de água. Em muitas regiões isoladas este bombeamento continua sendo feito com a utilização de bombas a pistão, que tem como característica básica de funcionamento a necessidade de operar com baixa velocidade, exigindo torques elevados; estas características levaram naturalmente à utilização de rotores com muitas pás (rotores multipás, roda americana, etc.). Estes sistemas eólicos apresentam grande simplicidade, são de pequeno porte e foram projetados para operar

isoladamente e com uma única finalidade. Com as mesmas características os sistemas eólicos foram utilizados, também, para a geração de eletricidade; neste caso são conhecidos como aerogeradores.

Um enfoque mais atual para o bombeamento de água consiste em se utilizar rotores de alto rendimento que são acoplados com geradores de energia elétrica; esta é usada no acionamento de bombas submersas, por exemplo, como ilustra a Figura 4.2.

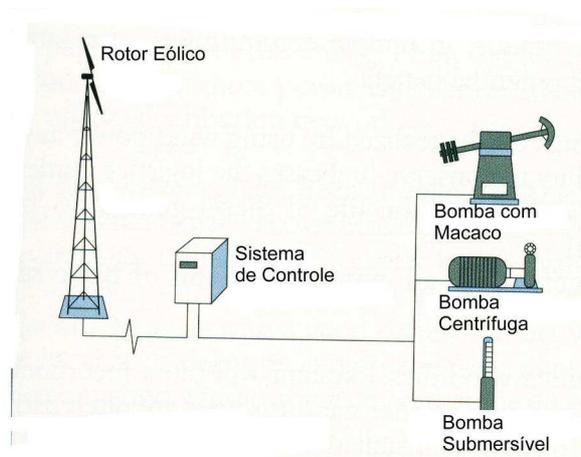


Figura 4.2. Sistema eólico utilizado para bombeamento de água.

Estes sistemas são, ainda, relativamente simples e projetados para operar isoladamente.

A energia dos ventos, captada e convertida em energia elétrica pelos sistemas eólicos, vem sendo utilizada em conjunto com a energia convertida por outros tipos de conversores; o conjunto de e conversores de energia recebe o nome de **sistemas híbridos**. Estes sistemas ganham popularidade como fontes de alimentação de redes isoladas em pequenas comunidades não servidas pelas redes das grandes distribuidoras. Os sistemas híbridos vem gradativamente substituindo as unidades de geração de eletricidade movidas a diesel.

Existem várias possibilidades de operação com sistemas híbridos, como por exemplo, (eólico–diesel), (eólico–fotovoltaico), etc. A Figura 4.3 mostra esquematicamente um sistema híbrido eólico-diesel-fotovoltaico. Este sistema apresenta uma flexibilidade de operação muito grande, o que é ilustrado, através de diferentes tipos de carga.

A utilização de sistemas híbridos produz diferentes tipos de benefícios:

- Economia de combustível, quando o sistema híbrido é utilizado em substituição a centrais que utilizam apenas o diesel.
- Aumento da vida útil dos geradores diesel.
- Os sistemas híbridos podem suportar uma carga maior e oferece a possibilidade de expansões futuras.

Deve-se observar que o correto dimensionamento do banco de baterias, nestes sistemas, pode ser fundamental para uma operação segura e economicamente viável.

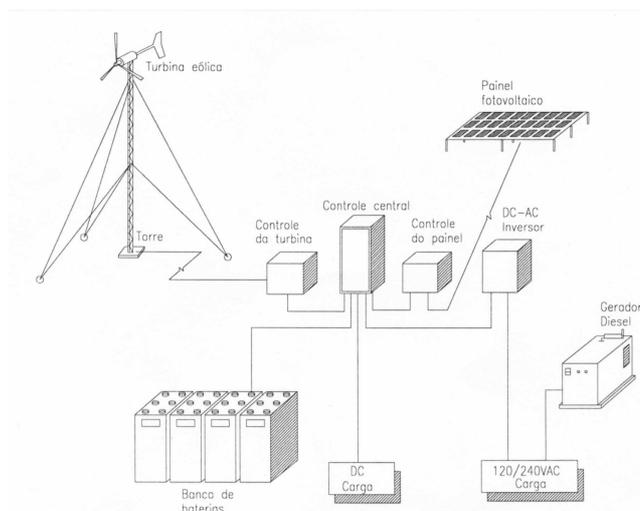


Figura 4.3. Sistema híbrido.

Comparado com o sistema de controle e gerenciamento da geração de eólico isolado, o sistema de controle de um sistema híbrido pode apresentar uma complexidade muito maior. Isto é necessário para se garantir o fornecimento de energia com uma qualidade exigida pelo usuário.

Como será visto, os rotores (eólicos) que são utilizados nos sistemas eólicos podem operar com rotação constante (rotores de velocidade (angular) constante) ou com rotação variável (rotores de velocidade (angular) variável).

Quando o sistema híbrido utiliza rotores de velocidade constante, estes acionam geradores de indução que geram a eletricidade necessária para aliviar as necessidades da rede.

Quando o sistema híbrido utiliza rotores de velocidade variável, estes operam de maneira semelhante, exigindo, porém, uma central de controle para que o sistema ofereça energia com a qualidade requerida, em geral corrente alternada.

4. 2. Sistemas interligados

Atualmente, a utilização de sistemas eólicos para a geração de energia em larga escala constitui-se numa das mais promissoras alternativas. Neste caso, utiliza-se um número grande de sistemas eólicos interconectados; são as **fazendas eólicas** (wind farms).

Estas fazendas eólicas, formadas por dezenas e até centenas de sistemas eólicos, são instaladas em sítios com regimes de vento de excepcional qualidade; este fato permite um aproveitamento mais eficiente de todas as potencialidades energéticas do sítio.

A utilização de fazendas eólicas apresenta ainda a vantagem de se ter a operação e a manutenção centralizada, o que representa uma vantagem óbvia.

As fazendas eólicas constituem-se, atualmente, na alternativa mais atraente para a geração de eletricidade em larga escala.



Figura 4.4. Fazenda eólica.

Vários são os fatores que contribuem para tornar as fazendas eólicas em um empreendimento de sucesso:

- a geração de energia pode ser feita perto do mercado consumidor, desde que haja sítios com regime de ventos adequado; os custos de transmissão a longas distâncias são minimizados.
- a geração de energia elétrica com a utilização de sistemas eólicos apresenta aspectos altamente competitivos quando se consideram os aspectos ambientais.
- a geração de energia elétrica com a utilização de sistemas eólicos é altamente competitiva economicamente falando.

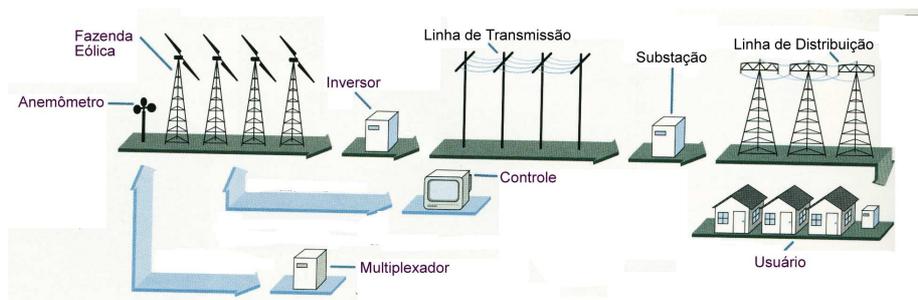


Figura 4.5. Geração e distribuição da energia gerada numa fazenda eólica.

Deve-se observar, ainda, que a tecnologia para a utilização de sistemas eólicos já se encontra suficientemente desenvolvida, ao contrário de várias outras fontes alternativas de energia.

O impacto ambiental de uma fazenda eólica é quase que desprezível quando comparado com outras fontes de energia. Mesmo assim há uma tendência em se instalar estas fazendas em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, nas regiões montanhosas, nas regiões costeiras – Figura 4.6A - e ultimamente até em alto mar – Figura 4.6B.



Figura 4.6a. Fazenda eólica instalada numa região costeira.

Estas regiões pouco propícias para outras aplicações apresentam-se como adequadamente boas para a instalação de uma fazenda eólica devido as características dos ventos locais.

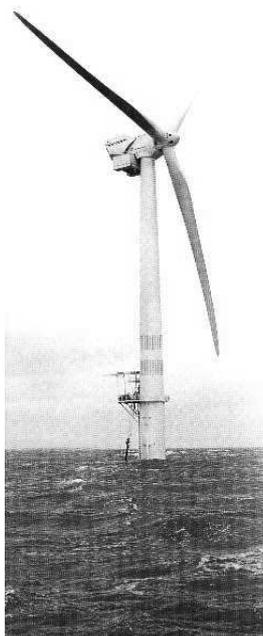


Figura 4.6b. Sistema eólico instalado em alto mar.

4. 3. Sistemas eólicos

4. 3.1. Aspectos gerais e classificação dos sistemas eólicos

O rotor de um sistema eólico é, provavelmente, o componente mais importante do sistema eólico; a sua função consiste na captação da energia cinética dos ventos e a sua transformação em energia mecânica que é entregue no seu eixo.

Por esta razão e pela marcante característica visual, a primeira classificação de um sistema eólico leva em consideração o tipo de rotor. Assim sendo, os sistemas eólicos (rotores) são classificados em sistemas eólicos (com rotor) de eixo horizontal – veja Figura 4.7 – e sistemas eólicos (com rotor) de eixo vertical – veja Figura 4.8.

Atualmente, a geração de eletricidade em grande escala, tendo os ventos como fonte de energia, é feita com a utilização de sistemas eólicos com rotores de eixo orientado horizontalmente.

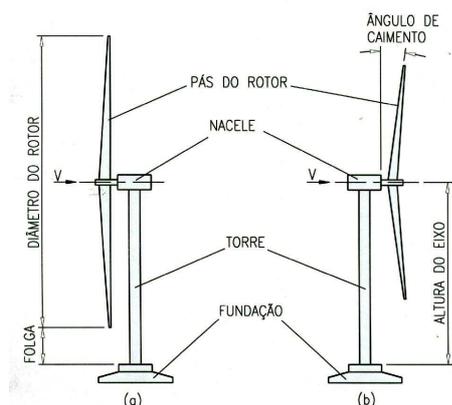


Figura 4.7. Sistema eólico com eixo horizontal.

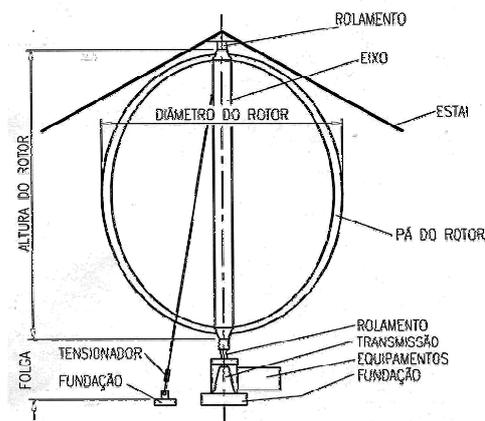


Figura 4.8. Sistema eólico com eixo vertical.

A Figura 4.7 mostra um sistema eólico com rotor de eixo horizontal tipo hélice – existem outros tipos de rotores de eixo horizontal. A nacelle é instalada sobre a torre e abriga todos os componentes internos do sistema eólico: gerador, caixa multiplicadora, sistema de eixos, mancais, acoplamentos, embreagens, freio e controles (passo, orientação, geração de eletricidade, etc.), sistema hidráulico, etc. A presença de toda esta massa, instalada a uma altura considerável é uma das críticas que se pode fazer para este tipo de arranjo.

A figura ilustra ainda dois tipos de posicionamento do rotor com relação a nacelle. Numa as pás do rotor giram a montante da nacelle (configuração “upwind”), isto é, o fluxo de ar em movimento (vento) passa através do rotor antes de ser perturbado pela nacelle; a consequência óbvia desta alternativa reside no melhor aproveitamento da energia disponível no vento: o rotor opera com um rendimento maior e com mais suavidade.

Na segunda alternativa (configuração “downwind”) o fluxo de ar, que passa pelo rotor, foi previamente perturbado pela presença da nacelle e da torre. A grande vantagem desta configuração reside na utilização de pás com ângulo de caimento não nulo que proporciona um certo grau de alinhamento do rotor com a direção dos ventos. Evidentemente, a operação destes rotores pode apresentar problemas de vibrações induzidas pela distribuição não uniforme da velocidade do vento no disco do rotor.

Três grandezas importantes são ilustradas na figura: o diâmetro do rotor - D -, a altura do eixo - H - e a folga que é representada pela diferença entre a altura do eixo e o raio do rotor - $(H - D/2)$.

Os sistemas eólicos com rotor de eixo vertical foram, talvez, os primeiros rotores a serem concebidos para a produção de trabalho mecânico, em geral a moagem de grãos. Por muito tempo, porém, estes rotores deixaram de apresentar qualquer desenvolvimento tecnológico. Com a crise do petróleo em 1973, várias fontes alternativas de energia passaram a ser examinadas e, neste movimento, o interesse pelos rotores de eixo vertical experimentou um aumento considerável. Este interesse se explica pelas inúmeras características marcantes que os rotores de eixo vertical apresentam. Duas características são evidentes:

- O movimento destes rotores independe da orientação dos ventos, dispensando a utilização de mecanismos de orientação do rotor.
- A configuração do sistema eólico com rotor de eixo vertical permite que se concentre todos os equipamentos da nacelle na sua base, ao nível do solo.

Existem basicamente dois tipos de rotores de eixo vertical. Os rotores de eixo vertical cujo movimento é associado à atuação da força de arrasto nas pás e os rotores de eixo vertical que são associados a atuação da força de sustentação.

Os rotores que fazem a captação da energia com a utilização da força de arrasto tem no rotor Savonius o seu representante mais conhecido. Estes rotores caracterizam-se por apresentarem um torque elevado, operando com velocidade (angular) baixa; o rendimento apresentado, como todos os rotores associados a força de arrasto, é baixo.

Os rotores que fazem a captação da energia com a utilização da força de sustentação tem no rotor Darrieus – veja Figura 4.8 – o seu representante mais importante. Estes rotores, em geral, apresentam baixo torque (os rotores Darrieus nem torque de partida apresentam) e operam com rendimento e velocidades elevadas. As grandezas importantes ilustradas na figura são: o diâmetro do rotor - D - e a altura do rotor - H -.

4.3.2. Sistema eólico de eixo horizontal: componentes

A Figura 4.9 ilustra esquematicamente os componentes principais de um sistema eólico com rotor de eixo horizontal.

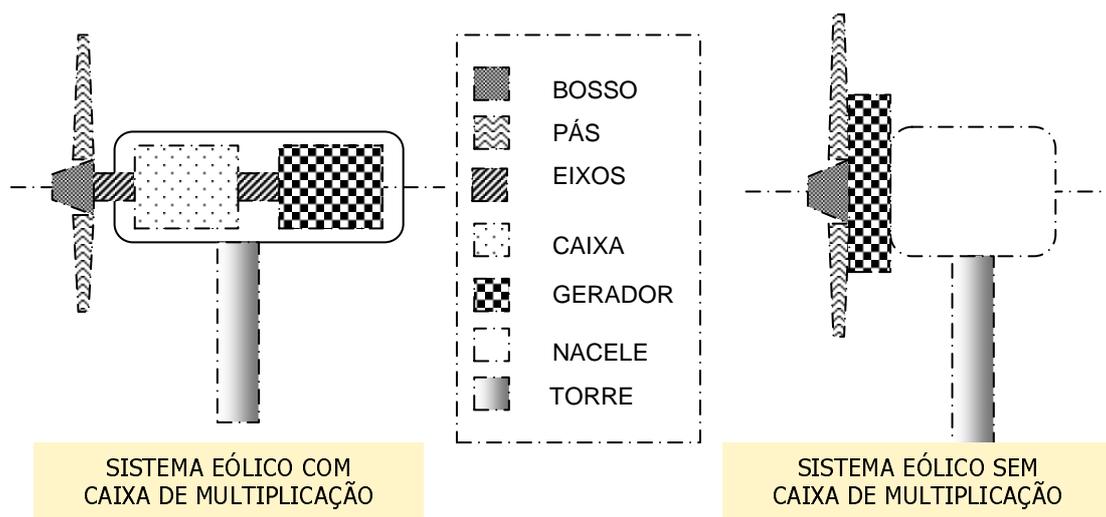


Figura 4.9. Componentes principais de um sistema eólico.

O sistema apresentado no lado esquerdo da figura possui uma caixa de multiplicação (da rotação) e pode ser considerado como um sistema com configuração tradicional. Nesta configuração o rotor possui uma rotação relativamente baixa quando comparada com a rotação do gerador. Para que ambos os componentes, o rotor e o gerador, operem nas condições ideais utiliza-se um sistema de transmissão dotado de uma caixa de multiplicação da rotação.

O sistema apresentado no lado direito da figura não possui a caixa multiplicadora; o eixo do rotor está diretamente acoplado ao eixo do gerador; neste caso o gerador possui a mesma rotação do rotor e, como pode ser observado, uma dimensão radial (diâmetro) avantajada, conseqüência do elevado número de pólos que o gerador precisa ter para operar apropriadamente nestas condições. Esta configuração tem sido adotada por alguns fabricantes

A Figura 4.10 ilustra a distribuição dos componentes de um sistema eólico, no interior da nacele de um sistema eólico convencional, que opera com uma caixa de multiplicação.

Nesta figura observa-se, além dos seguintes componentes

- Rotor eólico
- Transmissão (eixos, caixa multiplicadora, embreagens, etc.)
- Conversor de energia (gerador)

considerados como principais; outros componentes podem ser identificados:

- O sistema de frenagem, necessário para controlar a rotação do rotor, impedindo que ela assuma valores acima do permitido para assegurar a integridade estrutural do sistema.
- O sistema de controle da orientação do rotor, utilizado para orientar o rotor com relação a direção dos ventos. Esta orientação é necessária para assegurar uma operação eficiente do rotor e, adicionalmente, para controle da velocidade do rotor quando a velocidade do vento atinge valores acima do permitido.
- O sistema hidráulico, necessário para o acionamento dos sistemas de controle de passo do rotor, de orientação do rotor, de frenagem, etc.
- O sistema de controle de geração de eletricidade.

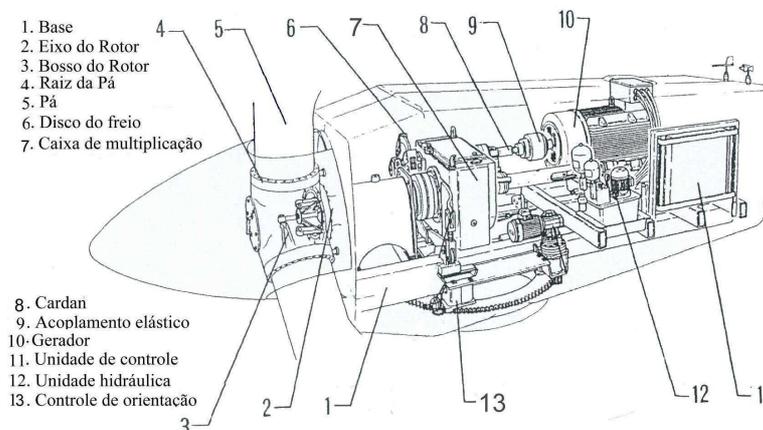


Figura 4.10. Componentes de um sistema eólico convencional.

Os sistemas eólicos de pequeno porte, em geral, possuem rotores eólicos que operam com baixas velocidades angulares (baixa frequência ou número de rotações por minuto) e torque elevados. Estas características são apropriadas para o acionamento de conversores e cargas mecânicas (bombas, cortadores, etc.).

O diâmetro dos rotores eólicos, nos sistemas eólicos de grande porte, projetados para a geração de eletricidade, pode atingir valores expressivos. Desta maneira, a inércia destes rotores também aumenta de maneira significativa, assim como a força centrífuga nas pás. Estes fatos limitam a velocidade angular dos rotores.

Por outro lado, os conversores elétricos (geradores) exigem, no eixo, velocidades angulares elevadas para que operem com rendimento alto.

Conclui-se que, para a operação eficiente de todo o sistema eólico, há a necessidade de se utilizar uma caixa multiplicadora entre o eixo do rotor e o eixo do conversor. Este fato pode ser observado nos arranjos dos sistemas eólicos mais comuns ou convencionais.

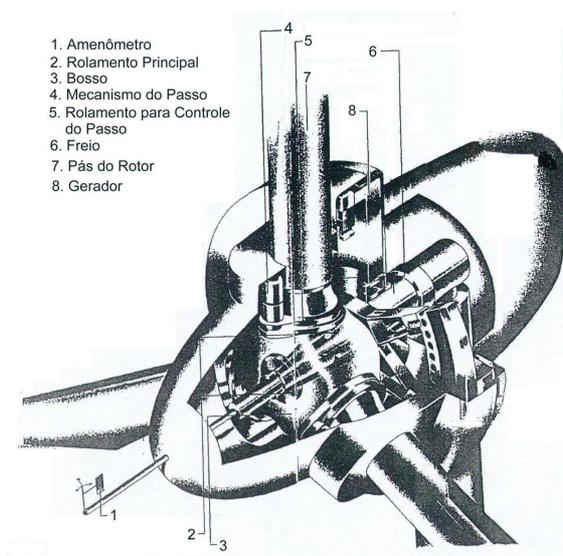


Figura 4.11. Sistema eólico sem caixa multiplicadora.

A utilização de uma caixa multiplicadora introduz alguns inconvenientes: aumentam-se as perdas assim como a complexidade mecânica aumenta-se a massa suspensa na nacela, introduz a necessidade de manutenção, etc.

Por estas razões, projetistas de sistemas eólicos tem apresentado arranjos inovadores que eliminam a caixa multiplicadora; o enfoque mais utilizado neste sentido tem sido o de reduzir a frequência no eixo do gerador, em geral conseguido com o aumento do número de pólos. Visualmente – veja Figura 4.11, estes projetos caracterizam-se por utilizar uma nacela mais curta e um anel de grande diâmetro no interior do qual se aloja o gerador.

4. 4. Análise geral de um sistema eólico

Faz-se, neste item, uma introdução à análise quantitativa de um sistema eólico. O objetivo desta análise é ilustrar o fluxo de energia através dos componentes considerados principais, isto é: o rotor, a transmissão e o gerador, como ilustrado esquematicamente na Figura 4.13.

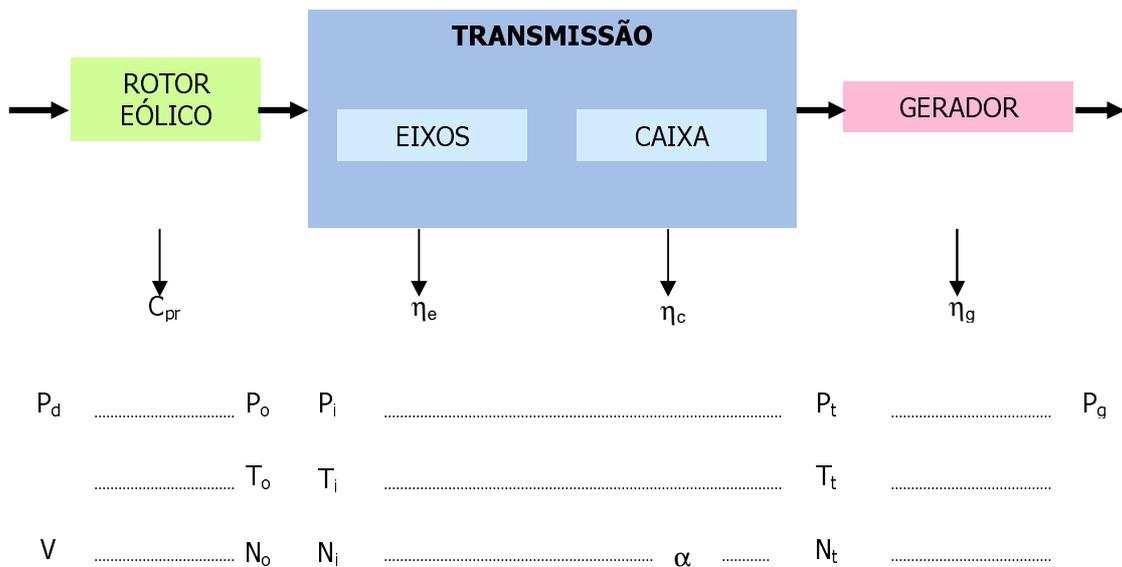


Figura 4.13. Diagrama esquematizado de um sistema eólico.

O diagrama esquematizado na figura é bastante útil para a análise do fluxo de energia no interior de um sistema eólico, para a análise da sua operação, na especificação da caixa de multiplicação, etc. Neste diagrama mostra-se o rotor, a transmissão composta pelo sistema de eixos e pela caixa de multiplicação e o conversor de energia (gerador).

A figura é completada por várias linhas:

- A primeira linha apresenta os rendimentos dos componentes, que são representados pelas letras η .
- A segunda linha apresenta as potências, representadas pela letra P.
- A terceira linha apresenta as cargas, restritas ao torque e que é representada por T.
- A quarta linha apresenta os elementos cinemáticos, no caso a velocidade do vento e a frequência de rotação nos eixos.

Estes elementos são utilizados nas análises que se seguem. A figura servirá, também, para se analisar o comportamento do sistema eólico.

Será necessário eleger-se um ponto onde será efetuada a identificação da potência disponível com a potência necessária; neste ponto a potência disponível (captada dos ventos e convertida em energia mecânica) deverá ser igual a potência requerida (necessária para acionar o conversor). Elege-se este ponto como sendo aquele localizado entre o rotor e a transmissão. A potência fornecida pelo rotor e as grandezas a ela associadas, como o torque e a rotação, são identificadas pelo subscrito - o - e a potência absorvida pela transmissão, bem como as grandezas a ela associadas como o torque e a rotação, pelo subscrito - i -; evidentemente, para que o sistema possa operar, tem-se que impor que

$$P_o = P_i$$

ou que

$$T_o = T_i \quad \text{e} \quad N_o = N_i.$$

Como mencionado, estas definições serão utilizadas mais abaixo, quando cada componente do sistema eólico for analisado com detalhes. No momento, as definições serão utilizadas na Figura 4.14 para se analisar o fluxo de energia através do sistema eólico.

O desempenho de todo o sistema eólico pode ser especificado pela relação entre a potência entregue pelo conversor - P_g - e a potência disponível - P_d -. Assim, define-se o **coeficiente de potência** (do sistema) como:

$$C_p = \frac{P_g}{P_d} = \frac{P_g}{\frac{1}{2}\rho V^3 A}$$

onde P_g é a potência entregue pelo sistema eólico (que é igual a potência entregue pelo gerador e, como visto, P_d é a potência disponível e que é igual a energia transportada pelos ventos (por unidade de tempo), através de uma superfície de área A. Por sua vez, A é a área de um círculo de diâmetro igual ao diâmetro do rotor.

Na expressão acima, se o rendimento dos componentes do sistema eólico, forem considerados, tem-se imediatamente uma forma mais detalhada para o coeficiente de potência:

$$C_p = C_{pr} \eta_t \eta_g$$

OBS.: os rendimentos indicados na expressão serão definidos mais abaixo.

Para que um sistema eólico funcione eficientemente é necessário maximizar P_g . Para se atingir este objetivo, cada componente deve operar dentro de suas características ótimas e em perfeita harmonia com os demais.

O rotor deve operar na condição que lhe permita um rendimento ótimo, mas deve, também, permitir que o conversor opere em condições ótimas; desta maneira reduz-se as perdas que são quantificadas pelos rendimentos dos componentes.

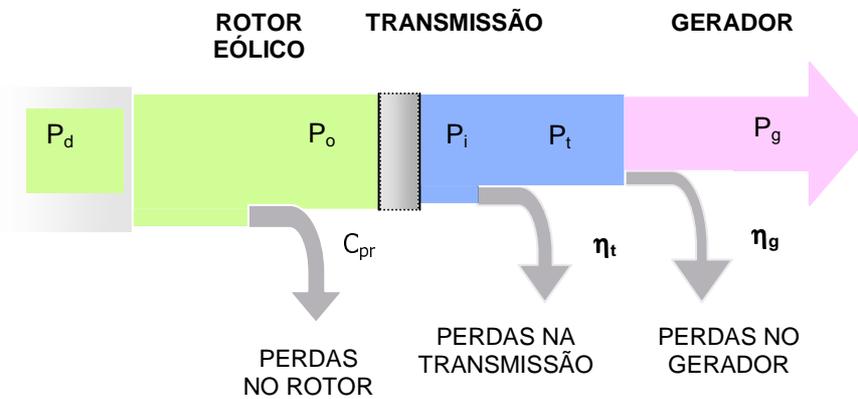


Figura 4.14. Fluxo de energia.

Nem sempre, no entanto, é possível conciliar o regime ótimo de operação de todos os componentes. Por exemplo, o rotor, em geral, opera com uma velocidade angular (rotação) inferior aquela que seria requerida para a operação ótima do conversor (quando este é um gerador); neste caso, deve-se escolher uma relação de multiplicação maior que a unidade ($\alpha > 1$) e que seja adequada para a operação ótima de ambos os componentes. Se o conversor for mecânico e estiver acoplado a uma bomba a pistão o valor ótimo da relação de multiplicação tende a ser menor que a unidade ($\alpha < 1$). Evidentemente a escolha correta do tipo de rotor, independentemente do valor da relação α , é de grande importância para a otimização do sistema. Um rotor rápido será a escolha natural quando o conversor é elétrico e um rotor lento quando o conversor é mecânico. A análise detalhada destes aspectos é feita ao se estudar os aspectos de operação e controle de sistemas eólico.

Cabe, finalmente, observar que o objetivo, ao se analisar um sistema eólico, consiste em se determinar a curva que descreve o comportamento de P_g em função da velocidade do vento. Esta análise é fundamental para se especificar o sistema mais adequado a um dado regime de ventos.

Como uma introdução à análise energética, considere a energia cinética transportada num volume unitário de ar, num vento de velocidade V ; ela é expressa por:

$$e_c = \frac{1}{2} \rho V^2$$

O fluxo desta energia, através de uma superfície de área A , é denominado de **potência disponível** e, como já visto, pode ser calculada como:

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

Na Figura 4.15, a potência é representada em função da velocidade do vento. Nesta figura apresenta-se, também, a curva anterior multiplicada por $(16/27)$, que exprime o limite de Betz e fornece o limite teórico máximo da potência, que pode ser extraído por um rotor.

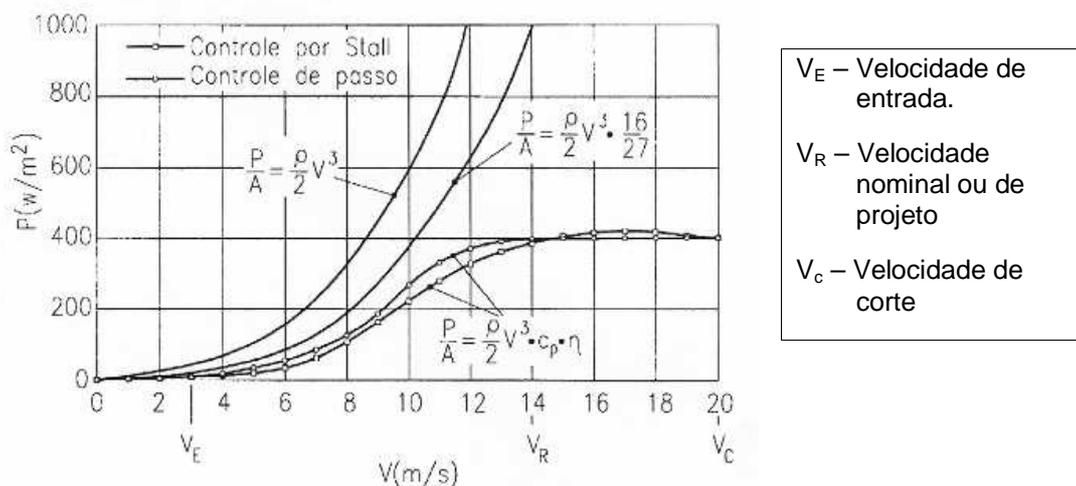


Figura 4.15. Curva de potência de um sistema eólico.

A figura apresenta, ainda, as curvas de potência entregue pelo sistema. Uma das curvas refere-se a um sistema com rotor cuja velocidade é controlada por “stall” (um assunto a ser tratado em outra oportunidade) e a outra a um sistema com velocidade controlada modificando-se o passo da pá (idem). Observe que o traçado destas curvas leva em consideração os rendimentos de todo o sistema: rotor, transmissão, conversor, etc.

A Figura 4.16 fornece o valor a potência específica – P_g/A – de sistemas eólicos comerciais em função da altura do eixo do rotor. Observa-se que os sistemas eólicos de maior porte apresentam desempenhos específicos superiores aos obtidos com os sistema de médio porte.

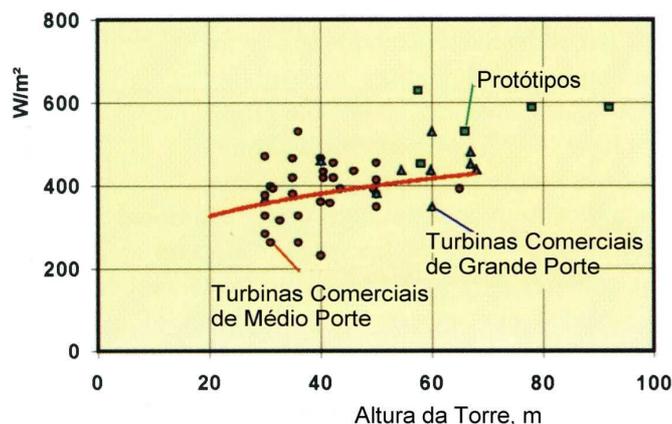


Figura 4.16. Potência específica de sistemas eólicos comerciais.

4.5. Componentes de sistemas eólicos

A análise será restringida apenas aos três componentes principais: o rotor, a transmissão e ao gerador.

4. 5.1. Rotor

4. 5.1.1. Aspectos gerais

A função primordial do rotor eólico é a de captar a energia cinética presente num fluxo de ar (vento) e transformá-la em energia mecânica, que é entregue através de seu eixo.

O fluxo de energia transportada pelo vento através do rotor é quantificado pela **potência disponível**, P_d , e a energia mecânica (por unidade de tempo) entregue pelo rotor, através de seu eixo, é quantificada pela **potência do rotor**, P_o .

Os mecanismos de captação e conversão da energia no rotor é um assunto afeto àqueles especialistas em aerodinâmica e serão apresentados em outra ocasião.

As partes principais de um rotor eólico são:

- **Eixo do rotor** eólico: elemento transmissor da energia captada e convertida pelo rotor e sobre o qual assenta-se o bossô.
- **Bosso:** é o elemento acoplado a extremidade do eixo e sobre o qual as pás são fixadas.
- **Pás do rotor:** superfícies aerodinâmicas que possuem a função de captar e converter a energia dos ventos em energia mecânica; os rotores modernos possuem poucas pás, em geral duas a três, que são esbeltas e operam com alta velocidade (frequência de rotação alta).
- **Mecanismos de controle:** componentes aerodinâmicos de frenagem representados por pequenos apêndices (superfícies de sustentação) e mecanismos de controle do passo, que posicionam as pás de maneira mais adequada com relação ao bossô.

A Figura 4.17 anexada como ilustração, mostra o desenvolvimento dos rotores eólicos nos últimos anos, na Alemanha. Observam-se rotores com mais de 60m de diâmetro e que acionam sistemas eólicos com mais de 1.5 MW de potência.

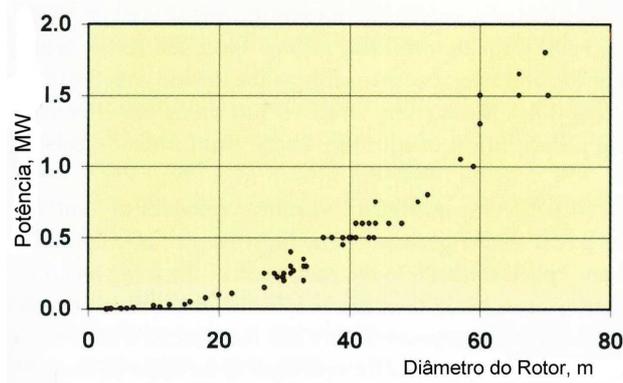


Figura 4.17. Desenvolvimento dos rotores de eixo horizontal.

A Figura 4.18 mostra os tipos principais de rotores eólicos. Uma primeira e mais importante classificação dos rotores eólicos, como já visto, leva em consideração a orientação do seu eixo.

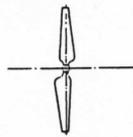
- Os rotores que operam com eixo horizontal são os mais difundidos.
- Os rotores de eixo vertical tem nos rotores Darrieus e Savonius seus dois representantes mais conhecidos; a característica mais importante destes rotores é a sua operação indiferente da direção dos ventos, o que dispensa o mecanismo de orientação. Os rotores de eixo vertical, em geral, não utilizam torres, permitindo que os pesados componentes (transmissão, geradores, etc.) sejam colocados junto ao solo.

Os rotores eólicos podem ser, alternativamente, classificados em função do tipo de força responsável pelo seu funcionamento.

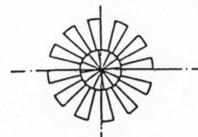
- Rotores cujos mecanismos de captação da energia dependem da **força de arrasto** - cita-se o rotor Savonius como exemplo -: são rotores de pás largas, possuem rendimento baixo, operam com baixas velocidades (rotação baixa) e apresentam torque elevado; por esta razão são apropriados para o acionamento de dispositivos mecânicos como as bombas a pistão.
- Rotores cujos mecanismos de captação da energia dependem da **força de sustentação**: possuem pás estreitas, apresentam alto rendimento e operam com velocidades altas e baixo torque, sendo apropriados para o acionamento de geradores de eletricidade.

Vários outros critérios podem ser utilizados para classificar os rotores. Por exemplo, os rotores de eixo horizontal podem ser posicionados antes (upwind) ou depois (downwind) da nacelle, veja Figura 4.7.

EIXO HORIZONTAL: Mecanismo → sustentação

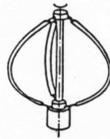


HÉLICE
(Alta Velocidade)

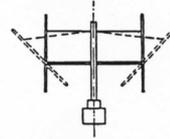


MULTIPÁ
(Alta Velocidade)

EIXO VERTICAL: Mecanismo => sustentação

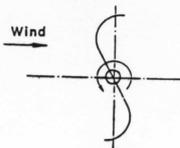


DARRIEUS

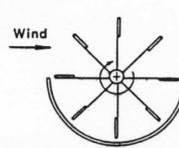


H-DARRIEUS

EIXO VERTICAL: Mecanismo => arrasto



SAVONIUS



PLACAS PLANAS

Figura 4.18. Tipos de rotores eólicos.

As características utilizadas para classificar os rotores são importantes para uma análise dos mecanismos utilizados para a captação da energia dos ventos e sua conversão em energia mecânica no eixo. Estas características são importantes, também, para a análise do comportamento dinâmico do sistema como visto, por exemplo, quando se apresentou os rotores “upwind” e “downwind”.

4. 5.1.2. Fluxo de energia

A Figura 4.19 é utilizada para a análise do fluxo de energia através do rotor. Como já visto, a função primordial do rotor eólico consiste na captação da energia cinética transportada pelos ventos. Assim sendo seja a potência disponível, expressa em função da velocidade do vento V, como:

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

Por outro lado, se o eixo do rotor gira com uma frequência $N = N_o$ e o torque disponível é indicado por $T = T_o$, a **potência entregue pelo rotor** é quantificada pela expressão:

$$P = P_o = 2\pi N_o T_o$$

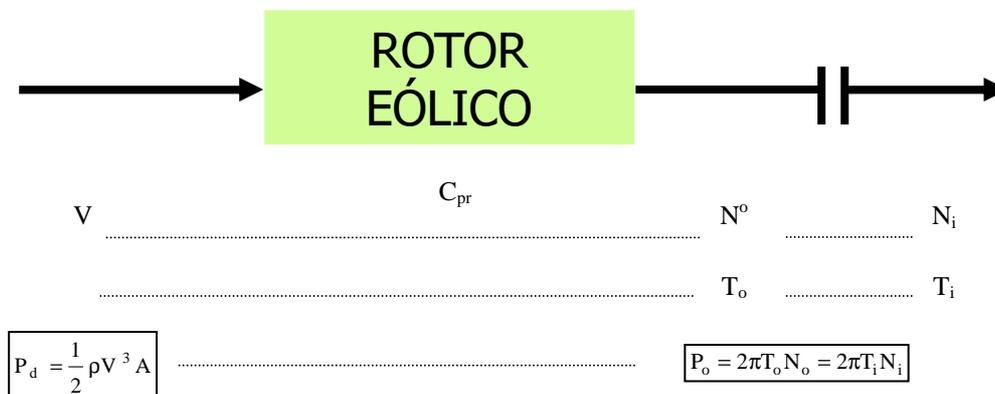


Figura 4.19. Fluxo de energia através do rotor.

Evidentemente, o desempenho do rotor pode ser representado pela relação entre P e P_d . Esta relação recebe a denominação de **coeficiente de potência do rotor** e é indicada por C_{pr} , que é definido como:

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

OBS: Não se deve confundir o coeficiente de potência do rotor, C_{pr} , com o coeficiente de potência do sistema, C_p .

4. 5.1.3. Parâmetros aerodinâmicos

As questões que surgem naturalmente, no momento, são: como se pode estimar o valor do coeficiente de potência do rotor, qual é o seu comportamento, etc.

Para responder a estas questões, lança-se mão da Análise Dimensional. Com esta finalidade, considere a equação funcional, que relaciona a potência do rotor com as grandezas das quais ela depende, isto é:

$$P = P_o = f(D, \rho, V, N_o, X_1, X_2, \dots)$$

onde D indica o diâmetro do rotor e X_1, X_2, \dots representam parâmetros geométricos que definem o rotor, como por exemplo o número de pás, o passo, etc.; as demais variáveis já foram definidas. A partir da relação acima, a Análise Dimensional fornece a equação adimensional equivalente:

$$C_{pr} = F(TSR, G_1, G_2 \dots)$$

onde os **coeficientes de potência do rotor** e a **razão de velocidades** são definidos, respectivamente, como:

$$C_{pr} = \frac{P_o}{\frac{1}{2}\rho V^3 A} = \frac{8P_o}{\pi\rho V^3 D^2} \quad \text{e} \quad TSR = \frac{\pi D N_o}{V}$$

e $G_1, G_2 \dots$ são parâmetros adimensionais que definem a geometria do rotor.

OBS: Para um mesmo rotor, isto é, se G_1, G_2, \dots são constantes, a equação adimensional toma a forma simplificada.

$$C_{pr} = F(TSR)$$

De maneira análoga, obtém-se as relações equivalentes para o torque e para o empuxo.

$$C_T = F(TSR) \quad \text{onde} \quad C_T = \frac{8T_o}{\pi\rho V^2 D^3} = \text{Coeficiente de Torque}$$

e

$$C_E = F(TSR) \quad \text{onde} \quad C_E = \frac{8E_o}{\pi\rho V^2 D^2} = \text{Coeficiente de Empuxo}$$

O valor do coeficiente de potência (de um rotor) fornece uma medida do desempenho do rotor. Analogamente, o coeficiente adimensional TSR fornece uma medida da velocidade do rotor; observe que o TSR representa a razão entre a velocidade tangencial da ponta das pás e a velocidade do vento, que é tomada como a velocidade representativa ou de referência.

Para um dado rotor (isto é, se a geometria for mantida constante) a Análise Dimensional mostra que C_{pr} depende apenas de TSR. Esta dependência é determinada através de uma análise aerodinâmica, efetuada experimentalmente ou com a utilização de modelos matemáticos. A Figura 4.20 mostra curvas típicas que exprimem o comportamento de C_{pr} para diferentes tipos de rotores.

A utilização de modelos matemáticos relativamente simples permite mostrar que as curvas devem ser limitadas superiormente pela **Curva de Betz**, que estipula o valor de C_{pr} máximo em aproximadamente 60%. Na prática, os melhores rotores apresentam valores máximos na ordem de 40%.

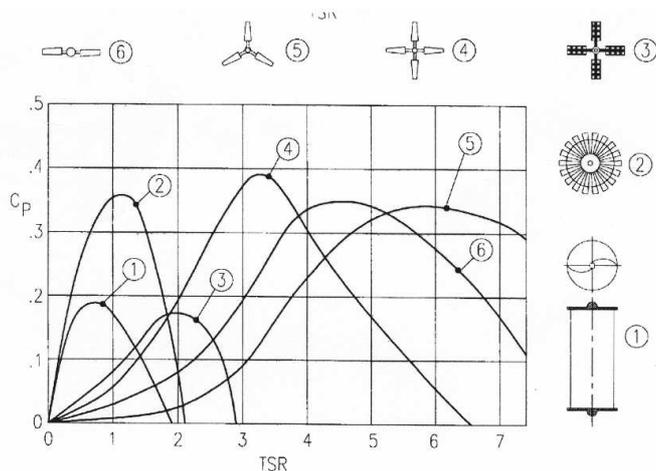


Figura 4.20. Coeficiente de potência para diferentes tipos de rotores.

A análise da figura permite observar, ainda, que:

A) rotores com alta solidez (rotores 1,2, 3, etc), isto é, com pás largas e em grande número, possuem as seguintes características:

- tem na força de arrasto o seu mecanismo de operação; este é um assunto tratado em outra oportunidade
- estes rotores apresentam um baixo rendimento
- o valor de TSR ótimo é baixo (são rotores de baixa velocidade)
- a curva de C_{Pr} cobre uma faixa estreita de TSR.

B) rotores com baixa solidez (rotores 5,6,7), isto é, possuem pás estreitas e em pequeno número, possuem as seguintes características:

- tem na força de sustentação o seu mecanismo de operação
- estes rotores apresentam um rendimento alto
- o valor de TSR ótimo é alto (são rotores de alta velocidade)
- a curva de C_{Pr} cobre uma ampla faixa de TSR.

Mostra-se também, que, para um dado rotor, o coeficiente de torque depende apenas de TSR. Este fato pode ser mostrado, alternativamente, observando que a razão entre o coeficiente de potência e o de torque assume a forma

$$\frac{C_{Pr}}{C_T} = 2\pi(\text{TSR})$$

A Figura 4.21 mostra as curvas que descrevem o comportamento do coeficiente de torque para diferentes rotores.

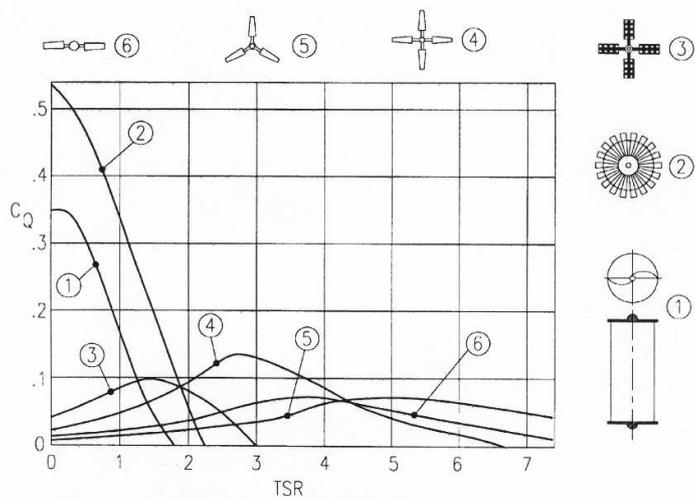


Figura 4.21. Coeficiente de torque para diferentes tipos de rotores.

Analisando a figura pode-se constatar que os rotores de solidez alta possuem torque elevado e que se manifesta nos baixos valores de TSR. Estes rotores têm na força de arrasto o seu mecanismo de operação e são, portanto rotores de baixa velocidade. Por esta razão estes rotores são apropriados para o acionamento de cargas de origem mecânica que exigem altos torques a baixas rotações. Ao contrário, os rotores de baixa solidez são rápidos e são mais apropriados para a utilização com conversores elétricos (geradores).

4. 5.2. Transmissão

4. 5.2.1. Aspectos gerais

A palavra transmissão é utilizada, genericamente, para indicar o conjunto de eixos, caixa multiplicadora (ou redutora), embreagens, mancais, etc.

A função primordial da transmissão é a de transportar a energia entregue pelo eixo do rotor até o conversor.

Compatibilizar os requisitos do conversor com as características do rotor, garantindo assim um funcionamento harmonioso e efetivo do sistema eólico, é uma segunda função importante da transmissão.

Nos sistemas eólicos com conversores mecânicos – veja Figura 4.22 - uma função adicional do sistema de transmissão consiste na mudança de direção (as vezes até de tipo) do movimento. Observe, ainda na figura, que o movimento de rotação no eixo vertical é multiplicado e a potência é dividida e entregue através de dois eixos secundários.

Os modernos sistemas de transmissão presentes nos sistemas eólicos de grande porte e que são utilizados para a geração de eletricidade podem atingir sofisticação extrema ao transmitir potências elevadas e em alta rotação.

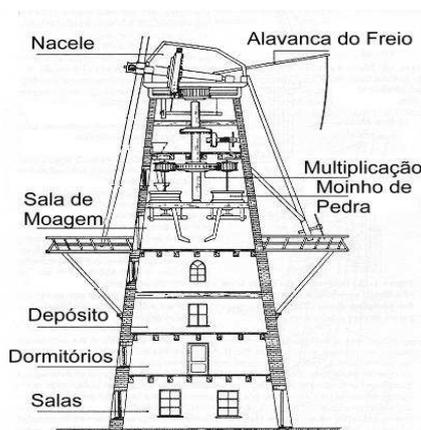


Figura 4.22. Moinho de vento holandês.

OBS: Este moinho, como pode ser observado na figura era utilizado para a moagem de grãos.

A Figura 4.23 apresenta o esquema de transmissão utilizado pela Boeing, no sistema eólico Mod-5B de 3.2 MW, onde o movimento de rotação é transmitido por meio de eixos alinhados, sendo, no entanto, multiplicado com a utilização de uma caixa multiplicadora planetária.

Como observação final, menciona-se que um elemento sempre presente no sistema de transmissão é o freio mecânico.

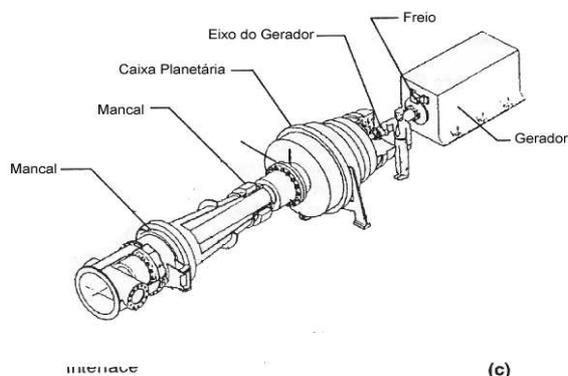


Figura 4.23. Transmissão do sistema eólico boeing mod 5b.

$$\eta_t = \eta_c \eta_e$$

Não se deve esquecer que a relação, α , entre N_t e N_i define a razão de multiplicação da caixa, isto é:

$$\alpha = \frac{N_t}{N_i}$$

Levando-se em consideração as definições de rendimento e de P_t e P_i tem-se imediatamente a relação importante

$$T_i = \frac{\alpha}{\eta_t} T_t$$

Deve-se observar a seguinte nomenclatura

$\alpha > 1 \implies$ a caixa é multiplicadora

$\alpha < 1 \implies$ a caixa é redutora

$\alpha = 1 \implies$ a transmissão é direta (sem caixa)

4. 5.3. Gerador

4. 5.3.1. Aspectos gerais

A palavra **conversor**, no presente contexto, é utilizada para identificar o componente do sistema eólico responsável pela conversão a energia mecânica entregue pelo eixo da transmissão em alguma forma de energia.

Se o conversor entregar energia mecânica ou hidráulica, ele será identificado como conversor mecânico – veja Figura 4.25. Uma bomba de água é um conversor mecânico que entrega energia na forma hidráulica; um moinho utilizado para moer grãos é, também, um conversor mecânico. Em geral os sistemas eólicos com conversores mecânicos são de pequeno porte.

Os conversores elétricos absorvem a energia mecânica através de seu eixo e a transforma em energia elétrica (CC ou CA). Os conversores elétricos são genericamente denominados de geradores. Aliás, como a grande parte dos sistemas eólicos de maior porte (e significado) utilizam conversores elétricos, costuma-se usar indistintamente a palavra gerador para designar o conversor.

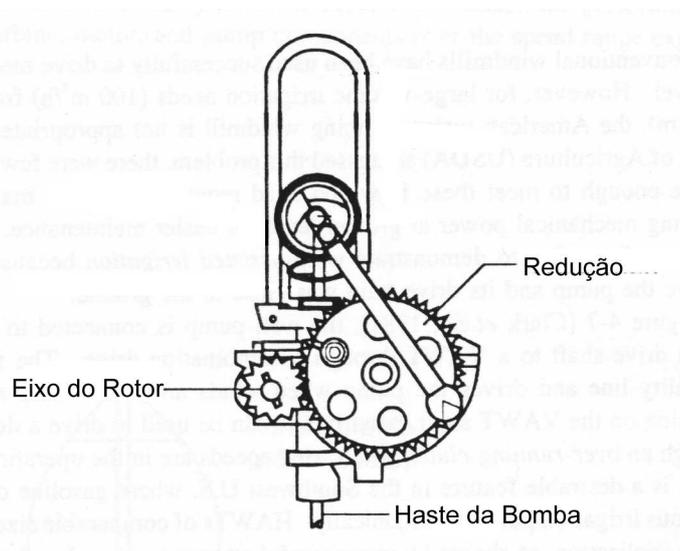


Figura 4.25. Conversor mecânico.

Obs: Este conversor mecânico está acoplado a uma caixa redutora e converte o movimento de rotação do eixo em movimento alternativo que irá acionar a haste da bomba.

Sistemas eólicos com conversores elétricos são de utilização geral; estes conversores podem ser encontrados em sistemas de pequeno porte – os aerogeradores – em sistemas eólicos utilizados para geração de eletricidade a ser suprida em redes isoladas e em sistemas de grande porte conectados às redes de distribuição de eletricidade.

Sistemas eólicos de pequeno porte, projetados para a geração de eletricidade, possuem duas características marcantes:

- O conversor (gerador) é conectado diretamente no eixo do rotor, isto é, sem uma caixa de multiplicação.
- O rotor opera com velocidade variável (a frequência de rotação varia de acordo com a velocidade do vento).

Os sistemas mais simples (com potência variando entre 150 W a 500W) utilizam um dínamo, que tem como característica a geração de corrente contínua (CC) no rotor e a transmissão desta corrente é feita com a utilização de escovas que deslizam sobre anéis. Esta característica é responsável pelas exigências elevadas de manutenção com a substituição periódica das escovas. A eletricidade gerada é utilizada para carregar baterias.

Os sistemas mais modernos utilizam alternadores. Estes geradores coletam a corrente alternada (CA) diretamente do estator. A corrente elétrica que passa através do conjunto escovas/anéis é baixa uma vez que ela é apenas para manter o campo magnético; desta maneira as exigências de manutenção são bastante reduzidas. Vários esquemas existem para o aproveitamento da energia assim gerada – veja Figura 4.26:

- Esquema CA → DC: a corrente alternada gerada é retificada para o carregamento de baterias
- Esquema CA → DC → AC: a corrente alternada gerada é, inicialmente, retificada e depois transformada de volta, com a utilização de um inversor, em corrente alternada com frequência constante; esta, por possuir as características bem definidas, pode então ser inserida na rede de distribuição de eletricidade.

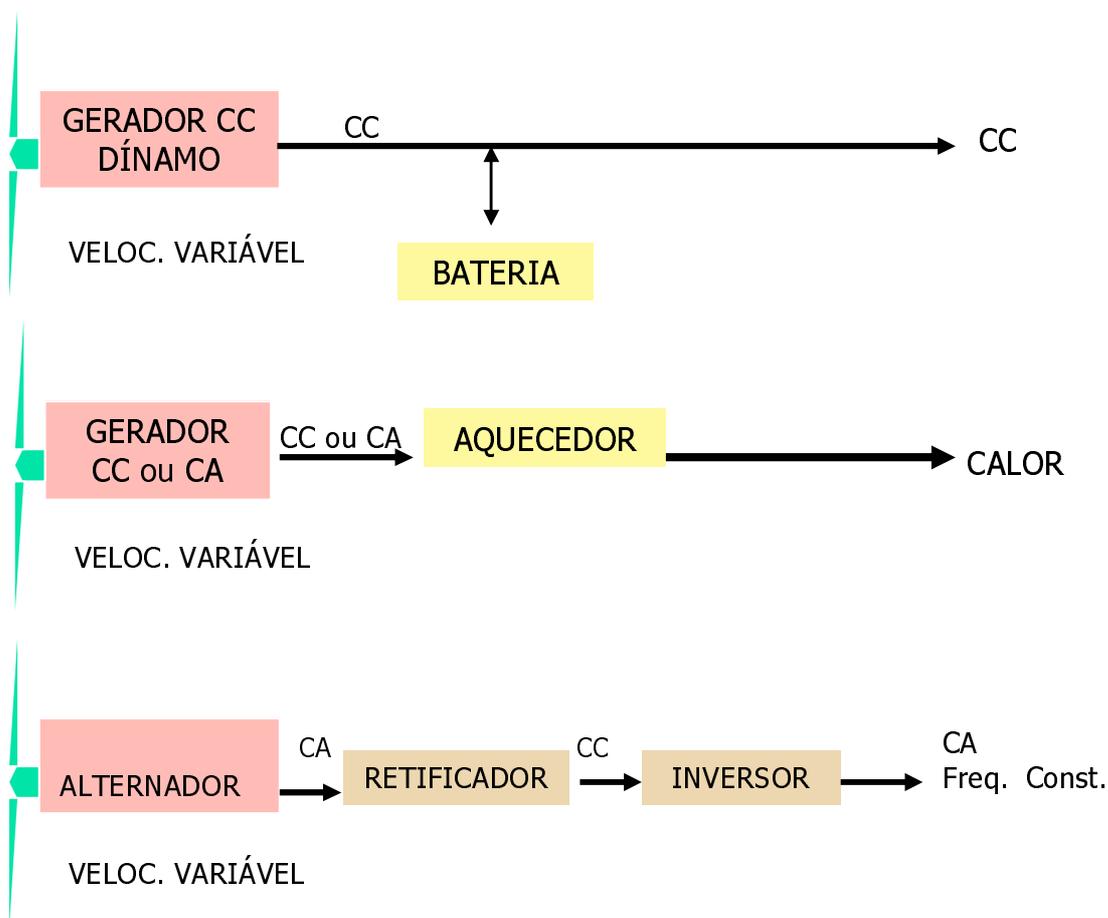


Figura 4.26. Sistemas isolados.

Sistemas com um porte maior são projetados primariamente como fonte de energia mecânica ou elétrica; neste último caso podendo ser conectados a pequenas redes de distribuição de eletricidade ou redes isoladas.

A tendência atual, no entanto, consiste na utilização dos sistemas eólicos suplementados por outros tipos de geradores quando se tem períodos de baixa velocidade do vento. Em geral estes geradores são compostos por grupos diesel, formando sistemas híbridos do tipo eólico/diesel.

Estes sistemas híbridos, geralmente com potência na faixa de 1 kW a 100 kW, são equipados com conversores do tipo geradores de indução. Estes geradores precisam operar com velocidade angular constante (rotação constante) para manter a frequência da rede e apresentam duas grandes vantagens:

- São relativamente baratos
- Podem ser facilmente sincronizados com a rede.

Uma grande desvantagem deste tipo de gerador e que tem limitado sua escolha (quando se pretende injetar energia na rede) é que a energia gerada está associada ao seu alto consumo de potência reativa. Existem, porém, esquemas que permitem contornar esta dificuldade.

Em muitas oportunidades, os sistemas eólicos do porte em consideração possuem dois geradores com potências diferentes; o menor opera nas baixas velocidades do vento. Este esquema tem como objetivo contornar a característica dos geradores de possuírem um rendimento muito baixo, quando operando fora de sua potência nominal.

Os sistemas eólicos de grande porte são especialmente projetados para serem interligados a rede de distribuição de energia. Este fato exige que as características da energia gerada, especialmente no que se refere a frequência, sejam bem definidas para garantir a qualidade requerida

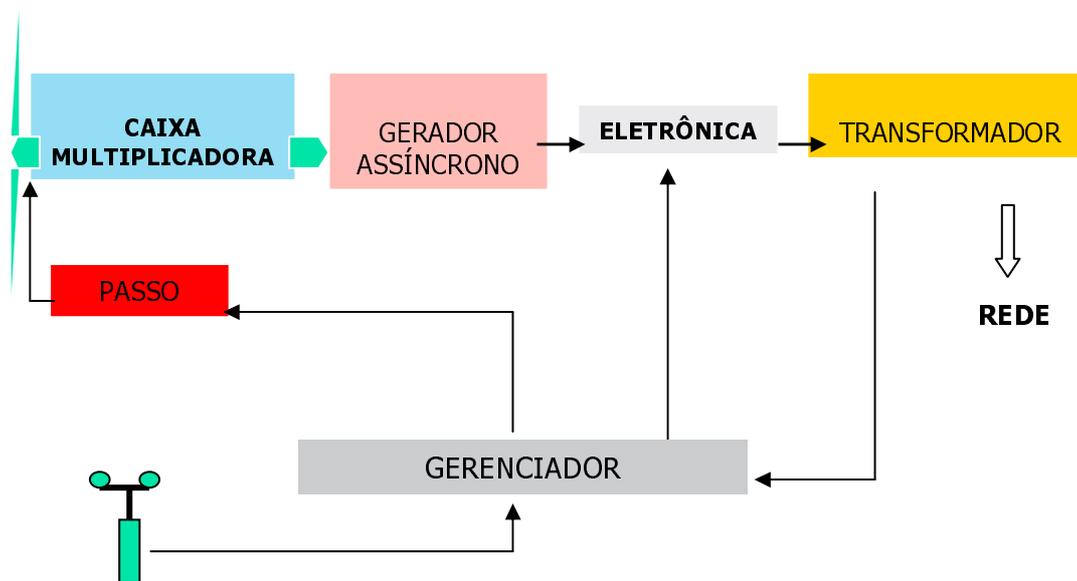


Figura 4.27. Sistema eólico de grande porte rotor com velocidade constante.

Desta maneira, a escolha do gerador caminha naturalmente para o gerador síncrono que produz energia (CA) de ótima qualidade e com um rendimento superior aos geradores de indução.

Os geradores síncronos, no entanto, exigem um regulador externo de voltagem, além de não possuírem flexibilidade para amortecer as cargas transmitidas por todo o sistema de transmissão. Em adição a estes aspectos, deve-se mencionar que os geradores síncronos exigem que o rotor eólico trabalhe com velocidade constante diminuindo assim o seu rendimento aerodinâmico.

Por estas razões o esquema de geração com velocidade (angular do eixo do rotor) variável tem ganhado muitos adeptos – veja Figura 4.28. Este esquema permite que o rotor eólico trabalhe com um rendimento maior (especialmente nas baixas velocidades do vento) e com uma redução considerável das cargas estruturais na transmissão, causadas pelas rajadas.

A qualidade da energia gerada praticamente se iguala àquela dos geradores síncronos. É evidente que existe a exigência de equipamentos eletrônicos de potência adicionais para garantir que a frequência da corrente gerada seja constante.

São oportunas algumas observações sobre a forma de se produzir energia com frequência constante, utilizando os inversores.

- Os inversores são utilizados, também, para produzir CA a partir da CC fornecida pelas baterias.
- Os inversores rotativos utilizam CC de baterias para acionar um conjunto motor-gerador com a finalidade de produzir CA com frequência constante.
- Os inversores síncronos utilizam a forma de onda da corrente da rede como sinal para acionar a ponte de tiristores; esta ponte funciona como portas que permitem a passagem da corrente com a voltagem correta de acordo com as necessidades.

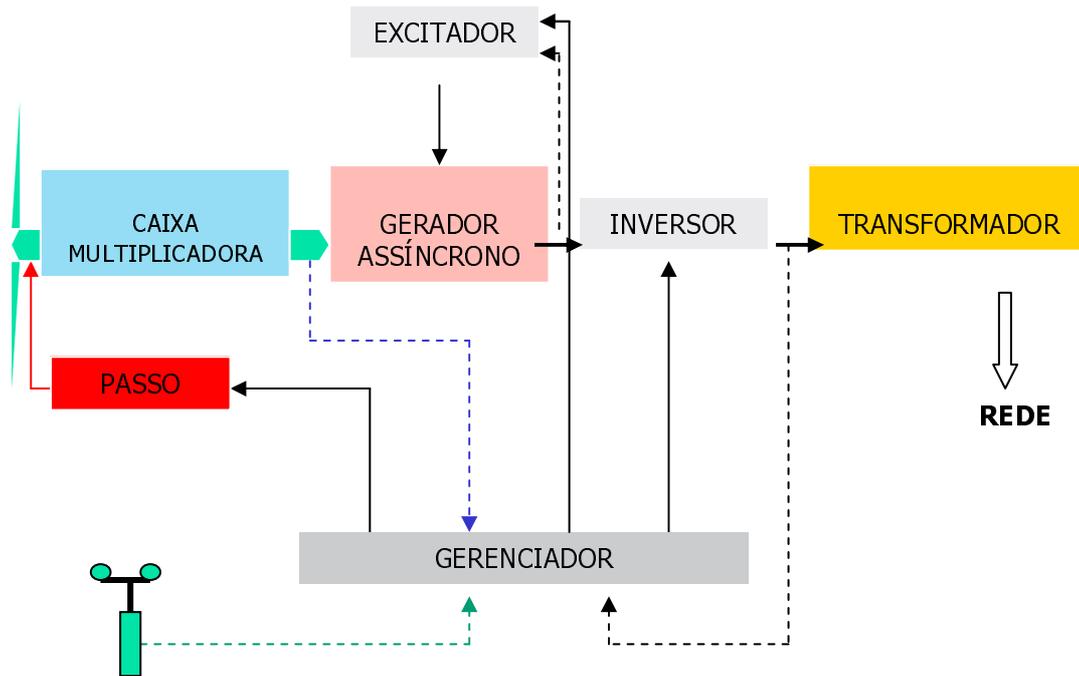


Figura 4.28. Sistema eólico de grande porte rotor com velocidade variável.

Uma alternativa aos sistemas eólicos com configuração tradicionais rotor-transmissão-gerador é apresentada pelos sistemas com transmissão direta. Anteriormente, foi visto que esta alternativa é utilizada pelos sistemas eólicos de pequeno porte. A Figura 4.11, no entanto, ilustra a utilização de uma transmissão direta em sistemas eólicos de grande porte; esta é uma alternativa que tem ganhado muitos adeptos. A sua vantagem consiste na eliminação da caixa multiplicadora e na simplicidade da transmissão.

A dificuldade na adoção desta alternativa reside na dificuldade de compatibilizar a baixa velocidade (angular) do rotor com a alta velocidade (angular) requerida pelo gerador.

Esta dificuldade, pelo menos em teoria, pode ser contornada com a utilização de geradores com um número elevado de pólos, que permite operar-se com uma velocidade menor. Estes geradores possuem um diâmetro avantajado e exigem um projeto mecânico refinado

4. 5.3.2. Fluxo de energia

A função primordial deste componente consiste na conversão da energia mecânica entregue pela transmissão em alguma forma de energia (mecânica, hidráulica ou elétrica)

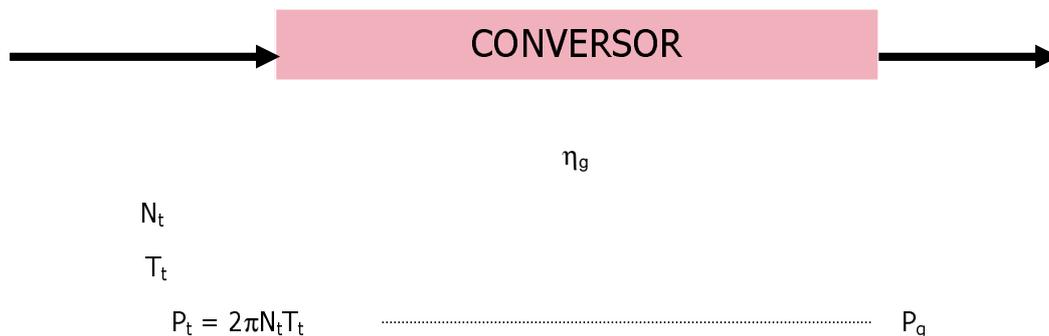


Figura 4.29. Fluxo de energia através do conversor.

Seja, P_t , a potência entregue pela transmissão ao conversor. Indica-se a potência do conversor por P_g . Num gerador esta potência é facilmente identificada, mas num conversor mecânico pode-se encontrar alguma dificuldade para se quantificar exatamente esta grandeza.

O **rendimento do conversor** é definido como:

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_t}$$

4.5.3.3. Potência requerida e potência gerada

Obviamente, a potência fornecida pelo conversor, P_g , representa a potência de todo o sistema eólico. Utilizando as relações já analisadas, tem-se que:

$$P_g = P_d(C_{pr} \cdot \eta_t \cdot \eta_g) \quad \text{ou} \quad P_g = \frac{1}{2} \rho V^3 A (C_{pr} \cdot \eta_t \cdot \eta_g)$$

Normalmente, esta potência é representada em função da velocidade do vento, como mostra a Figura 4.15.

Costuma-se, também, representar a potência do sistema eólico na forma adimensional, isto é, define-se o coeficiente de potência do sistema eólico como:

$$C_p = \frac{P_g}{\frac{1}{2} \rho V^3 A}$$

OBS: não confundir o coeficiente de potência do sistema eólico – C_p – com o coeficiente de potência do rotor - C_{pr} .

As curvas apresentadas na Figura 4.30 mostram esquematicamente o comportamento da potência requerida por diferentes tipos de conversores; obviamente, a potência requerida pelo conversor é igual a potência entregue pela transmissão, isto é, P_t . Estas curvas são importantes para análises de problemas de síntese, ou seja a determinação das características do rotor, da transmissão, etc. Entre outras coisas, estes problemas servem para a determinação da razão de multiplicação da caixa.

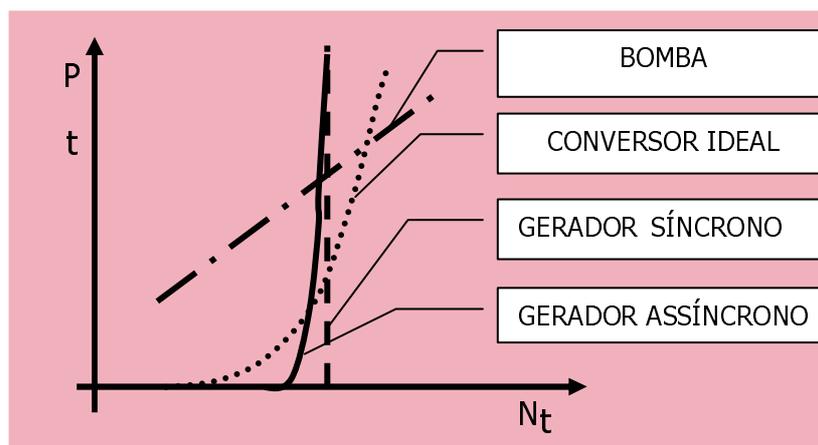


Figura 4.30. Potência requerida por diferentes conversores.

Como será visto, existe uma curva denominada de curva do conversor ideal. O conversor ideal apresenta uma curva de potência requerida que permite o acoplamento perfeito com o rotor. Esta curva possui a mesma tendência da curva que une os pontos de C_{pr} máximo, quando se utiliza o gráfico $P_o \times N$, tendo a velocidade como parâmetro. Evidentemente nenhum conversor apresenta uma curva ideal, mas os dínamos apresentam curvas que se aproximam bastante dela.

Os conversores mecânicos apresentam curvas aproximadamente lineares enquanto que os geradores síncronos apresentam retas verticais.

5. Operação de sistemas eólicos

Este capítulo é dedicado a análise dos componentes como elementos de um sistema eólico que se acoplam com vistas a um funcionamento harmonioso e eficiente.

O funcionamento eficiente de um sistema eólico implica no aproveitamento máximo da energia disponível nos ventos.

5.1. Captação e conversão da energia dos ventos

Um sistema eólico tem como finalidade a captação da energia cinética transportada pelos ventos - veja na Figura 5.1 a curva da **Potência Disponível**, isto é, $[(P_d \times V)]$ - e converte-la da maneira mais eficiente possível numa forma de energia aproveitável - veja na Figura 5.1. a curva de **Potência de um Sistema Eólico**, isto é, $[(P_g \times V)]$.

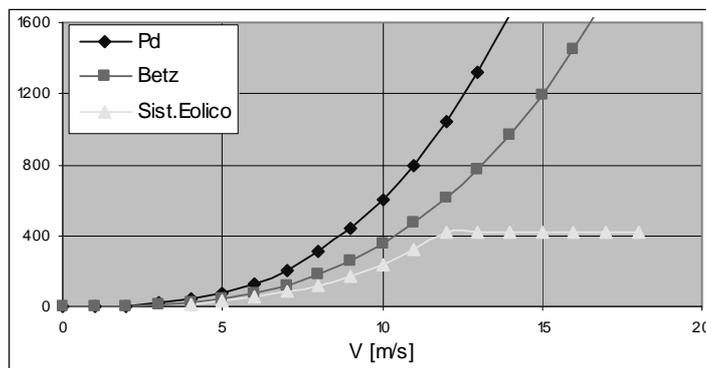


Figura 5.1. Curvas de potência.

A captação da energia dos ventos e a sua conversão em energia mecânica são feitas pelo rotor. O desempenho dos rotores eólicos é limitado teoricamente pelo **limite de Betz**, veja, na figura, a curva identificada por Betz. Na prática, porém, os rotores eólicos apresentam perdas, nunca atingindo a potência fornecida por este limite; de uma maneira geral, um bom rotor eólico consegue captar e converter 35% a 50% da energia disponível. Às perdas introduzidas pelo rotor deve-se somar aquelas associadas a transmissão e ao conversor. O rendimento da transmissão é da ordem de 95% e o rendimento do conversor situa-se na faixa de 50% a 95%.

A figura mostra, ainda, que a energia transportada pelos ventos de baixa velocidade não é aproveitada pelo rotor. De fato, existe uma velocidade mínima, a **velocidade de entrada** - V_E - abaixo da qual o sistema é inoperante. De maneira análoga, identifica-se a **velocidade de corte** - V_C - acima da qual o sistema é tirado de operação para preservar a sua integridade. Observe que a partir da velocidade de entrada a potência do sistema eólico começa a aumentar gradativamente até atingir a **velocidade nominal** - V_N - e, a partir daí mantém-se constante até atingir a velocidade de corte.

A operação na faixa de velocidades compreendida entre V_N e V_C é feita com o sistema operando com uma potência muito abaixo do que se poderia, tendo em vista a potência disponível. Este modo de operação é, também, limitado para preservar a integridade do sistema.

A energia gerada pelo sistema pode ser calculada multiplicando-se o valor da potência do sistema, que é uma função da velocidade do vento, pelo tempo de operação nesta velocidade. Assim sendo, a energia total será igual a integral, no tempo, da potência - veja os desenvolvimentos que se seguem.

Não é difícil concluir, portanto, que a especificação de um sistema eólico (curva de potência) depende fortemente do regime dos ventos no sítio onde ele irá operar. A otimização da curva de potência assegura uma operação eficiente de todo o sistema e uma máxima geração de energia; este é o objetivo procurado ao se especificar um sistema eólico.

Para se entender como a energia é gerada pelo sistema eólico considere, inicialmente, o regime dos ventos no sítio onde o sistema está em operação.

O regime dos ventos é caracterizado pelo histograma (ou função de distribuição de velocidades). Como foi visto no Cap.4, considerando um período definido de tempo - T -, o histograma é convertido no diagrama

$$[(\text{Horas}) \times (\text{Velocidade})]$$

Desta maneira, tem-se no período de tempo T , o número de horas - $H(V)$ - durante o qual o vento soprou com cada valor da velocidade - V .

Tendo o número de horas em que o vento soprou com um dado valor da velocidade, é necessário conhecer o valor da potência do sistema eólico - $P_g(V)$, quando opera nesta velocidade; esta potência é fornecida pela curva de potência do sistema.

Para uma dada velocidade - V - o histograma fornece o número de horas - $H(V)$ - em que o vento soprou com este valor da velocidade e a curva de potência do sistema eólico fornece o correspondente valor da potência - $P_g(V)$ - . Logo a energia gerada - $\Delta E(V)$ - é igual ao produto

$$\Delta E(V) = P_g(V) \cdot H(V)$$

Conseqüentemente, a energia total gerada no período é igual ao somatório de $\Delta E(V)$, isto é

$$E_T = \sum \Delta E(V) = \sum P_g(V) \cdot H(V)$$

O resultado deste processo é ilustrado graficamente na Figura 6.2. A análise da figura mostra que:

- embora o vento sopra com uma frequência relativamente alta quando sua velocidade é baixa a energia gerada é pequena por dois motivos: a potência disponível é baixa e o sistema eólico opera com baixo rendimento.
- Um pouco acima da velocidade média, encontra-se a velocidade nominal e é nesta faixa de velocidades que se gera a maior quantidade de energia.
- Em altas velocidades a geração de energia é limitada por dois fatores: embora a potência disponível seja alta, ela se manifesta em poucas horas durante o período e a potência absorvida pelo sistema eólico, como visto, é limitado por questões de segurança estrutural.

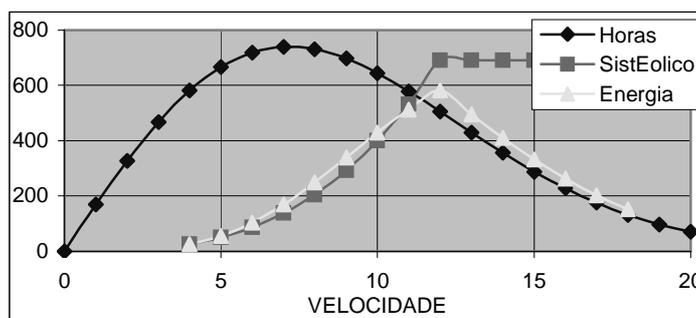


Figura 6.2. Energia gerada.

Do acima exposto, ficam claro os seguintes aspectos:

1. A energia gerada por um sistema eólico depende do regime dos ventos – histograma - e das características do sistema eólico – curva de potência do sistema.
2. Para se maximizar a energia gerada por um sistema eólico, as suas características devem ser especificadas em função do regime dos ventos onde ele irá operar.
3. Para um dado rotor (portanto, com características definidas) e um dado conversor (idem), um compromisso adequado pode ser obtido com a escolha correta da transmissão; este aspecto deverá se esclarecer ao longo deste capítulo, quando a questão do acoplamento for abordada.
4. A escolha correta transmissão deve levar em consideração a velocidade do vento em que a disponibilidade de energia é máxima.

5.2. Caracterização do regime dos ventos e do sistema eólico

Como pode ser concluído do item anterior, é muito importante que se tenha perfeitamente caracterizado o regime dos ventos, no sítio onde o sistema eólico será instalado. Da mesma maneira, deve-se conhecer as características que definem o sistema eólico.

5.2.1. Caracterização do regime dos ventos

O regime dos ventos de um dado sítio é principalmente caracterizado pela sua distribuição de velocidades. Como visto, a prática usual recomenda a utilização da distribuição de Rayleigh (quando se conhece apenas a velocidade média) ou a distribuição de Weibull (quando se necessita de resultados mais precisos), veja a Figura 6.3 que mostra uma distribuição de Rayleigh para um sítio cuja velocidade média é de 8m/s.

Com a função de distribuição da velocidade, pode-se traçar o gráfico [(Horas) X (Velocidade)] para um dado período. Se o período considerado possui T horas, o número de horas é obtido como:

$$H(V) = T * f(V)$$

(T = 8760 se o período for um ano, veja item 3.4.4.4).

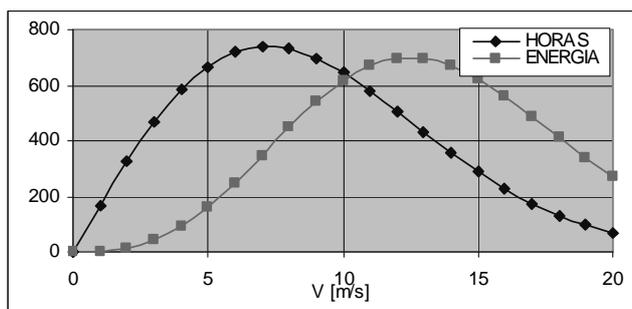


Figura 6.3. Distribuição de rayleigh.

$$\bar{V} = 8\text{m/s}$$

A análise do gráfico mostra que o valor da velocidade mais freqüente [aproximadamente igual a 7 m/s] é menor do que a velocidade média, repetindo o comportamento observado com a distribuição de Weibull.

Este gráfico não deve ser analisado isoladamente, deve-se considerar, também, o gráfico da distribuição da energia; este mostra que, para o sítio considerado, a maior concentração da energia transportada pelos ventos situa-se nas vizinhanças do valor 12 m/s da abscissa que representa a velocidade do vento. É natural, portanto, que os sistemas eólicos especificados para operar neste sítio tenham a sua velocidade nominal [V_N] nesta faixa de valores ou um pouco menor.

Por outro lado, observa-se que a energia transportada pelos ventos com velocidade menores que 3 m/s a 4 m/s é quase que desprezível. Assim sendo, pode-se concluir que seria de pouca utilidade especificar sistemas eólicos com velocidade de entrada [V_E] inferior a estes valores.

A velocidade de corte [V_c] de um sistema eólico, quase sempre é especificada para manter a integridade estrutural do sistema.

5.2.2. Caracterização do sistema eólico

Um sistema eólico fica caracterizado ao se analisar seus componentes. O primeiro deles é o rotor eólico, que será caracterizado pela sua curva de potência. Um segundo componente importante é representado pelo conversor; este pode ser, genericamente falando, um conversor mecânico – uma bomba hidráulica é um bom exemplo – ou um conversor elétrico; existem vários tipos de bombas e vários tipos de conversores elétricos, cada qual com um comportamento específico. O terceiro componente importante de um sistema eólico é representado pela transmissão, composta pelos eixos, mancais e caixas multiplicadoras (ou redutoras).

5.2.2.1. Caracterização e operação de um rotor eólico

As características aerodinâmicas de um rotor eólico são definidas pela curva do coeficiente de potência [C_{pr} x TSR]; para completar a definição aerodinâmica do rotor são necessários ainda as curvas de torque e empuxo.

A Figura 6.4 mostra a curva [C_{pr} x TSR] de um rotor de passo fixo (pás fixas sobre o eixo, i.é., sem movimento relativo). Nesta curva os pontos indicados pelas letras A,B e C (lado esquerdo) correspondem a uma operação com ângulos de ataque locais grandes ao longo da pá; como consequência, o controle da operação é quase sempre atribuído ao fenômeno de “stall”. Por outro lado, a medida que se aproxima do ponto D, a operação do rotor é feita com ângulos de ataque locais muito pequenos, sendo o controle dominado pelas forças viscosas.

A operação dos sistemas eólicos é feita nas vizinhanças do ponto C, normalmente sobre o ramo esquerdo da curva.

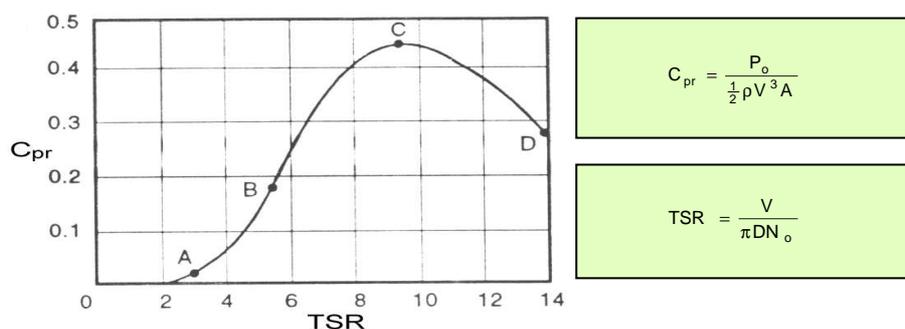


Figura 6.4. Curva de potência de um rotor de passo fixo.

Rotores com passo controlável (observe que não é a mesma coisa que rotor de passo variável com o raio) têm suas características definidas por um gráfico com várias curvas [$C_{Pr} \times TSR$], uma para cada valor do passo (ou ângulo do passo, como mostra a Figura 6.5).

Não é difícil concluir sobre a enorme flexibilidade apresentada por rotores com passo controlável. Há, no entanto, que se considerar o custo do mecanismo de controle do passo que, para sistemas de pequeno porte, nem sempre é compensador.

A partir da curva do coeficiente de potência (observe as definições do coeficiente de potência [C_{Pr}] e da razão de velocidades [TSR]) pode-se traçar o gráfico com as curvas de potência do rotor em função da frequência de rotação (ou do número de rotações por minuto), tendo como parâmetro a velocidade do vento - [$P_o \times N_o$; paramétrica em V]. Este gráfico é referido como o **gráfico de potência do rotor**, Figura 6.6.

A interpretação que se dá a estas curvas é a seguinte: se a velocidade do vento é igual a 8 m/s , por exemplo, e o rotor opera com 60 rpm, a potência fornecida no eixo é de aproximadamente 65 kW [os valores correspondem ao rotor representado pela Figura 6.6]

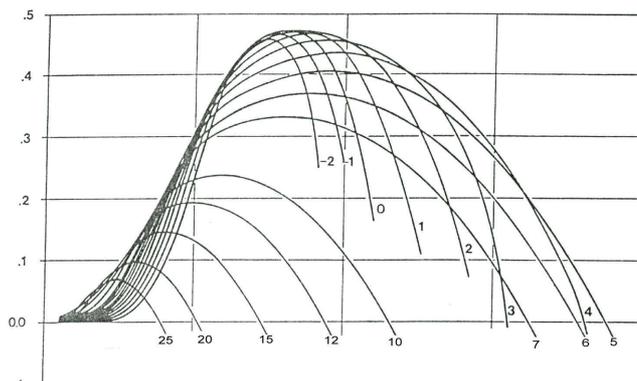
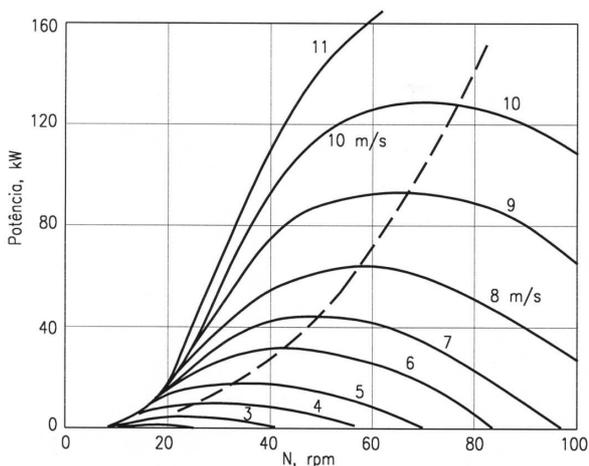


Figura 6.5. Coeficiente de potência rotor de passo controlável

Observe que, nas condições exemplificadas, o rotor opera muito próximo do seu ótimo, isto é perto do ponto C, ponto de máximo da curva [$P_o \times N_o$], quando a velocidade é de 8 m/s.

A **curva de operação ótima** do rotor, indicada como - [$P_o \times N_o$]_{ótimo} - e representada no gráfico pela curva pontilhada. Evidentemente, esta curva é definida pelos pontos máximos das curvas [$P_o \times N_o$]_{V=cte}.



A curva pontilhada indica, para cada valor da velocidade do vento, os pontos de operação ótima do rotor.

Figura 6.6. Operação ótima de um rotor.

Esta curva é importante na síntese dos sistemas eólicos. Neste processo ela é considerada, juntamente com as curvas que caracterizam o regime dos ventos, na especificação da transmissão, isto é, na definição da razão de multiplicação, α .

5.2.2.2. Caracterização de uma bomba a pistão

A caracterização dinâmica de uma bomba a pistão, como parte de um sistema eólico (a bomba é identificada com o conversor do sistema), é feita através do diagrama [$P_t \times N_t$], isto é, da curva que fornece a potência absorvida pela bomba em função da rotação no eixo. Esta curva será, doravante, referida como **curva de potência da bomba**.

Observe, no entanto, que a completa definição da bomba exige ainda as curvas [$H \times Q$] e [$\eta_g \times Q$], tendo a rotação como parâmetro. H é a altura manométrica, Q a vazão e η_g o rendimento da bomba. Para os propósitos presentes estes aspectos não necessitam ser considerados.

A bomba a pistão é um mecanismo de funcionamento intermitente. A sua potência hidráulica média pode ser expressa como:

$$P_H = \rho_a g H Q$$

onde g representa a aceleração da gravidade e ρ_a a densidade da água.

Considerando que

$$Q = q N_t$$

onde q representa a capacidade volumétrica da bomba, tem-se

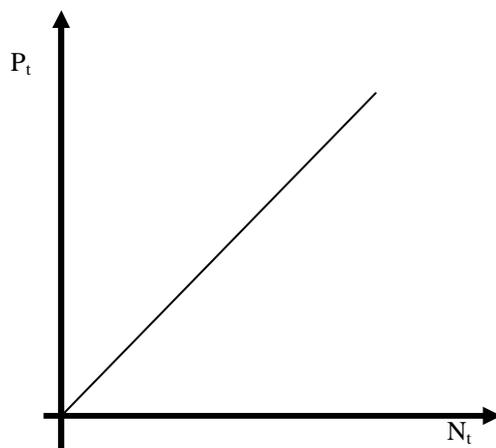
$$P_H = \rho_a g q H N_t$$

que exprime a potência hidráulica em função da rotação e das características da bomba.

Indicando o rendimento da bomba por η_g , a expressão da potência absorvida pode ser imediatamente escrita como:

$$P_t = \frac{1}{\eta_g} \rho_a g q H N_t$$

que é a expressão procurada. Observe que a potência P_t varia linearmente com a rotação N_t , como mostra a Figura 6.7.



$$P_t = \frac{1}{\eta_g} \rho_a g q H N_t$$

η_g = rendimento da bomba
 ρ_a = densidade da água
 g = aceleração gravidade
 q = capacidade volumétrica
 H = altura manométrica

Figura 6.7. Curva de potência de uma bomba a pistão.

5.2.2.3. Acoplamento rotor-bomba a pistão

Na Figura 6. 8, foram traçadas as curvas [$P_o \times N_o$; paramétricas em V] e a curva de potência (absorvida) da bomba, curva [$P_t \times N_t$]. Pode-se verificar que dificilmente estes dois componentes poderão funcionar harmonicamente sem a utilização de uma transmissão apropriada – veja a Figura 4.13 - Diagrama Esquemático De Um Sistema Eólico.

De fato, a curva de operação ótima do rotor, curva [$P_o \times N_o$]_{ótimo} representada pela linha tracejada, afasta-se bastante da curva de operação da bomba.

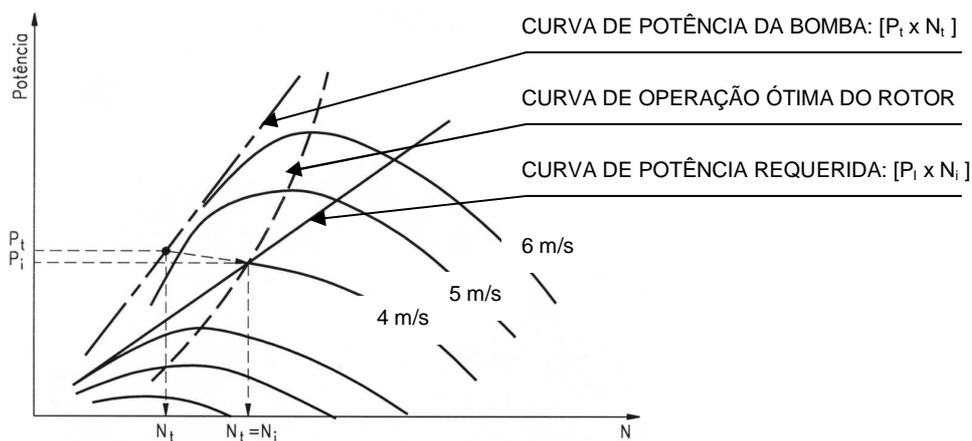


Figura 6.8. Acoplamento rotor-bomba.

A superposição da curva de potência da bomba mostra que a esta normalmente opera com uma velocidade (de rotação) bem menor que o rotor. Sem uma transmissão adequada, o rotor só consegue acionar a bomba quando a velocidade do vento é muito alta.

A utilização de uma caixa de multiplicação (na verdade, uma caixa de redução, uma vez que $\alpha < 1$) permite transferir o acoplamento (rotor – bomba) para um ponto situado entre o rotor e a caixa de multiplicação – veja novamente a Figura 4.13. De fato, levando-se em conta a razão de multiplicação e o rendimento da transmissão, a curva $[P_i \times N_i]$, representada na figura pela reta contínua, pode ser imediatamente traçada. Esta curva, que define o acoplamento entre o rotor e a bomba com o auxílio de uma caixa de multiplicação, intercepta várias curvas P_o (paramétricas em V), e o que é melhor, muito próximo dos pontos definidos por $[P_o \times N_o]_{\text{ótimo}}$.

Com relação as curvas P_t e P_i cabe observar que:

- Os valores do par $[N_o=N_i, N_t]$ para pontos correspondentes, são relacionados através de α (a razão de multiplicação, que no caso é menor que a unidade), isto é: $N_o > N_t$
- A potência P_t , absorvida pela bomba é menor que a potência $P_o = P_i$, entregue pelo rotor e a relação entre estes valores é definida pelo rendimento da transmissão.

Uma observação adicional sobre a figura se faz necessário. A reta contínua, que representa a potência – P_i – absorvida pela transmissão cruza simultaneamente a curva de potência – P_o – (entregue pelo rotor) correspondente a velocidade $V = 4\text{m/s}$ e a curva $[P_o \times N_o]_{\text{ótimo}}$.

Este fato não ocorre arbitrariamente; é imposto pelo histograma que define o regime dos ventos locais. Certamente, a escolha do valor da razão de multiplicação - α - considerou que a curva da distribuição da energia (transportada pelos ventos locais) possui um máximo perto deste valor da velocidade.

O bombeamento de água com a utilização de uma bomba a pistão pode ser viabilizado em locais com ventos de baixa velocidade; no caso, a velocidade média estaria, provavelmente, na faixa de 3 m/s.

5.2.2.4. Caracterização de uma bomba centrífuga

A caracterização dinâmica de uma bomba a pistão ou outra qualquer (que representa o conversor num sistema eólico) foi feita através do diagrama $[P_t \times N_t]$, isto é, da curva que fornece a potência absorvida pela bomba em função da rotação no eixo. Esta curva será, doravante, referida como **curva de potência da bomba**. Esta, no entanto, não é a maneira usualmente utilizada para se especificar uma bomba, como mostra qualquer manual de engenharia.

Para os presentes propósitos é interessante considerar os diagrama que relaciona a altura manométrica H com a vazão Q, isto é, a curva $[H \times Q]$ e o diagrama que relaciona a potência absorvida pela bomba P_t com a vazão, ou seja a curva $[P_t \times Q]$; nestes diagramas o parâmetro representa a rotação, N_t – veja o lado esquerdo da Figura 6.9.

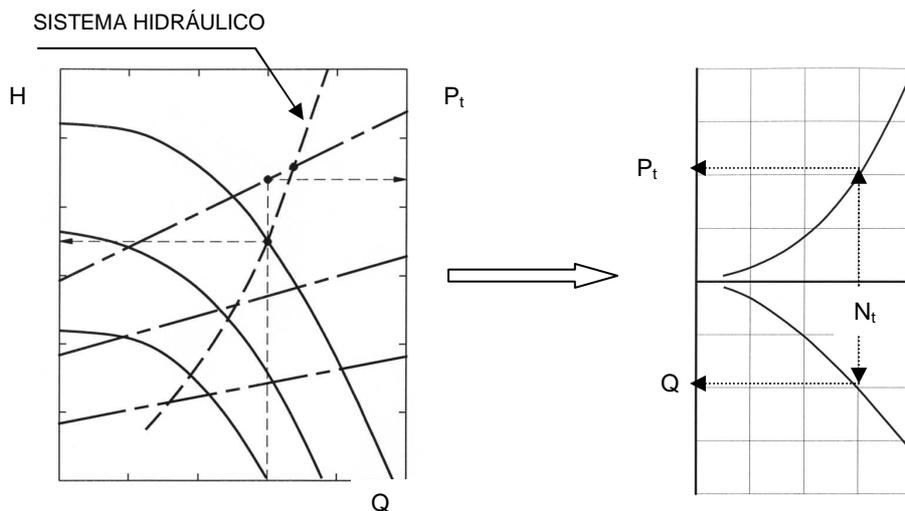


Figura 6.9. Operação de um sistema hidráulico com uma bomba centrífuga.

Considere, em seguida a curva demanda do sistema hidráulico (curva tracejada no diagrama da esquerda), isto é, a curva que exprime a altura manométrica exigida pelo sistema hidráulico, em função da vazão. Com a superposição destas curvas é possível traçar, como mostra o lado direito da figura, as seguintes curvas que caracterizam dinamicamente uma bomba centrífuga:

- curva de potência da bomba desejada - curva [$P_t \times N_t$]
- curva de vazão da bomba - curva [$Q \times N_t$] - necessária para o cálculo do volume de água bombeada.

5.2.2.5. Acoplamento rotor-bomba centrífuga

Os procedimentos para se efetuar o acoplamento de uma bomba centrífuga com um rotor eólico são essencialmente os mesmos daqueles utilizados para o acoplamento de uma bomba a pistão com um rotor.

Há a necessidade de se conhecer as características do rotor [basicamente o gráfico de potência (disponível)], assim como aquelas da bomba [curva de potência (absorvida)].

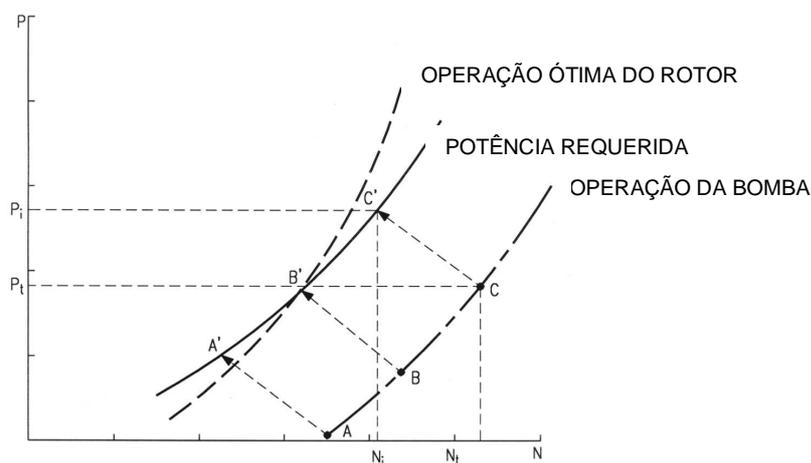


Figura 6.10. Acoplamento rotor bomba centrífuga.

Superpondo a curva de potência da bomba – Figura 6.9 - ao gráfico de potência do rotor, verifica-se que a curva da bomba situa-se na região de altas velocidades de rotação (na Figura 6.10, a direita da curva [$P_o \times N_o$]_{ótimo}), isto é a bomba centrífuga, ao contrário da bomba a pistão, opera com rotações elevadas quando comparada com aquelas do rotor eólico.

5.3. Geração de energia

Quer esteja acoplado a um conversor mecânico, quer esteja acoplado a um conversor elétrico, a finalidade de um sistema eólico é a de captar a energia disponível nos ventos e convertê-la numa forma aproveitável de energia.

No caso de se utilizar um conversor mecânico, uma bomba por exemplo, o sistema eólico tem como finalidade a produção de energia mecânica para o bombeamento de água. Neste caso a energia gerada pode ser quantificada pelo volume de água bombeada.

No caso de se utilizar um conversor elétrico, a energia gerada é quantificada pela energia elétrica gerada.

Em ambos os casos é importante considerar devidamente o regime dos ventos.

5.3.1. Volume de água bombeada.

O processo de acoplamento entre um rotor eólico e uma bomba centrífuga foi ilustrado superpondo-se a curva $[P_i \times N]$ da bomba às curvas de potência do rotor $[P_o \times N]$. A Figura 6.10 mostra que o acoplamento direto rotor-bomba resulta num modo de operação precário, exigindo valores altos da velocidade do vento. Por esta razão, foi adicionada uma caixa de multiplicação que, na figura, materializa-se através da curva $[P_i \times N]$.

Com este procedimento o acoplamento entre o rotor e a bomba é transferido para uma posição entre o rotor e a transmissão. Neste ponto a potência disponibilizada pelo rotor, P_o , deve ser igual a potência requerida pela bomba, através da transmissão, P_i ; isto acontece no cruzamento da curva de P_i com as curvas de P_o .

Fazendo, a seguir o caminho inverso é possível calcular a vazão da bomba para cada valor da velocidade do vento, isto é, obtém-se a curva de vazão da bomba, $[Q \times V]$.

Como o regime do vento é definido pela função densidade da probabilidade [Rayleigh ou Weibull], pode-se calcular o número de horas em que o vento soprou com um dado valor da velocidade, durante todo o período de tempo, T. Isto é feito com a curva de frequência acumulada, como mostra a Figura 6.12.

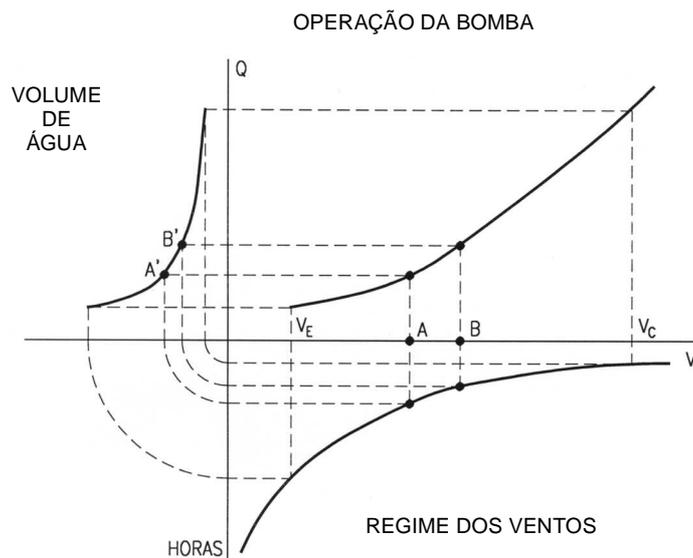


Figura 6.12. Cálculo do volume bombeado de água.

De fato, o número de horas, Δt , que o vento soprou com velocidade V, tal que $V_1 < V < V_2$ é calculado como

$$\Delta t = T [F(V_2) - F(V_1)]$$

onde: $F(V)$ representa a função de frequência acumulada

T representa o número total de horas do período, $T = 8760$, se o período considerado for de um ano.

Ora, conhecido a vazão da bomba para cada valor da velocidade, $Q(V)$, e tendo-se calculado o intervalo de tempo ($\Delta t =$ número de horas) que o vento soprou com este valor, o volume total de água bombeada é calculado através do somatório.

$$V = \sum Q(v)\Delta t$$

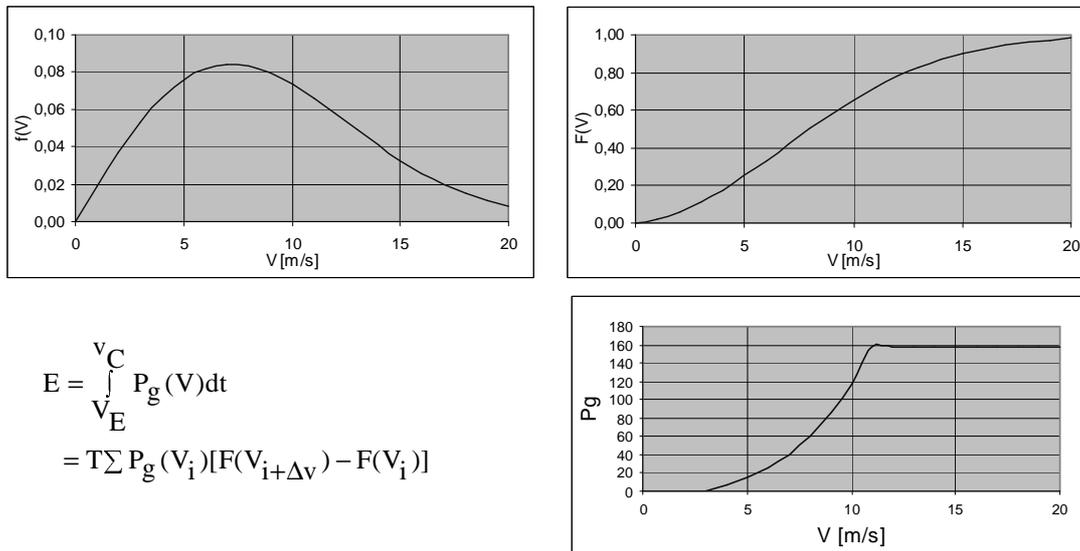
Evidentemente, a figura serve apenas como ilustração dos procedimentos; os cálculos podem e devem ser efetuados com a utilização de software especialmente desenvolvidos para este fim.

5.3.2. Energia gerada

A energia gerada por um sistema eólico, assim como o volume de água bombeada, constitui-se numa das grandezas mais importante nas análises do aproveitamento da energia dos ventos; afinal, a energia gerada representa o retorno financeiro do investimento.

Para o cálculo da energia gerada por um sistema eólico são necessários:

- A definição do regime dos ventos, o que é feito com a função de distribuição de freqüências da velocidade do vento, normalmente a distribuição de Rayleigh ou de Weibull.
- A definição do comportamento do sistema eólico, o que é feito com a curva de potência do sistema, $[P_g \times V]$



$$E = \int_{V_E}^{V_C} P_g(V) dt$$

$$= T \sum P_g(V_i) [F(V_{i+\Delta V}) - F(V_i)]$$

Figura 6.13. Energia gerada.

Considere o valor da potência gerada pelo sistema, $P_g(V)$. O valor da energia, $\Delta E (V)$, é calculada como:

$$\Delta E (V) = P_g(V) \cdot \Delta t(V)$$

onde Δt representa o intervalo de tempo, no período considerado, em que a velocidade do vento assumiu a velocidade V . Logo, tem-se:

$$E = \sum P_g(V) \cdot \Delta t(V) = \sum_{V_E}^{V_C} P_g(V) \cdot \Delta t(V)$$

onde V_E representa a velocidade de entrada do sistema e V_C a sua velocidade de corte. Como a potência é constante entre a velocidade nominal, V_N , e a velocidade de corte, a expressão acima é simplificada:

$$E = \sum_{V_E}^{V_C} P_g(V) \cdot \Delta t(V) = \sum_{V_E}^{V_N} P_g(V) \cdot \Delta t(V) + P_N \cdot T \cdot [F(V_C) - F(V_N)]$$

onde $F(V)$ representa a distribuição de freqüência acumulada e T o número de horas do período considerado. Observe, ainda que:

$$\Delta t(V) = T \cdot [F(V+\Delta V) - F(V)]$$

Referências

American Wind Energy Association, (1992) - Wind Energy for Sustainable Development.
 Introdução ao Aproveitamento da Energia Eólica, (2000) – Texto preparado por vários autores para o curso realizado no Lab. de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica - PEM-COPPE/UFRJ.
 Silva, P.C., Guedes, V.G., Araujo, M.R.O.P. e Hirata, M.H., (1999) - Otimização dos Parâmetros de Weibull - XV COBEM, Aguas de Lindóia, SP.

Hunt, V.D., (1981) - Wind Power: A Handbook on Wind Energy Conversion Systems - Van Nostrand

Park, J., (1981) - The Wind Power Book - Cheshire Books.

Rohatgi, J.S. and Nelson, V., (1994) - Wind Characteristics - Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.