

ANEMOMETRIA

**Medição de vento para
desenvolvimento de projetos eólicos**

MÓDULO 1:
Estudo da Anemometria
Projetos Eólicos

Anemometria

O que é Anemometria?

Derivada da palavra grega:

Ánemos (vento) + metrein (medir)

**Estudo dos métodos de medição da
velocidade ou intensidade, e direção do
vento.**

Anemometria

Para que Serve?

Mais comumente empregada para caracterização e representação da dinâmica de fluxos de ar, principalmente suas componentes de velocidade e de direção. Podendo estas serem analisadas em 1, 2 ou 3 dimensões.

Onde pode ser aplicada?

Energia eólica

**Caracterização do vento para projetos de centrais eólicas;
Elaboração de atlas eólicos.**

Meteorologia

**Caracterização climatológica;
Modelos de propagação de partículas em suspensão.**

Indústria, Aeronáutica e Aerodinâmica

**Sensores de aeronaves;
Túneis de vento.**

Áreas afins da Mecânica dos Fluidos

Indústrias químicas que utilizam fluidos em seu estado gasoso.

E muitas outras aplicações...

Anemometria



Túneis de vento



Estações meteorológicas



Aeroportos

Anemometria



É interessante saber!!!

O mais antigo instrumento anemométrico que se tem conhecimento é um direcionador do vento, instalado no topo da "*Torre do Vento*" em Atenas, Grécia. Foi construído no século 1 A.C por *Adronicos de Kyrrhos*, na Macedônia.

Consistia de uma estrutura móvel na forma do Deus *Triton* em torno de uma eixo vertical, que sob ação do vento, tinha a mão apontando para direção de vento predominante.

Anemometria

"Torre do Vento", Atenas, Grécia.



MÓDULO 1:

Estudo da Anemometria

Projetos Eólicos

Medição de vento para desenvolvimento de projetos eólicos

Anemometria & Energia Eólica



Uma definição ampla de Anemometria na área de energia eólica é a utilização para representar as medições das principais **variáveis meteorológicas, visando fornecer subsídios ou informações para a adequada caracterização dos recursos eólicos de um determinado local ou região.**

Anemometria & Energia Eólica



Para que Serve?

Empregada para caracterização e representação das principais variáveis meteorológicas relacionadas ao vento:

Componentes de velocidade e sua direção.

Também são incluídas a medição de variáveis complementares:

Temperatura do ar, pressão barométrica, radiação solar, umidade relativa e índices de precipitação.

Anemometria & Energia Eólica



Onde são Utilizados?

- 1. Caracterização pontual do vento, visando a implantação de uma única turbina eólica neste local ou de local particular para estudos de CFD;**
- 2. Caracterização dos recursos eólicos de uma área, visando subsidiar informações para um modelo de extrapolação de vento (microescala) para todos os locais de implantação de turbinas eólicas;**
- 3. Caracterização dos recursos eólicos de uma região, visando subsidiar informações para modelos atmosféricos complexos (mesoescala), ou apenas para ajustes e correções dos parâmetros do modelos;**
- 4. Caracterização dos parâmetros específicos, visando subsidiar informações específicas acerca dos recursos eólicos, como turbulência, estabilidade atmosférica, fluxos inclinados, e visando avaliações avançadas como levantamento da curva de potência e avaliação da qualidade de energia.**

Anemometria & Energia Eólica



1. Caracterização pontual do vento: Maior precisão, exige técnicas apuradas com pequenas incertezas. É a medição no mesmo local onde os registros de vento serão estudados e avaliados;

2. Caracterização dos recursos eólicos de uma área: Maior precisão, exige técnicas mais apuradas com pequenas incertezas. Medição em local que representa bem a maior parte da área onde serão instaladas as turbinas eólicas e pouco influenciado por efeitos aerodinâmicos.

3. Caracterização dos recursos eólicos de uma região: Menor precisão, exige técnicas apuradas, mas com maiores incertezas. Medição em qualquer ponto do domínio que se deseja avaliar, mas evitando efeitos locais e tendências;

4. Caracterização dos parâmetros específicos : Maior precisão, exige técnicas altamente apuradas com pequenas incertezas, além, em alguns casos, de equipamentos específicos. Geralmente é exigido atender necessidades específicas para cada finalidade a que se destina os registros de vento.

Anemometria & Energia Eólica

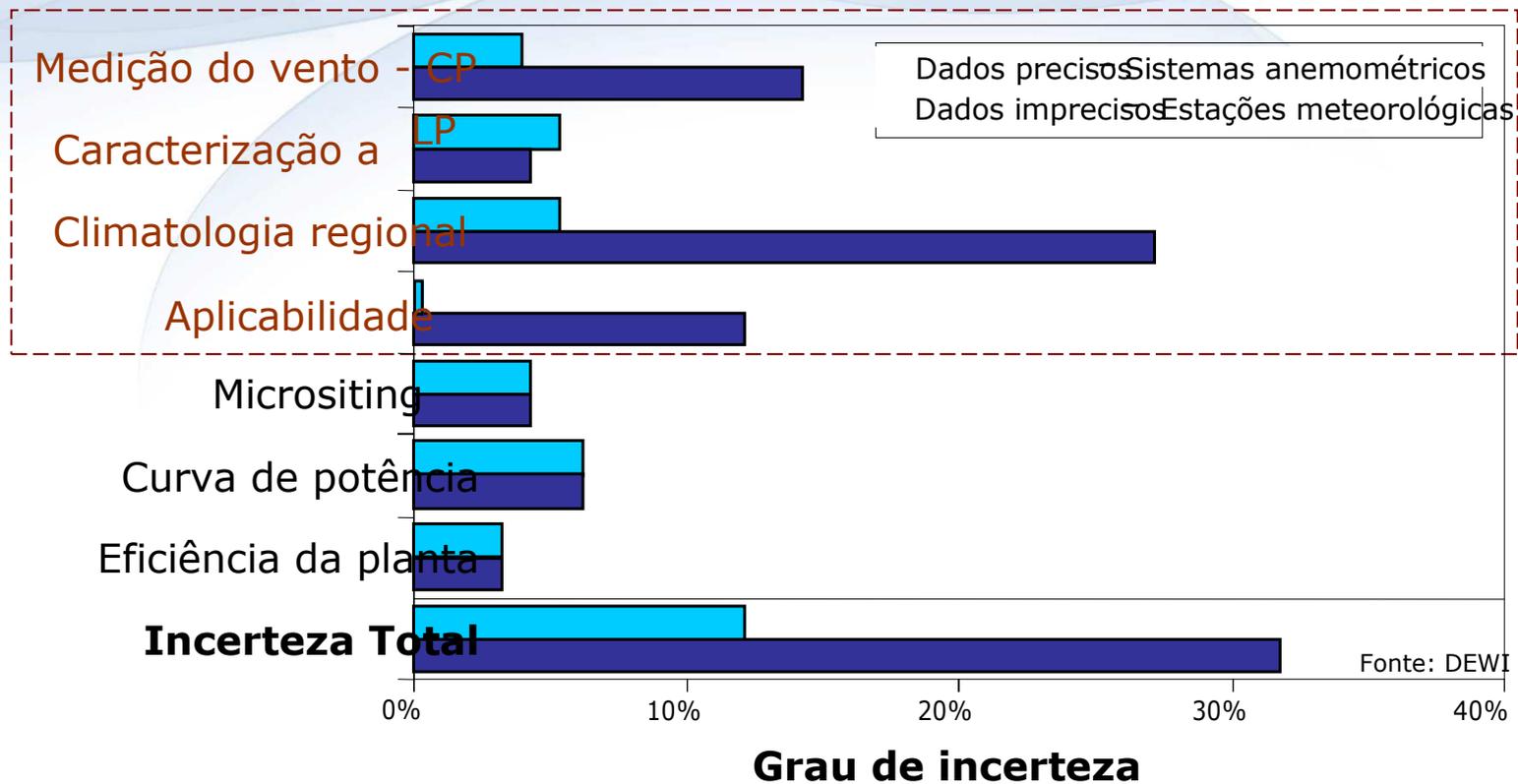


Importância de Boas Práticas de Anemometria

- 1. Facilitar a operação do sistema de medição, com bom índice de dados válidos. Além de mitigar as ocorrências de problemas operacionais.**
- 2. Obtenção de resultados em concordância com as ocorrências históricas de vento;**
- 3. Subsidiar informações para melhor entendimento dos principais mecanismos de ventos atuantes, buscando prever o comportamento das ocorrências futuras;**
- 4. Garantir os menores níveis de incertezas relacionadas aos parâmetros eólicos que se desejam representar;**
- 5. Garantir estimativas de projetos mais realistas, precisas e segura;**
- 6. Facilitar a obtenção de recursos financeiros para o desenvolvimento do projeto eólico.**

Anemometria & Energia Eólica

Importância de Boas Práticas de Anemometria



MÓDULO 1:

Estudo da Anemometria

Projetos Eólicos

Principais Aspectos da Campanha de Medição do Vento

Etapas da Medição



- 1. Avaliação preliminar da área:** subsidiar a definição das estratégias adotadas na campanha de medição do vento;
- 2. Planejamento da campanha de medição:** definição dos métodos, estratégias e procedimentos que serão adotados na campanha;
- 3. Instalação e comissionamento da torre anemométrica:** Montagem, testes operacionais e comissionamento de mastros, anemógrafos e sensores;
- 4. O&M das torres anemométricas:** Acompanhamento da operação dos equipamentos instalados, que balizam as ações preventivas e corretivas a serem realizadas. Também acompanhar a evolução das transformações na área do seu entorno;
- 5. Descomissionamento:** Retirada dos equipamentos instalados, tentando restaurar as condições paisagísticas do local, diretamente influenciado pelos mesmos. Inclui a realização de testes operacionais mais criteriosos, visando identificar problemas.

Avaliação Preliminar da Área



Aspectos Levantados:

- **Características de vento esperadas:** dados sintéticos, estações meteorológicas, Atlas e mapas eólicos, informações de moradores locais, e indicadores geomorfológicos;
- **Características climatológicas:** temperatura, pressão barométrica, umidade relativa, precipitação;
- **Condições da superfície:** mapas topográficos, imagens e fotografias aéreas, levantamentos planimétricos, levantamentos da rugosidades e obstáculos no entorno dos locais de medição;
- **Condições do solo** nos locais de medição;
- **Condições de infra-estrutura** nos locais de medição do vento (acessos, energia elétrica, celular);
- **Condições de segurança** dos equipamentos instalados;
- **Dinâmica da transformação** do uso do solo, a partir de depoimentos locais;
- **Estudo** dos principais **mecanismos condicionantes** do vento;
- **Fotografias** do local e pontos georeferenciados;
- **Declinação magnética e time-zone;**
- **Outros aspectos específicos** considerados relevantes para a campanha de medição.



Definição das Estratégias



Aspectos Levantados:

- **Parâmetros a serem medidos;**
- **Tipo de equipamento, qualidade e custo;**
- **Número de torres anemométricas a serem instaladas e respectivos locais de instalação;**
- **Quantidade e altura dos sensores;**
- **Precisão das medições, duração e índice de cobertura de dados válidos;**
- **Taxa de amostragem e intervalos de integração;**
- **Formado de armazenamento dos dados;**
- **Métodos e procedimentos do tratamento, validação e análise dos dados de vento;**
- **Ações para a O&M das torres anemométricas e acesso à sobressalentes;**
- **Formatos dos documentos da campanha de medição do vento.**

Apenas o equipamento não garante uma campanha de medição do vento satisfatória; e sim uma boa definição de estratégias.

Devem levar em consideração as condições e as necessidades de cada campanha de medição, segundo os padrões reconhecidos.

Normas e Padrões Recomendados



1. **Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation, 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry [IEA, 1999]:** Norma técnica internacional publicada pela Agência Internacional de Energia – IEA, que especifica os procedimentos recomendados para a medição do vento, com o uso de anemômetros de copo.
2. **IEC 61.400-12-1, Wind Turbine Part 12-1: Power Performance Measurement of Electricity Producing Wind Turbines [IEC, 2005]:** Norma técnica internacional publicada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica – IEC, que especifica, além de outras coisas, os procedimentos recomendados para a medição de vento, visando a avaliação da performance de central eólica.
3. **Standard procedures for Meteorological Measurement at a Potential Wind Turbine Site [AWEA, 1986]:** Procedimentos técnicos para realização de medições meteorológicas em locais específicos para aproveitamento eólico. Este documento é publicado pela Associação Americana de Energia Eólica – AWEA/EUA e tem reconhecimento de norma técnica nacional.
4. **Wind Resource Assessment Handbook [NREL, 1997]:** Fundamentos para condução de campanhas de medição do vento publicado pelo NREL/EUA. O NREL é um laboratório nacional do Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos.
5. **European Wind Turbine Standard II, Part 5 – Site Evaluation [ECN, 1998]:** Recomendação técnica publicada pela ECN/NL, que sintetiza as principais metodologias e procedimentos técnicos para avaliação do potencial eólico, de um sítio específico, praticados por mais de 70 instituições de pesquisa e desenvolvimento, e escritórios de consultoria da Europa.
6. **Evaluation of Site-Specific Wind Conditions [MEASNET, 2009]:** Recomendações técnicas para avaliação das condições de vento de um local. A MEASNET é uma network de Institutos Europeus que visa harmonizar os procedimentos de medição na área da energia eólica.

Definição das Estratégias



Aspectos mais relevantes

Quantidades de torres (distância do mastro aos pontos alvo):

- Terreno simples e plano: Teoricamente, a cada 10km???. **WAsP: recomendação 2 km.**
- Terreno complexo: a cada 2 km.

Registros dos dados:

- Equipamentos: adequados para a finalidade do estudo;
- Taxa de amostragem: a partir de 0,5 Hz (2 segundos); **Preferencialmente, 1 Hz.**
- Intervalo de integração: 10 minutos;
- Formatos de armazenamento: Séries temporais contínuas;
- Alturas de medição: adequados para cada parâmetro de medição;
- Duração da campanha: mínimo 12 meses, com índice de cobertura de pelo menos 90%.

Documentação (formatos e informações):

- Plano da Campanha de medição; ←
- Plano e Relatórios de Manutenções;
- Relatório de Instalação e comissionamento;
- Relatório de Descomissionamento.
- Sumário de Acompanhamento da Campanha de medições.

Escolha do Local de Instalação



O local escolhido deve:

- **ser representativo para a maioria da área do parque eólico;**
- **ser distante de obstáculos que afetem o comportamento do vento;**
- **ser de fácil acesso e seguro, principalmente durante a campanha de medição;**
- **sofre mudanças poucas e lentas mudanças paisagem, quando possível;**
- **Mitigar o trabalho do modelo de fluxo que se pretende usar (menos viciado possível).**

O segredo é também saber as condicionante e limitações dos modelos de fluxo utilizados, como o WAsP. Como por exemplo evitando zonas de transição do modelo de rugosidade e locais com relevo diferente ao do padrão do modelo de orografia.

Instalação e Comissionamento



Aspectos mais relevantes

Fatores críticos:

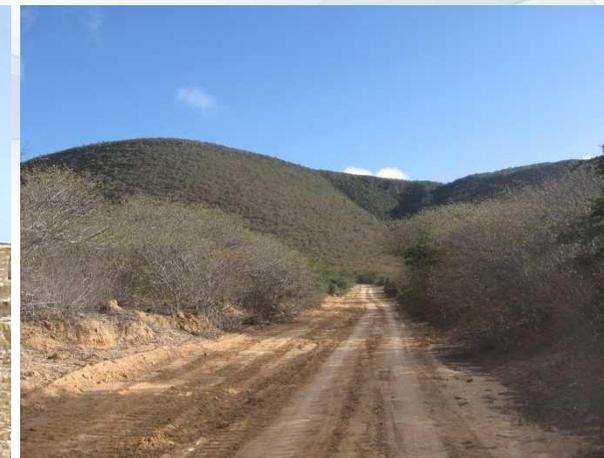
- **Experiência** da equipe de campo, na condução da instalação do mastro e dos equipamentos;
- Uso de **EPI** e procedimentos adequados para o **trabalho em altura**;
- **Alinhamento e estabilidade** do mastro metálico: boa estrutura metálica e experiência na montagem;
- **Aterramento** satisfatório, quando possível, e grau de proteção do sistema de proteção;
- **Montagem** dos sensores, em hastes suportes, de acordo com as normas da IEC e IEA. Entretanto podem ser adaptadas às condições de vento locais;
- **Condução da instalação e comissionamento** segundo as especificações do Plano da Campanha de Medição.

Relatório de Instalação e Comissionamento:

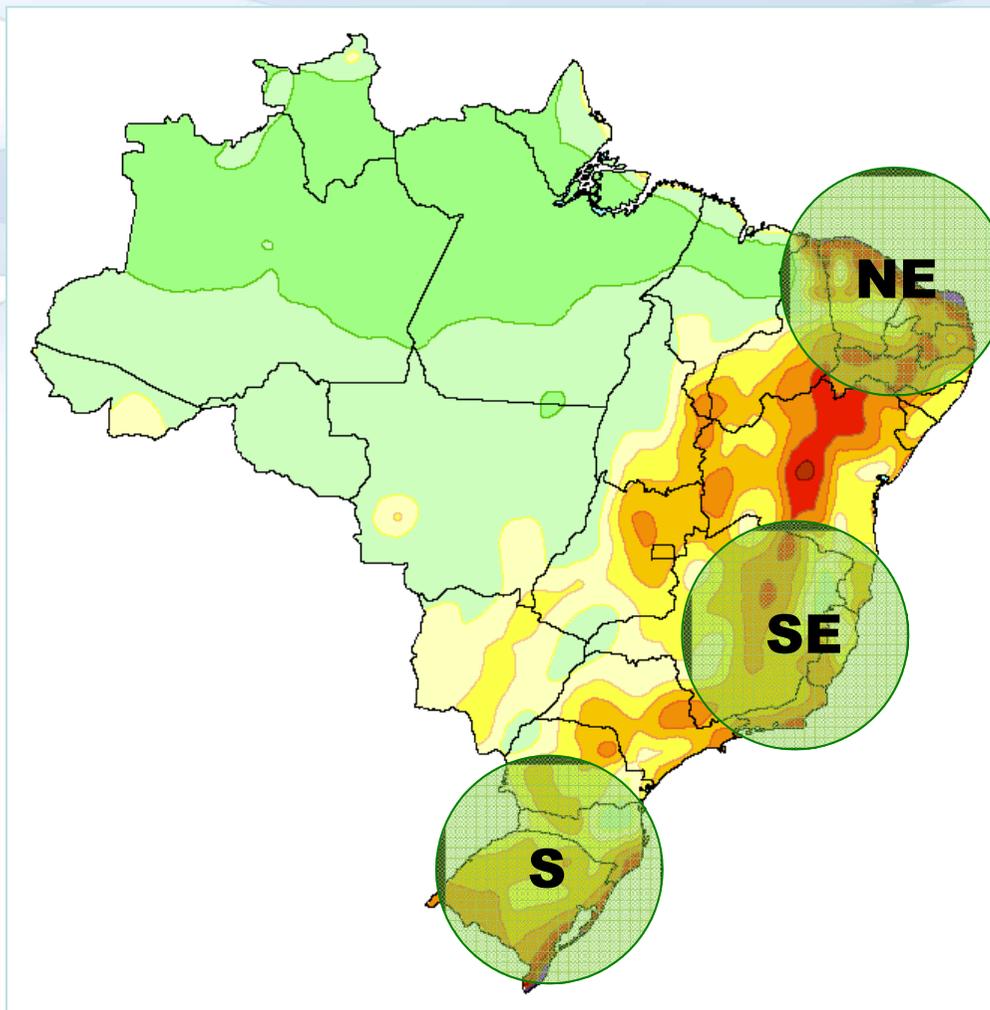
- **Posição de instalação dos mastros e descrição das áreas no seu entorno**;
- **Especificação dos equipamentos instalados**;
- **Alturas de medição, dimensões e orientações das hastes suporte dos sensores**;
- **Programação do anemôgrafo, por exemplo, taxa de amostragem e intervalo de integração**;
- **Outros aspectos considerados relevantes observados durante a instalação e/ou comissionamento.**

Diferentes Condições

Terreno

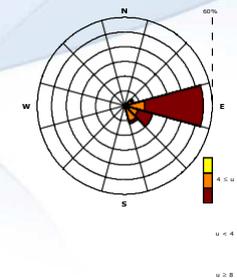
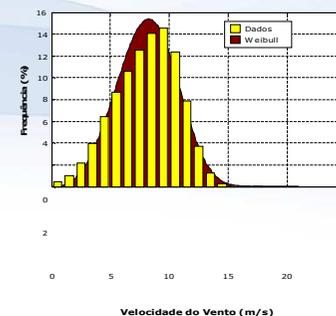


Diferentes Condições



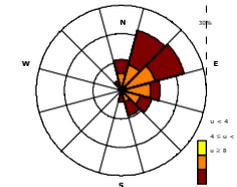
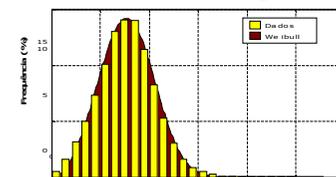
REGIÃO NORDESTE

➤ Vento “mais comportado”



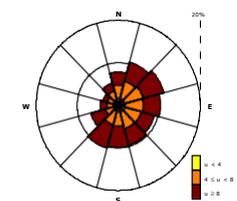
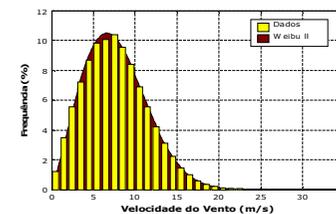
REGIÃO SUDESTE

➤ Vento “comportado”

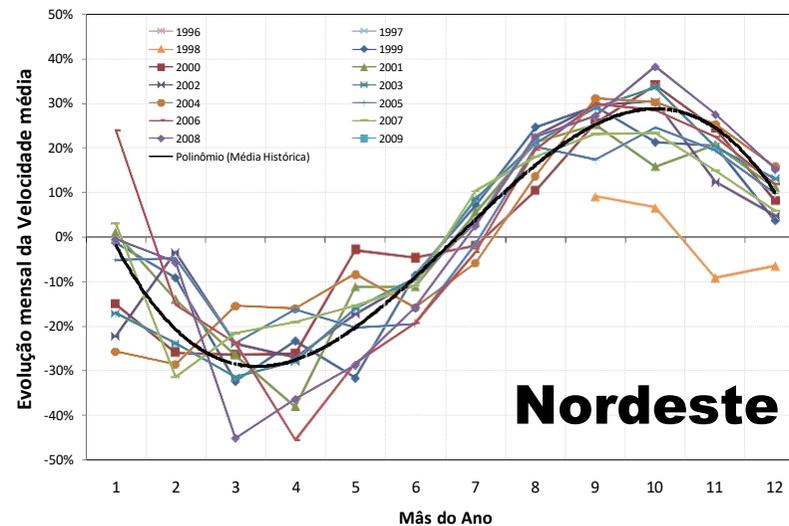
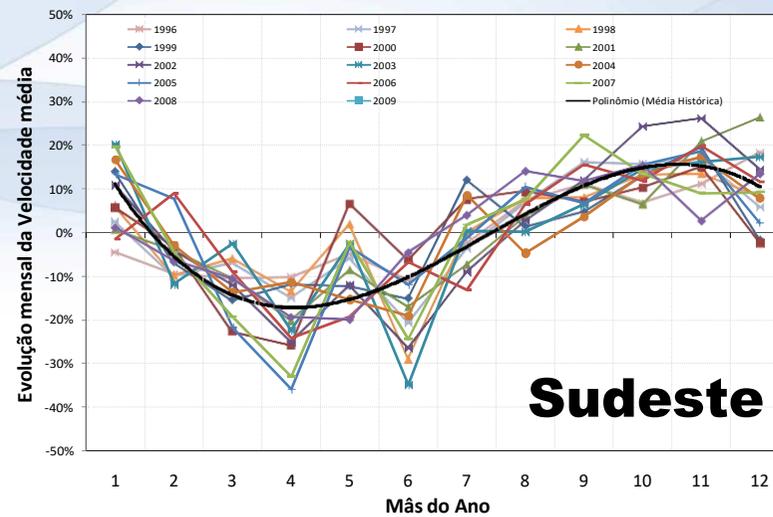
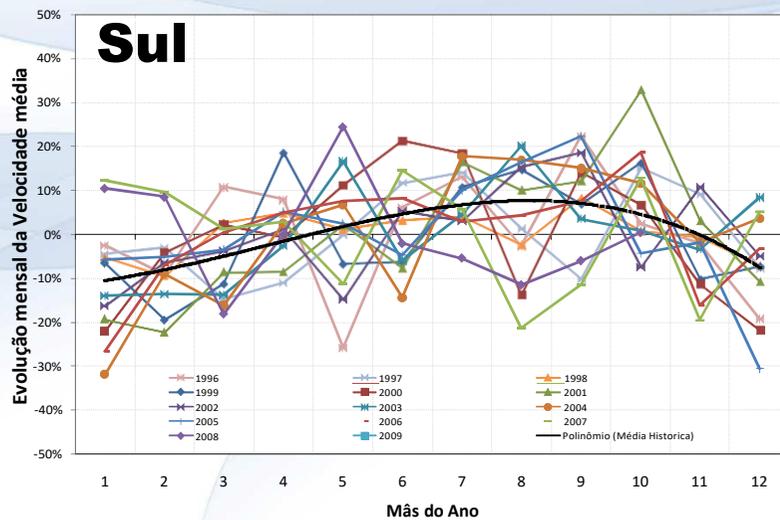


REGIÃO SUL

➤ Exige mais cuidado



Evolução Mensal



Instalação e Commissionamento



IMPORTANTE

Cada instalação de torre anemométrica as necessidades são únicas. E devem ser consideradas para a definição do arranjo dos equipamentos. Assim pode-se mitigar ainda mais as incertezas da campanha de medição.

Bom exemplo disso é o uso de hastes com menores dimensões no litoral do nordeste, devido a unidirecionalidade do vento. Melhora os efeitos vibratórios do rotor do anemômetro, assimetria do fluxo e sensibilidade vertical do mesmo.

O&M da Torre Anemométrica



Aspectos mais relevantes

Fatores críticos:

- **Experiência** da equipe de campo, na condução das operações de O&M;
- Manter o **Alinhamento** e **estabilidade** do mastro metálico;
- Realizar **coletas** e **processamento** de dados regularmente;
- **Boa comunicação** com o proprietário do terreno e habitante das redondezas;
- Realizar **manutenções preventivas** e estar prontamente preparado para as **operações corretivas**;
- Acompanhar as **transformações** do terreno no em torno da torre anemométrica;
- **Condução da O&M** segundo as especificações do Plano da Campanha de Medição.

Devem ser reportados:

- **Informações** a cerca do acompanhamento mensal da campanha de medições;
- **Todas intervenções** provenientes de manutenções preventivas e corretivas;
- **Todos os incidentes** acontecidos, como descargas atmosféricas, vandalismos e furtos.

Descomissionamento



Aspectos mais relevantes

Fatores críticos:

- **Experiência** da equipe de campo, na condução das operações de descomissionamento;
 - **Uso de EPI** e procedimentos adequados para o **trabalho em altura**;
 - Realizar **registros** das condições da torre anemométrica antes e depois do descomissionamento;
 - Realizar **inspeção** das condições operacionais de cada equipamento;
 - **Condução do descomissionamento** segundo as especificações do Plano da Campanha de Medição;
 - **Catalogar e acomodar** adequadamente todos os equipamentos, para eventuais inspeções futuras.
- Devem ser reportados:**
- **Informações a cerca dos procedimentos realizados no descomissionamento;**
 - **Condições dos equipamentos imediatamente antes e após o descomissionamento;**
 - **Todos os problemas e defeitos observados durante a inspeção das condições operacionais;**
 - **Registrar a catalogação dos equipamentos retirados.**

MÓDULO 1:

Estudo da Anemometria

Projetos Eólicos

Principais Parâmetros Climatológicos de Medição

Dados Medidos



Medições Principais:

- *Velocidade do Vento:* A partir de Anemômetros de copos;
- *Direção do Vento:* A partir de Direction vanes

Medições complementares:

- *Temperatura, Pressão barométrica e umidade relativa do ar;*
- *Componente vertical da velocidade ("W" propeller); Gradiente de temperatura Δt*
- *Radiação solar e índice pluviométrico.*

Faixas operacionais recomendadas – Principais parâmetros

	Velocidade	Direção	Temperatura	Pressão barométrica	Umidade relativa
Unidade (SI)	m/s	graus	°C	kPa	%
Faixa de medição	0 a 50 m/s	0° a 360°	-40° a 60°C	94 a 106 kPa	0 a 100%
Início de movimento	≤ 1 m/s	≤ 1 m/s	-	-	-
Constante de distância	≤ 4 m	-	-	-	-
Precisão	≤ 3 %	≤ 5°	≤ 1°C	≤ 1 kPa	≤ 3 %
Resolução	≤ 0,1 m/s	≤ 1°	≤ 0,1°C	≤ 0,2 kPa	≤ 2%

Velocidade do Vento



Recomendações mínimas:

- **Uma medição superior a, pelo menos, 2/3 da altura média do cubo dos aerogeradores;**
- **Segunda medição em altura inferior de, pelo menos, 20m e próximo à menor altura do rotor.**

Principais variáveis registradas:

- **Média aritmética no intervalo de integração;**
- **Desvio padrão no intervalo de integração;**
- **Valor máximo (rajadas) e mínimo no intervalo de integração.**

Permite o cálculo dos:

- **Outros momentos amostrais (velocidade quadrática e cúbica);**
- **Níveis de turbulência (IT, espectros, entre outros);**
- **Gradiente vertical da velocidade;**
- **Variações diurnas e sazonais;**
- **Freqüências de ocorrências da velocidade e sua distribuição probabilística.**

Direção do Vento



Recomendações mínimas:

- **Uma medição em, pelo menos, 2/3 da altura média do cubo dos aerogeradores;**
- **Desejável uma segunda altura de medição;**
- **Na mesma altura do anemômetro de referência da torre anemométrica.**

Principais parâmetros da direção do vento:

- **Média vetorial do intervalo de integração;**
- **Setor de máxima rajada de velocidade no intervalo de integração.**

Permite o cálculo de:

- **Setores predominantes de vento;**
- **Freqüências de ocorrência em cada setor (Rosa dos ventos);;**
- **Ocorrências setorizadas de outras variáveis, como a velocidade média e IT;**
- **Variações diurnas e sazonais da direção do vento (caracterização das brisas);**
- **Entre outras...**

Variáveis Complementares



Temperatura do ar:

- **Altura superior a 10 m. Correção pela ISO 2533.**
- **Média do intervalo de integração;**
- **Máxima e mínima no intervalo de integração.**

Pressão barométrica:

- **Altura superior a 10m. Correção pela ISO 2533.**
- **Média do intervalo de integração;**
- **Máxima e mínima no intervalo de integração.**

Umidade relativa do ar:

- **Altura superior a 10m.**
- **Média do intervalo de integração.**

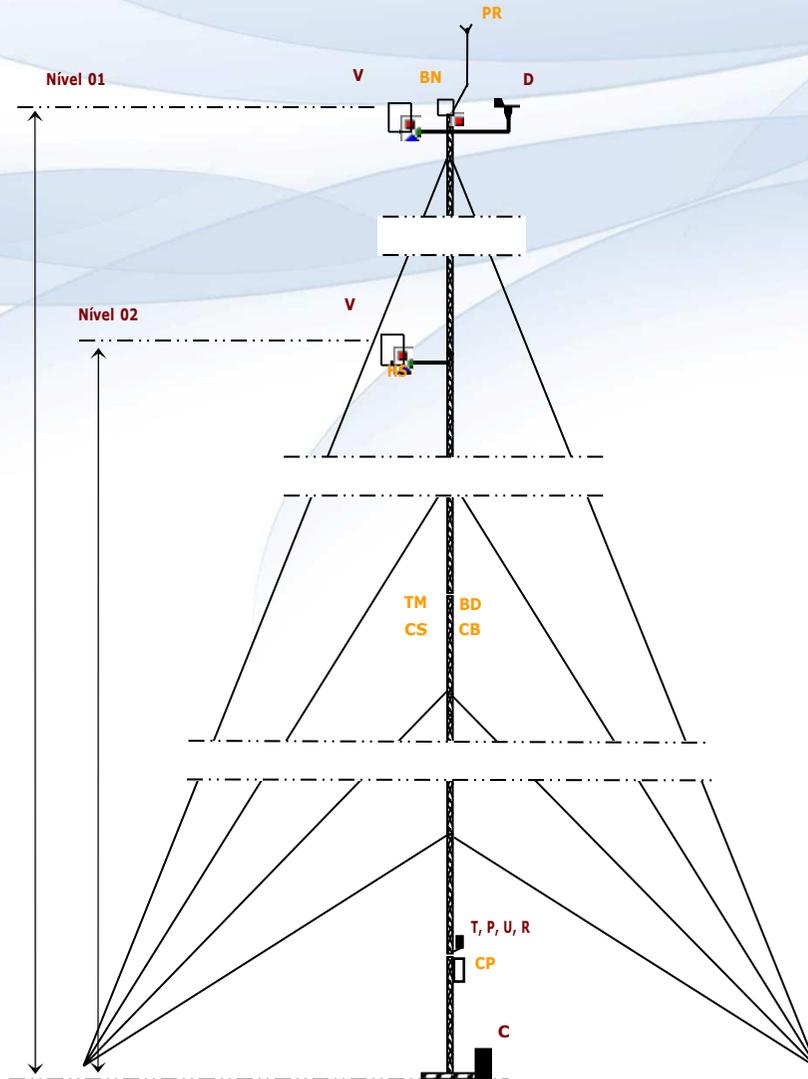
Outros parâmetros:

- **Média do intervalo de integração.**

MÓDULO 2:

Principais Componentes e Incertezas da Medição

Componentes



Principais Equipamentos

- TM Torre metálica
- HS Hastas suportes dos sensores
- CS Cabos dos sensores
- CP Caixa de proteção e anemógrafo
- BD Balizamento diurno - Pintura
- BN Balizamento noturno
- PR Pára-raios

Principais Sensores

- V Velocidade do vento
- D Direção do vento
- T Temperatura do ar
- P Pressão barométrica
- U Umidade Relativa
- R Radiação Solar
- C Volume de Precipitação



Escolha dos Equipamentos



Aspectos Importantes:

- **Custo:** adequado ao orçamento disponível (considerar condição macro do projeto);
- **Confiabilidade e Aceitação;**
- **Adequação** aos estudos da fonte eólica;
- **Sensibilidade** necessárias ao fim que se destina os registros de vento;
- **Robustez**, principalmente em ambientes mais agressivos;
- **Compatibilidade** com o restante dos equipamentos;
- **Compatíveis** com os **acessos** existentes (dimensões e peso);
- **e disponibilidade.**



Torre Metálica



Equipamento utilizado para a sustentação do sistema de aquisição de dados (anemógrafo e sensores).

É composta da estrutura da torre, base metálica ou de concreto, âncoras de sustentação e estaios. Balizamento diurno, geralmente, nas cores laranja scania e branco.

Também são incorporados os seguintes acessórios:
Balizamento noturno, pára-raios e aterramento.



Torre Metálica

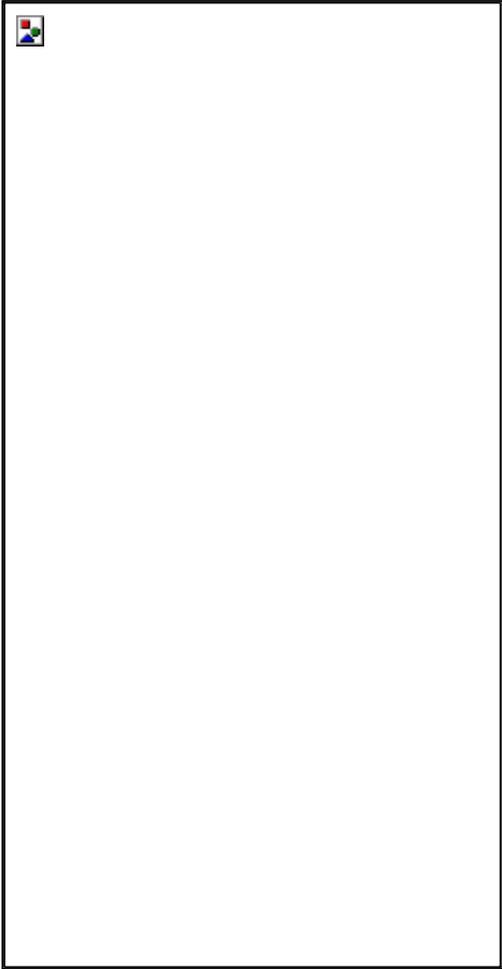


Torre Cilíndrica

Vantagens:

- Baixo Custo;
- De fácil montagem;
- Baixa influência na medição.

Desvantagens:

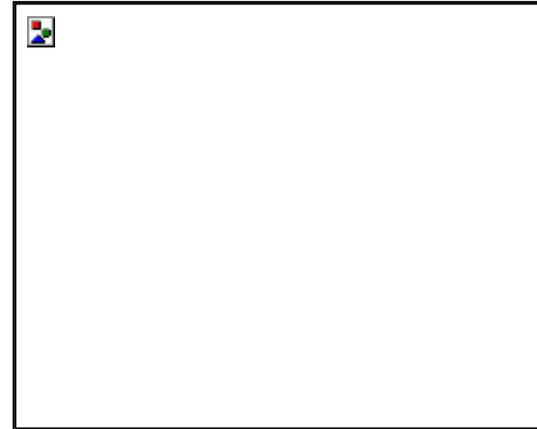
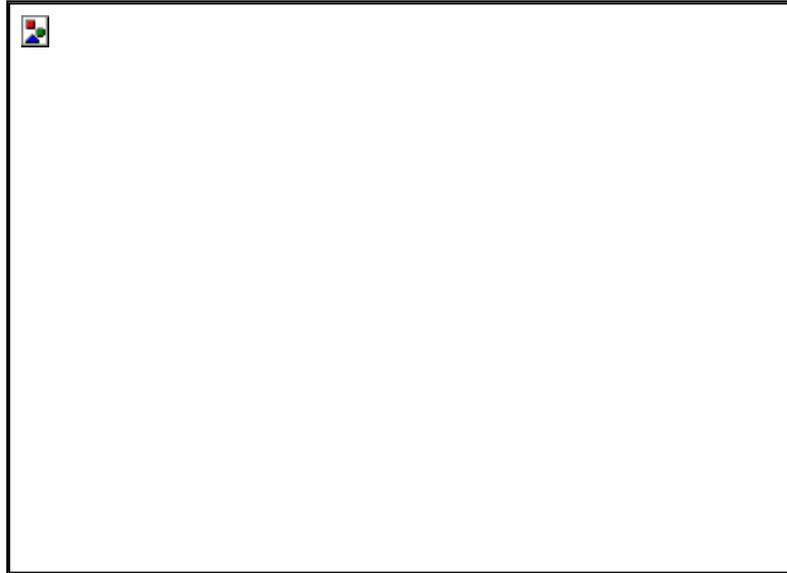
- Difícil manutenção;
 - Vibrações mecânicas;
 - Pequeno suporte de carga.
- 



Torre Metálica



Torre Cilíndrica - Montagem



Torre Metálica

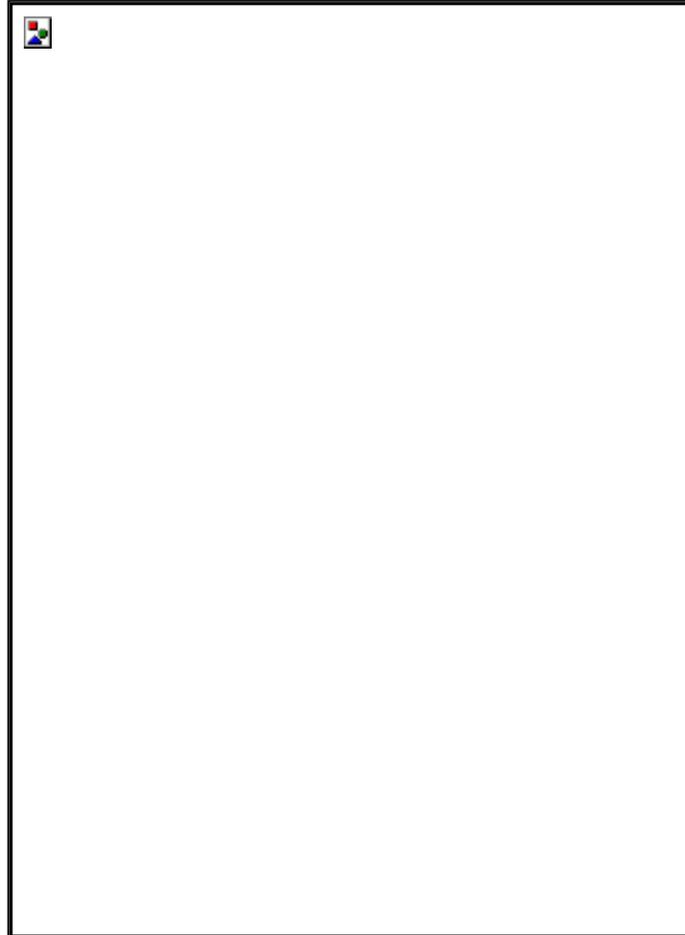
Torre Treliçada

Vantagens

- **Fácil manutenção dos sensores;**
- **Mais estável às vibrações;**
- **Maior suporte de carga;**
- **Durabilidade.**

Desvantagens:

- **Maior Custo;**
- **Montagem mais complicada;**
- **Maior influência na medição.**





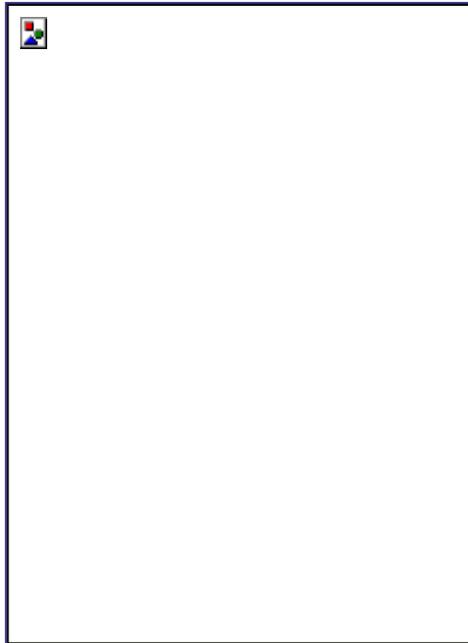
Torre Metálica



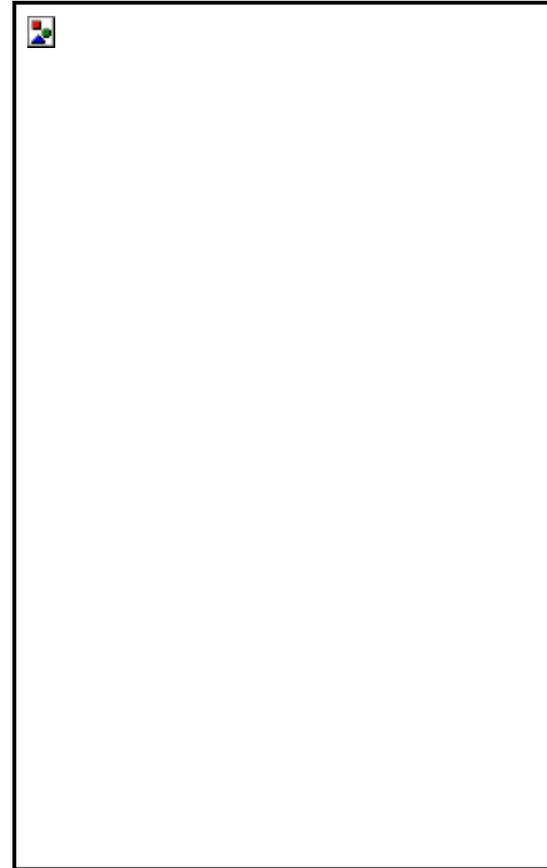
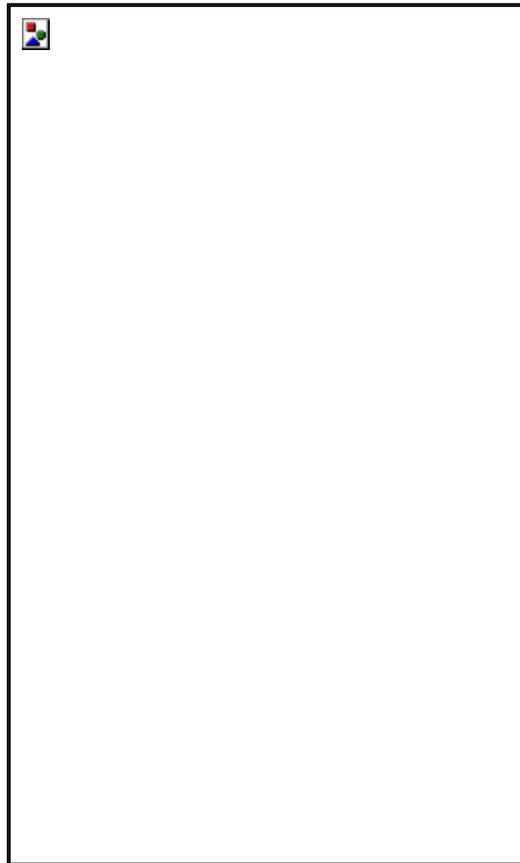
Torre Treliçada - Montagem

Auto-portante

Estaiada



Fácil Manutenção



Anemógrafo

Sistema computadorizado que registra (interpreta e armazena) os sinais dos vários sensores instalados.

Principais características:

- **Número de canais;**
- **Taxa de amostragem;**
- **Intervalo de integração;**
- **Alimentação elétrica;**
- **Capacidade de armazenamento.**



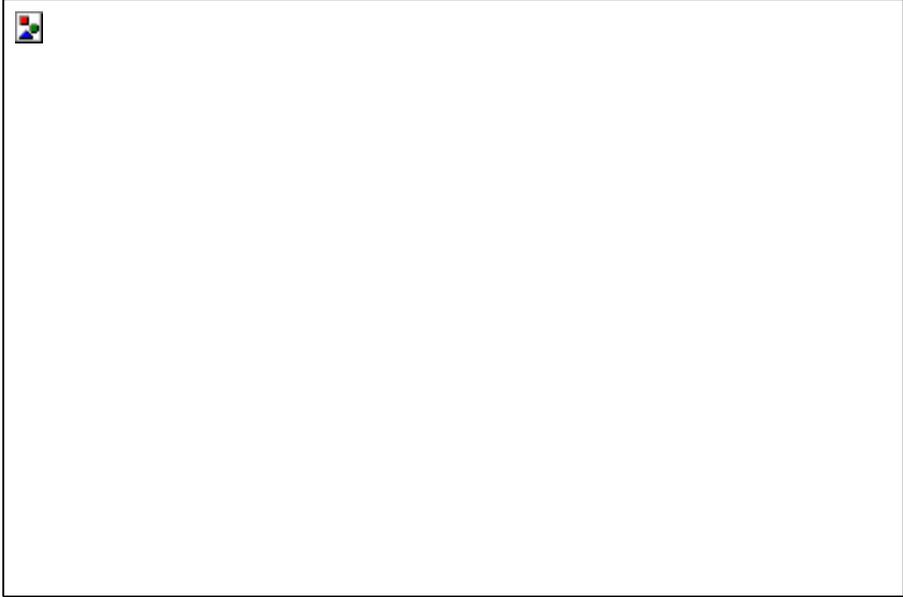


Conexão Remota



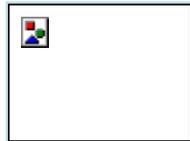
Dispositivo utilizado para enviar e receber dados e informações de programação de forma remota.

Principais meios:

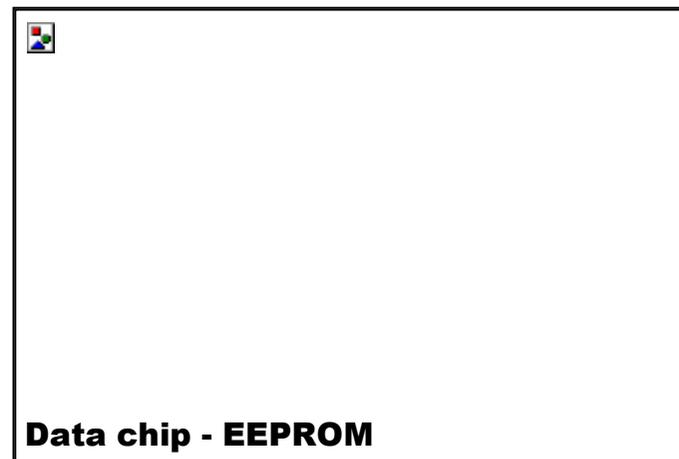
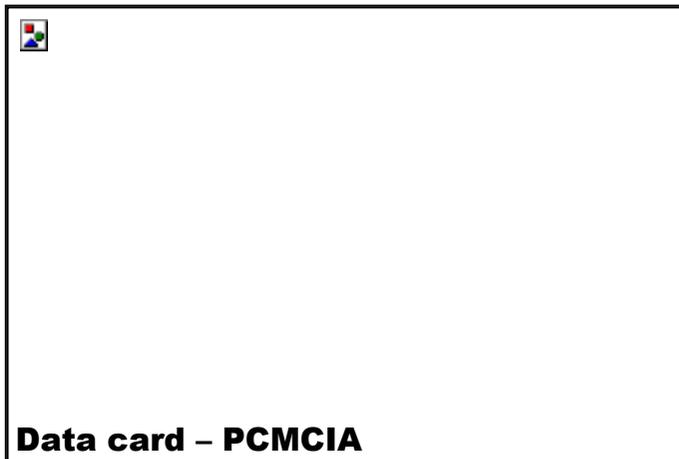
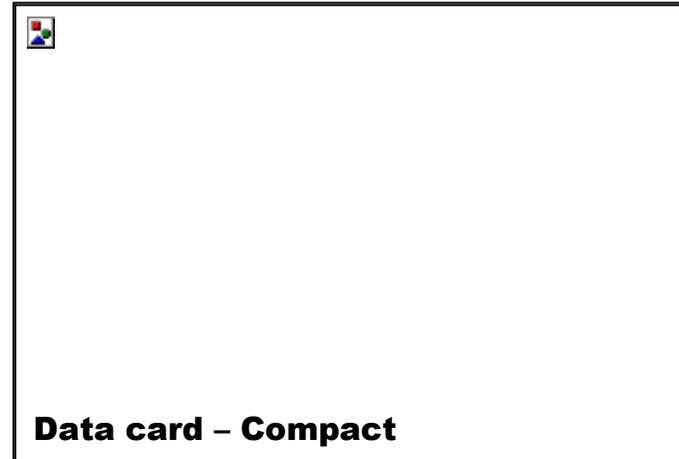
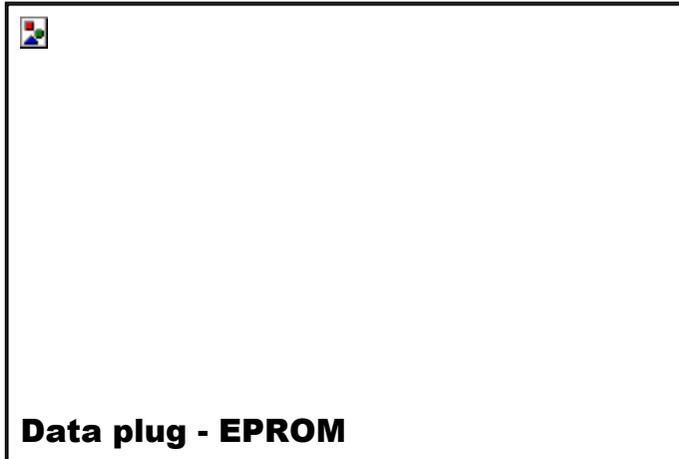
- **Rede celular: GSM, GPRS, CSD, CDMA;**
 - **Satélite; Iridium, Globalstar;**
 - **Rede ethernet;**
 - **Rádio.**
- 



Memória de Massa

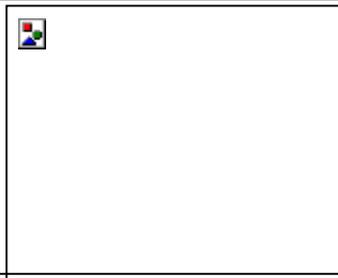
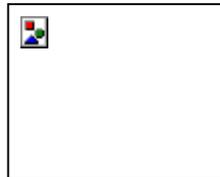
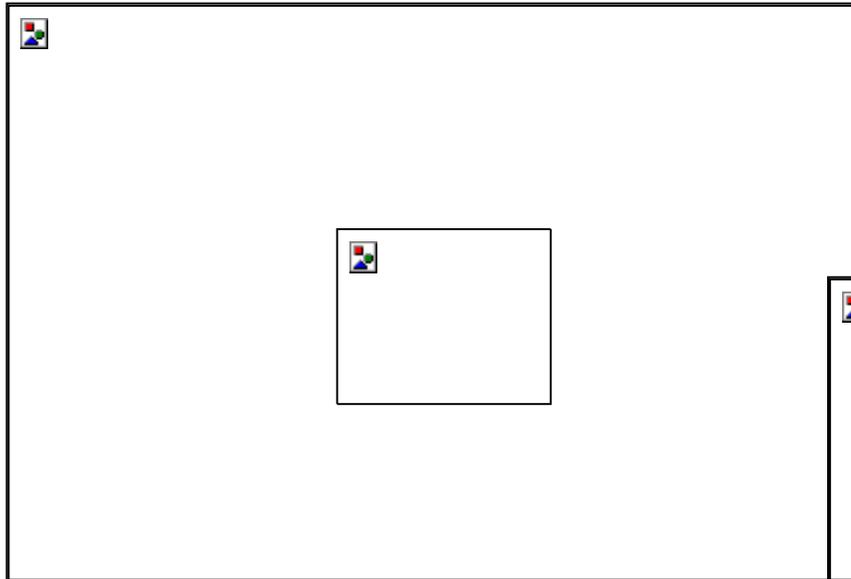


Dispositivo utilizado para armazenar os dados brutos de vento.



Leitora de Dados

Dispositivo utilizado para ler e transportar os dados armazenados nas memórias de massa para o computador.





Anemômetros



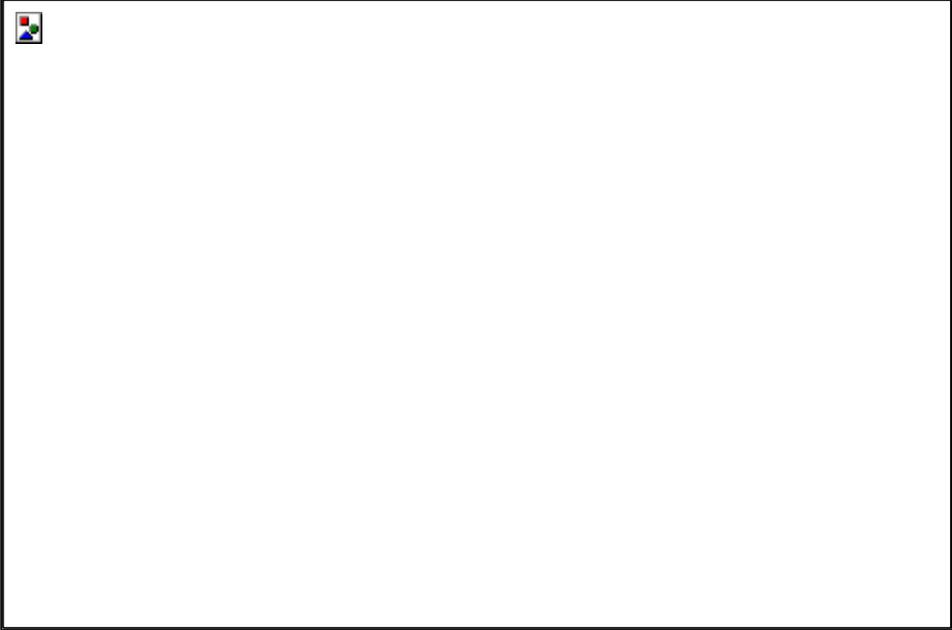
Equipamento utilizado para a medição da velocidade do vento.

Mais Utilizados – Anemômetro de copo

Vantagens:

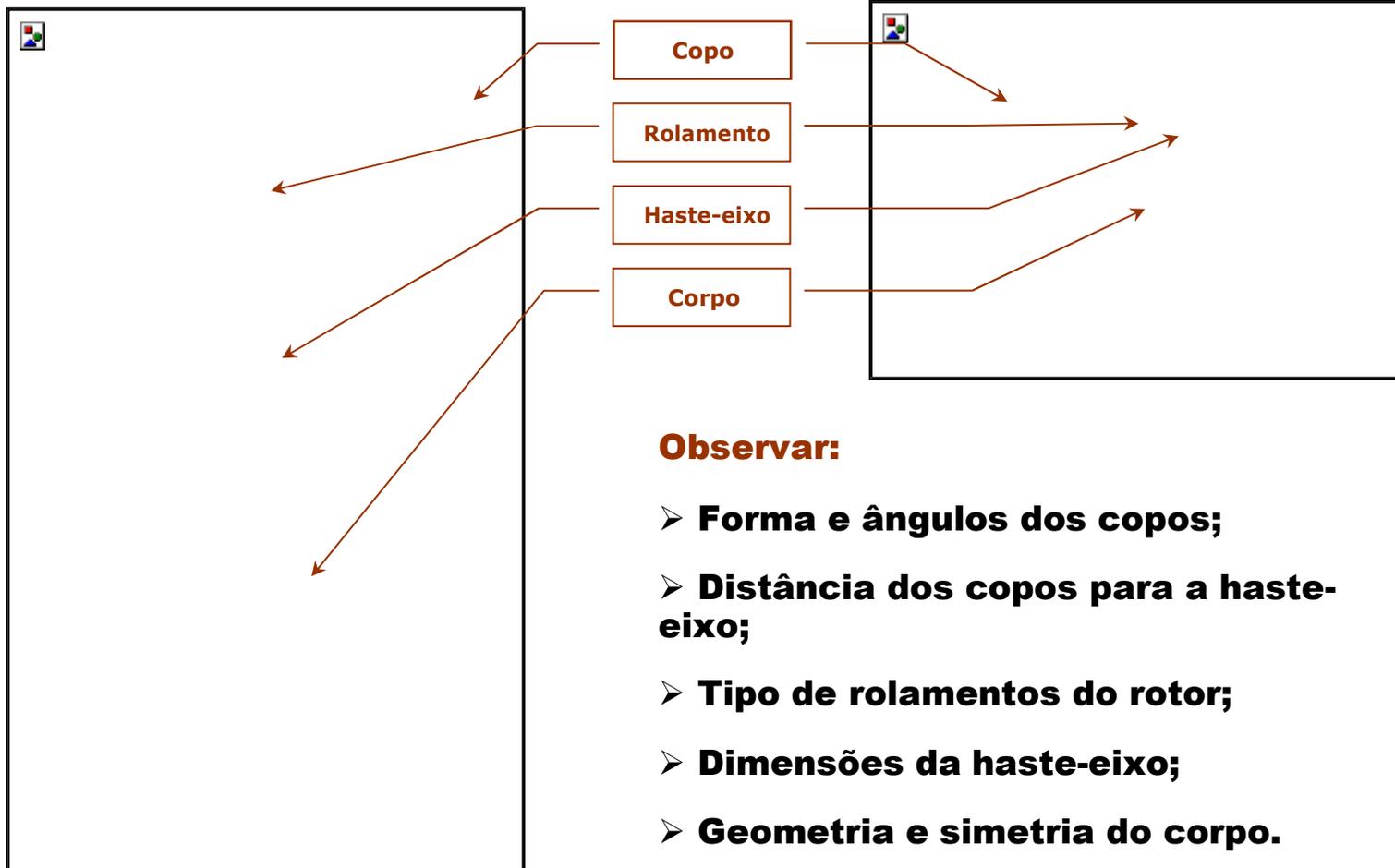
- **Bons resultados;**
- **De fácil montagem;**
- **Baixo custo.**

Desvantagens:

- **Exige re-calibração;**
 - **Não são robustos;**
 - **Aplicações específicas;**
 - **Aplicações limitadas.**
- 

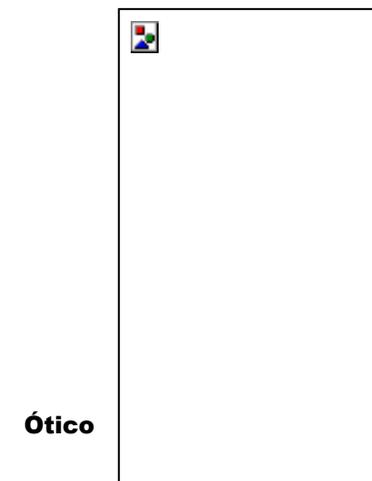
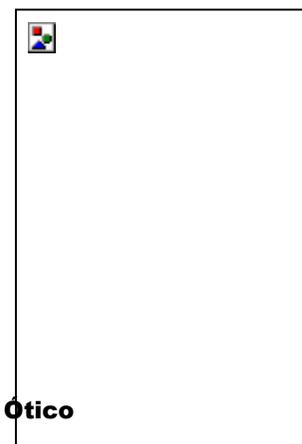
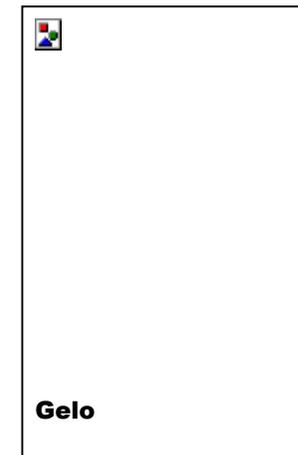
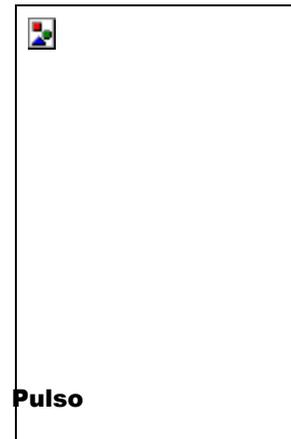
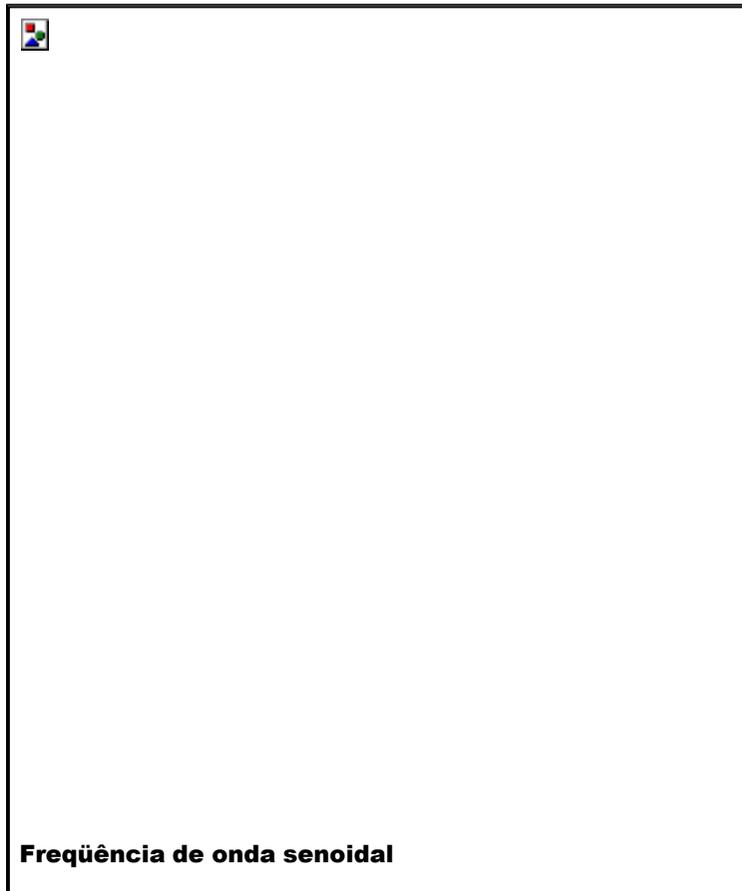
Anemômetros

Anemômetro de Copo - Geometria



Anemômetros

Anemômetro de Copo



Classificação

Classificação:

- **Caracterizado como Classe A e B, segundo a norma IEC 61.400-12-1;**
- **De acordo com a velocidade horizontal do vento nas faixas de influência:**

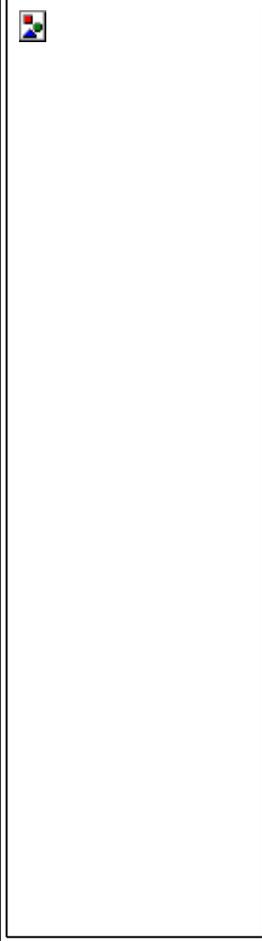
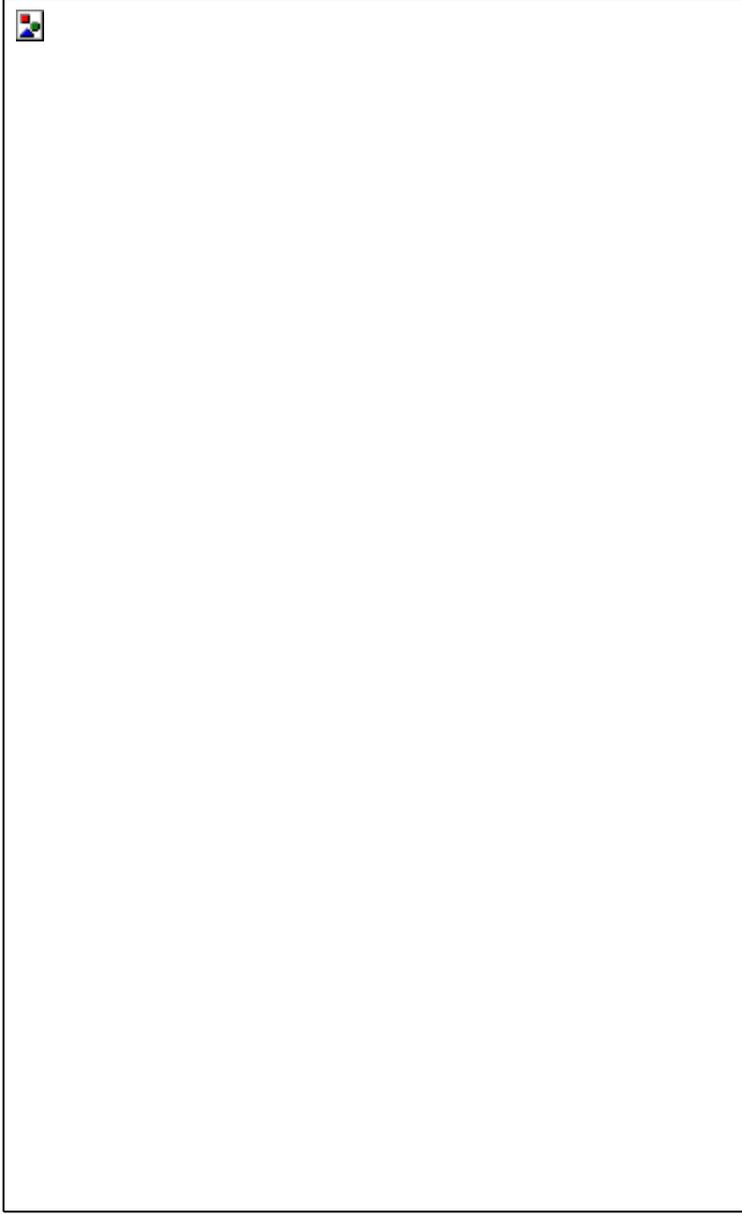


Aspectos levantados (ACCUWIND program)

- **Características da calibração (regressão linear)**
- **Sensibilidade vertical (Angular response);**
- **Curvas de coeficientes de torque;**
- **Inércia do rotor;**
- **Características da fricção no rotor.**

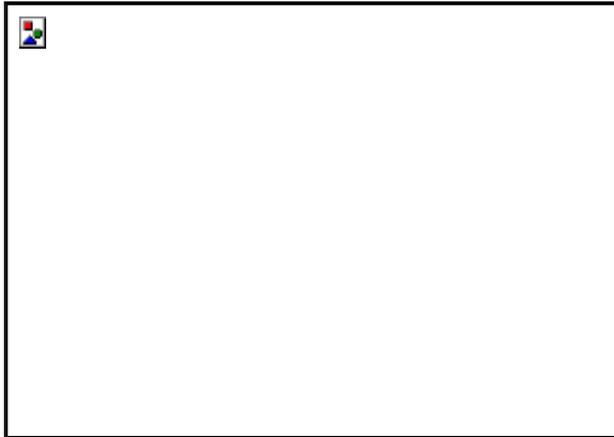


Classificação

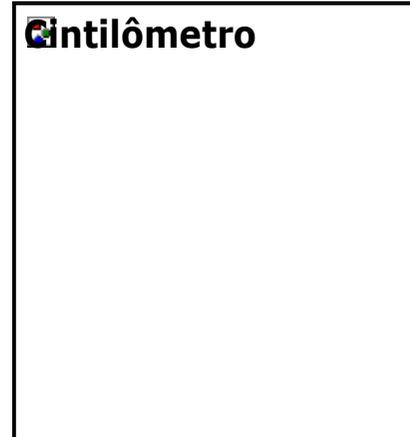


Anemômetros

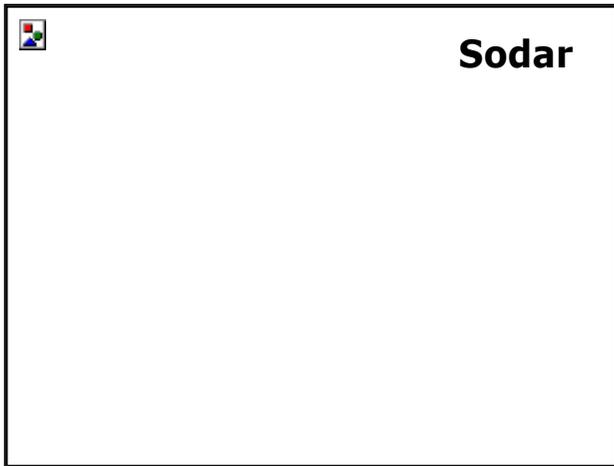
Outras tecnologias



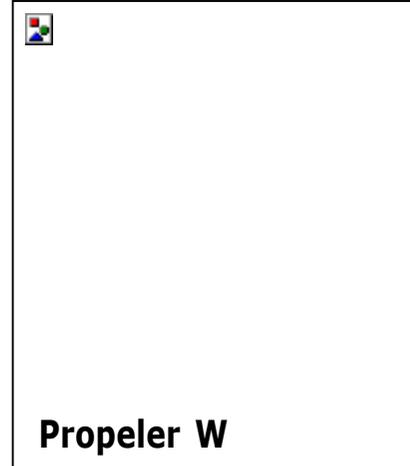
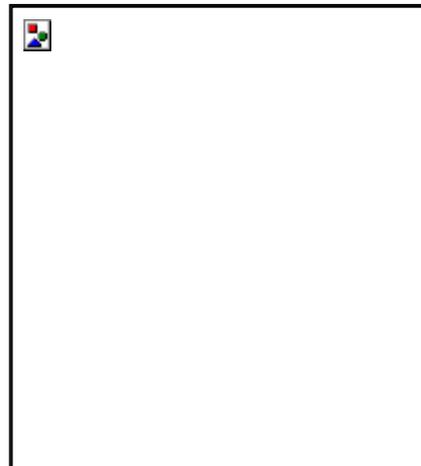
Ultra-sônico



Lidômetro



Sodar



Propeler W



Sensor Direção



Equipamento utilizado para a medição da direção do vento.

Mais Utilizado – Vane com Resistência variável

Vantagens:

- **Bons resultados;**
- **De fácil montagem;**
- **Baixo custo.**

Desvantagens:

- **Não são robustos;**
 - **Aplicações específicas;**
 - **Aplicações limitadas.**
- 

Sensor de Direção

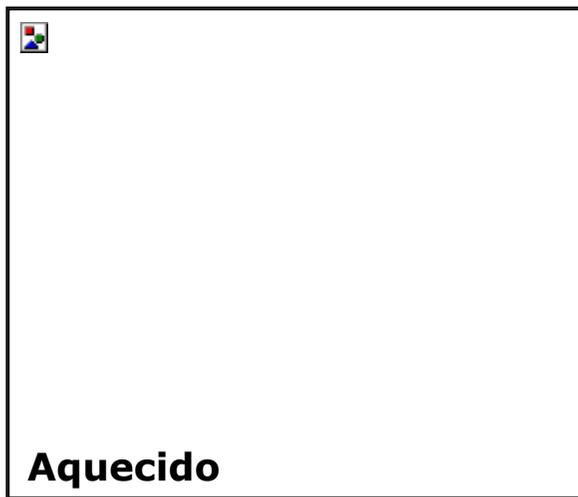
Sensor de Direção – Tecnologias



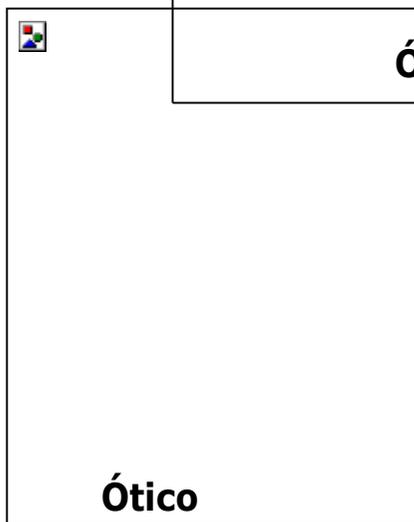
Resistência Variável



Ótico



Aquecido



Ótico



Combinado

Sensor de Direção

Exige cuidado especial durante a montagem

Cuidados especiais:

O norte de referência do sensor deve ser posicionado visando evitar ocorrências de medição na zona morta ($< 8^\circ$);

Para isso deverá ser considerado um valor de off-set relacionado ao norte magnético de um determinado local. O qual deverá ser verificado por uma bússola;

Este valor pode ser transportado para o norte verdadeiro, a partir da declinação magnética do local.

Variáveis Complementares

Termopar

Equipamento utilizado para a medição da temperatura do

Cuidados: **ar.**

- **Proteção contra incidência raios solares;**
- **Evitar sombra da torre na montagem.**

Aplicação:

- **Cálculo da massa específica;**
- **Ajuste do perfil vertical da velocidade do vento (Estabilidade atmosférica).**
- **Operação das máquinas.**





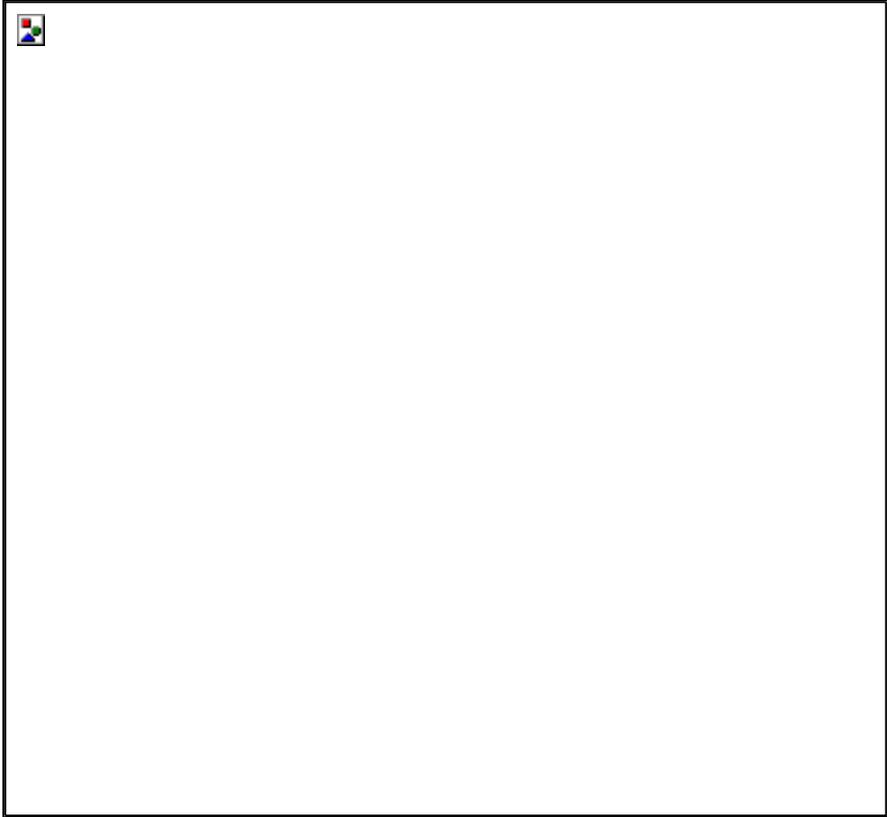
Variáveis Complementares



Barômetro

**Equipamento utilizado para a
medição da pressão
atmosférica.**

Aplicação:

- **Cálculo da massa específica;**
 - **Operação das máquinas;**
 - **Projeto da planta eólica.**
- 

Variáveis Complementares

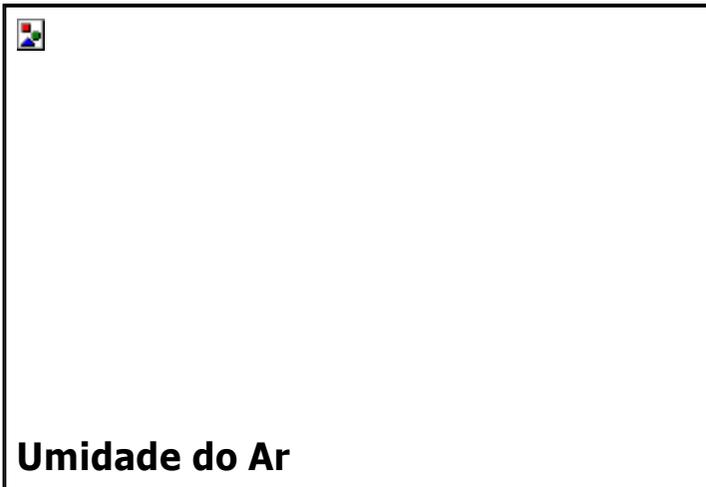
Outros Sensores



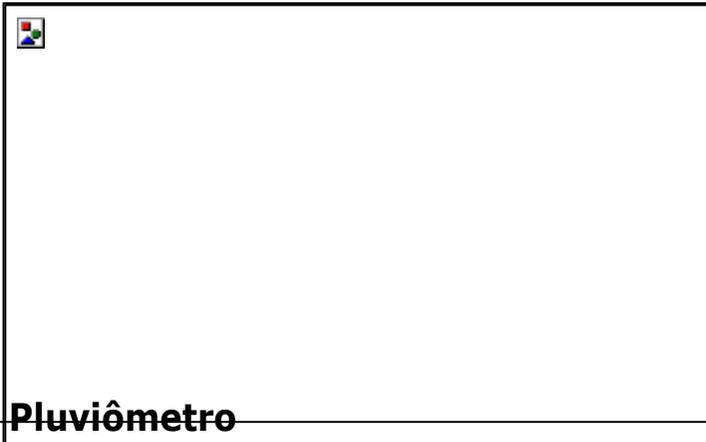
Piranômetro – Radiação Solar

Aplicação:

- **Projeto da planta eólica;**
- **Operação das máquinas**



Umidade do Ar



Pluviômetro

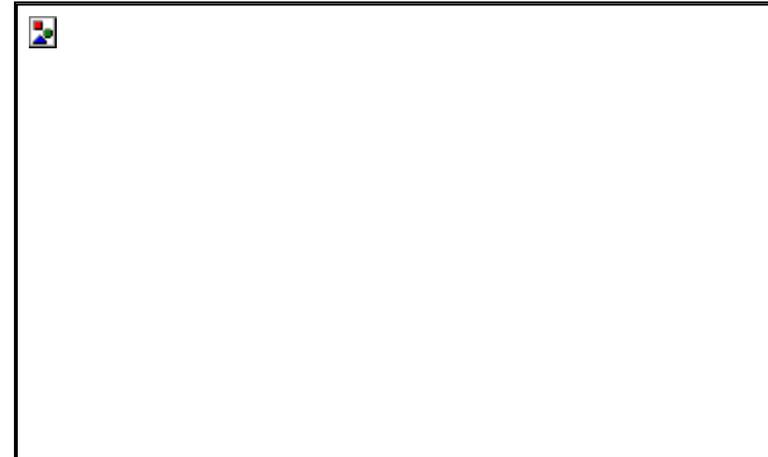
Hastes de Suporte dos Sensores

Equipamento utilizado para sustentar os sensores na torre.



Principais características:

- **Forma e simetria;**
- **Dimensões;**
- **Material de construção;**
- **Estabilidade mecânica;**
- **Dificuldade de montagem.**

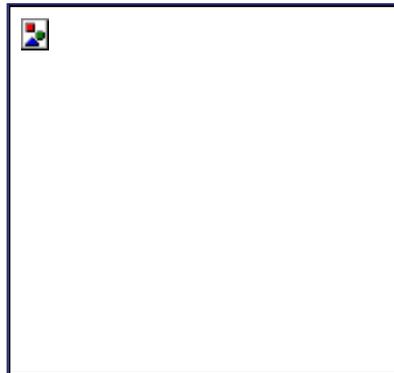
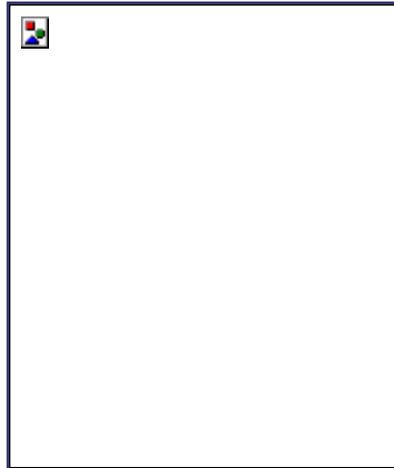




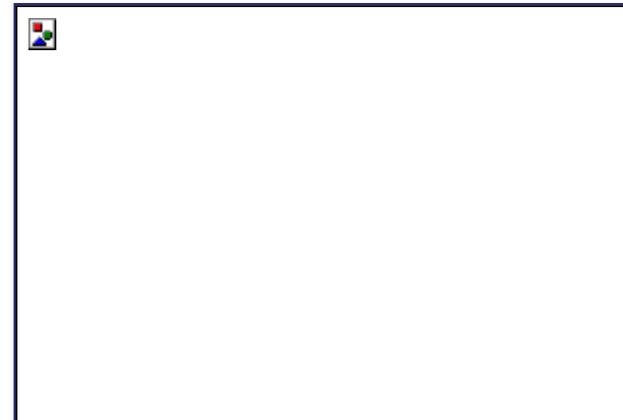
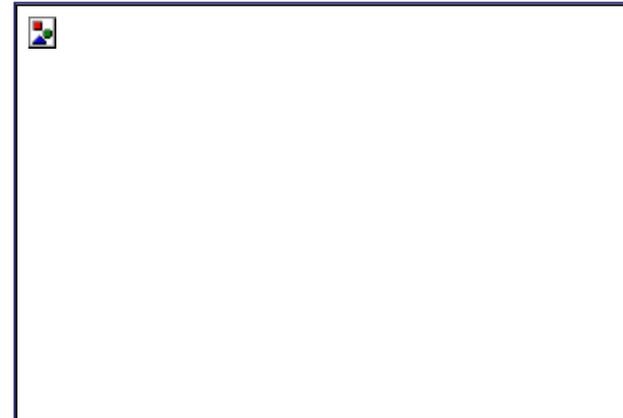
Outros Componentes



Acessórios do sistema de aquisição de dados.



Caixa de proteção de anemógrafo



Cabos dos sensores



MÓDULO 2:

**Principais Componentes
e Incertezas da Medição**

**Principais Incertezas da
Medição do Vento**

Principais Incertezas

Tipo A:

- **Relacionadas à derivação de estatísticas** [até 0,5%];

Tipo B:

- **Calibração do anemômetro** [1,0% - 5,0%];
- **Variações na calibração** [0,2% - 3,0%];
- **Dinâmica do sensor (“overspeed”)** [0,2% - 1,0%];
- **Dinâmica do sensor (sensibilidade vertical)** [0,2% - 1,5%];
- **Distorção do fluxo pela torre** [0,5% - 2,0%];
- **Distorção do fluxo pela haste** [0,5% - 2,0%];
- **Distorção do fluxo pelos acessórios de fixação** [0,1% - 1,0%];
- **Assimetria do fluxo em torno do anemômetro** [0,2% - 2,0%];
- **Imprecisão do sistema de medição** [0,2% - 1,0%].



Calibração do Anemômetro



Tipos de calibração:

- **Atmosfera livre (maior uso na verificação da calibração);**
- **Túnel de vento.**



Fontes de incertezas:

- **Calibração do túnel de vento;**
- **Calibração dos instrumentos e transdutores;**
- **Resolução dos registradores digitais;**
- **Correção de “Blockage”;**
- **Derivações estatísticas em médias.**

Fontes de incertezas da calibração:

- **Atmosfera livre (componentes 3D)**
- **Variação da calibração com o tempo;**
- **Influência da temperatura.**



Dinâmica - Overspeed



Depende de:

- **Construção do anemômetro (momentos de inércia do rotor);**
- **Características do vento (turbulência atmosférica e superficial).**

Modelo simplificado:

$$E = I^2 \cdot (1,8d - 1,4)$$



Dinâmica - Sensibilidade Vertical



Depende de:

- **Geometria do anemômetro e hastes suporte;**
 - **Características do vento (componente vertical);**
 - **Condições de montagem do sensor.**
- 

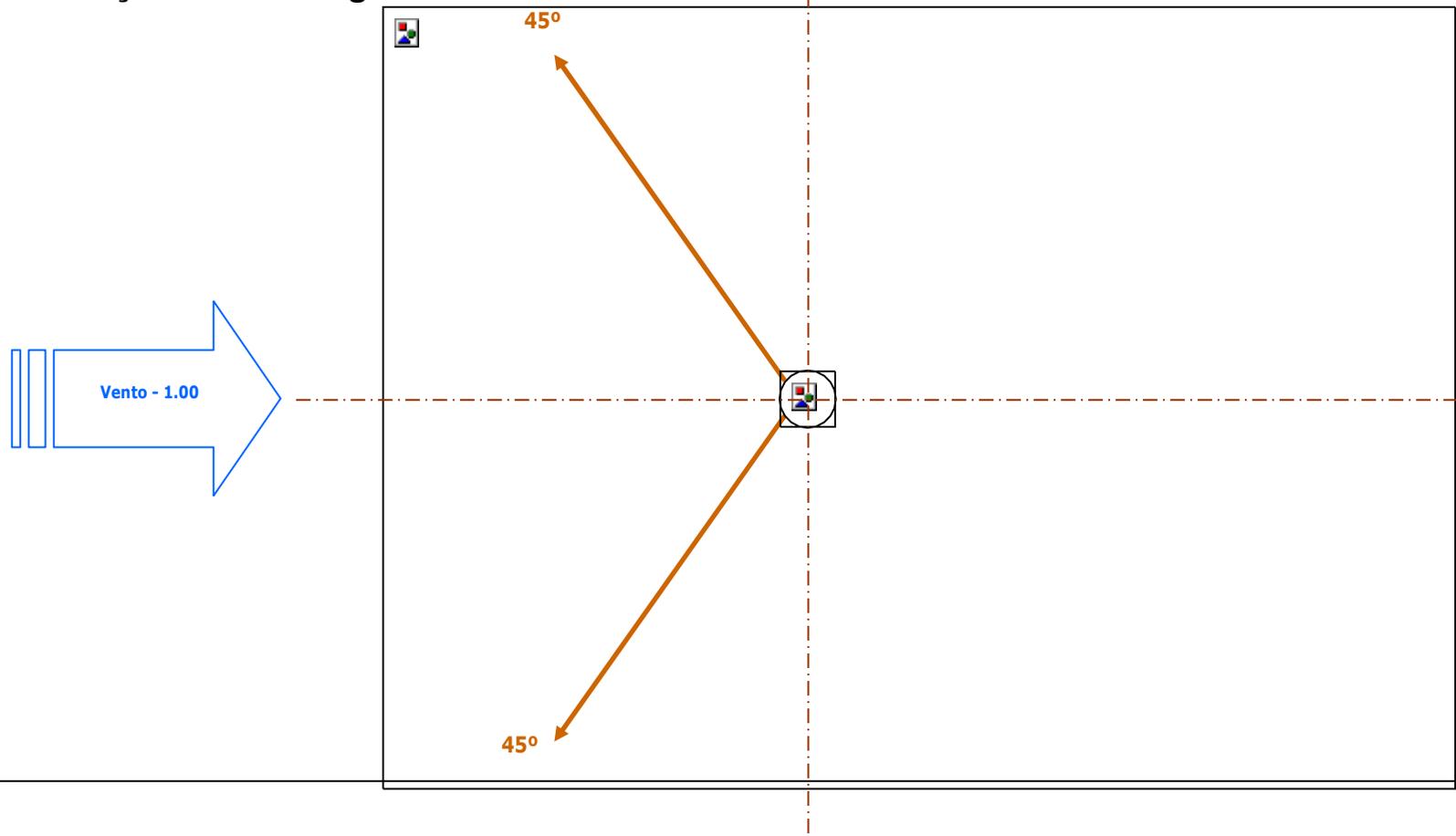


Montagem – Torre Metálica

Depende de:

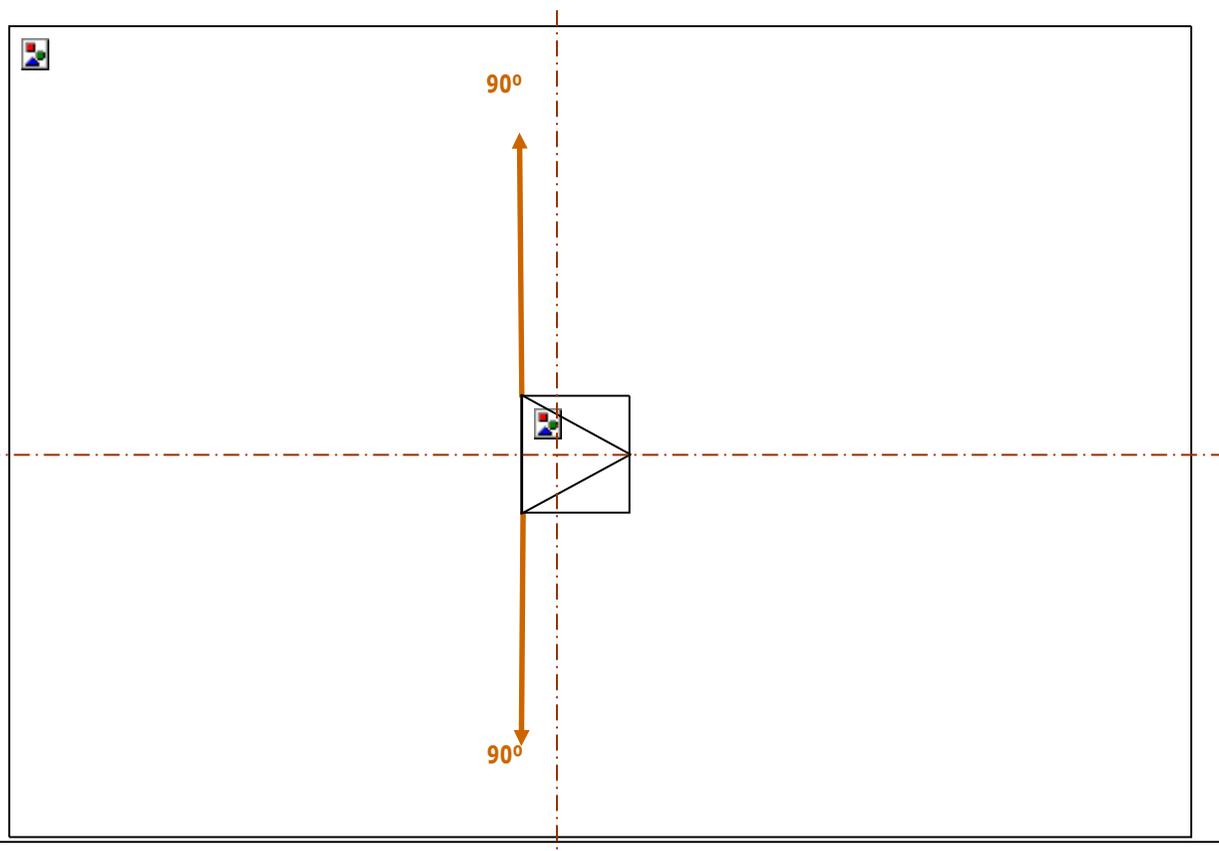
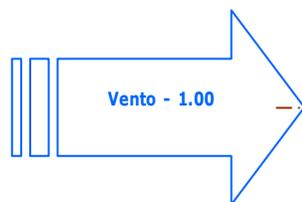
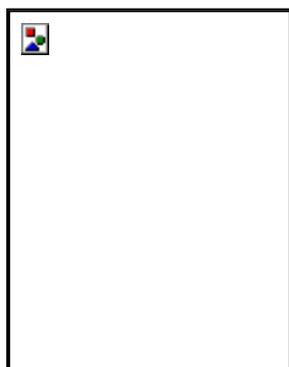
- Geometria e dimensões da torre;
- Condições de vento (direção e velocidade)
- Condições de montagem das hastes dos sensores

Torre Cilíndrica
Influência na Medição



Montagem – Torre Metálica

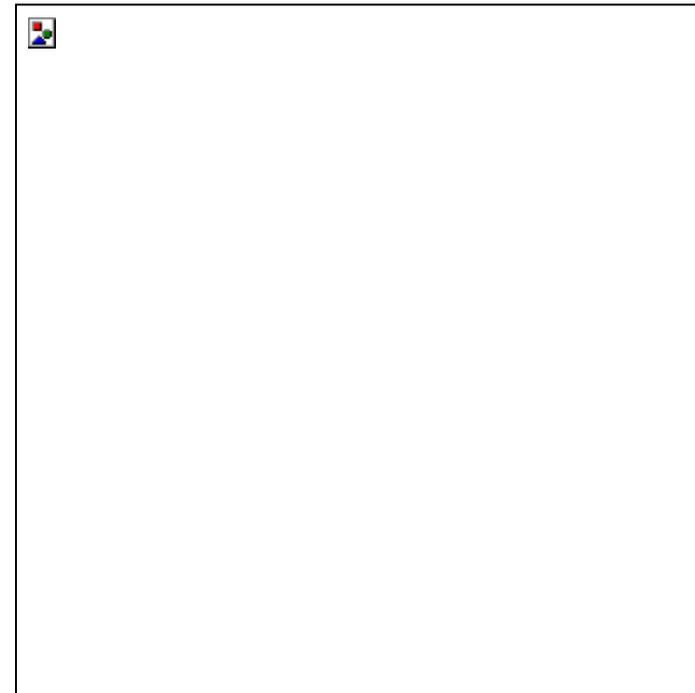
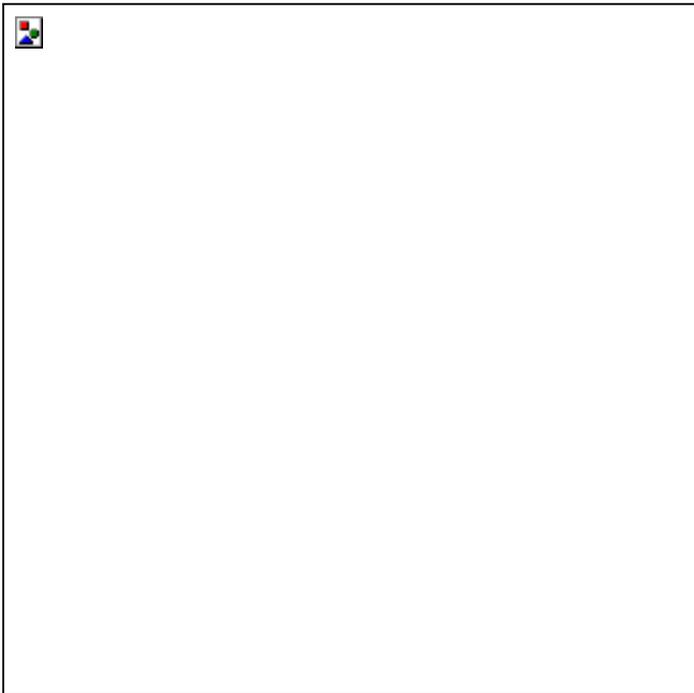
Torre Treliçada - Influência na Medição



Montagem – Acessórios

Depende de:

- **Geometria e dimensões da haste dos sensores;**
- **Geometria dos clips, abraçadeiras e outros acessórios de fixação**
- **Condições de montagem dos sensores.**

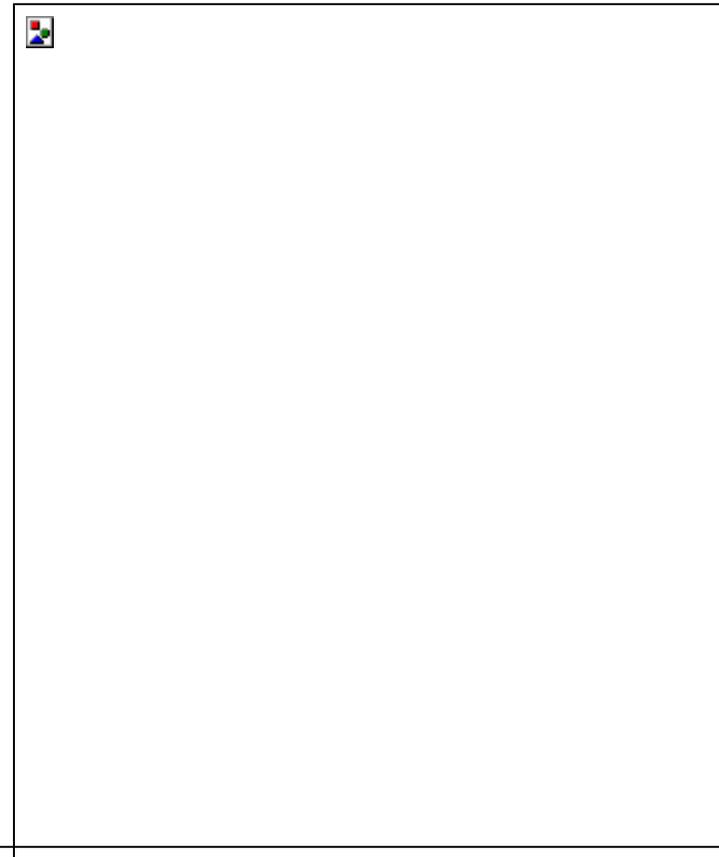
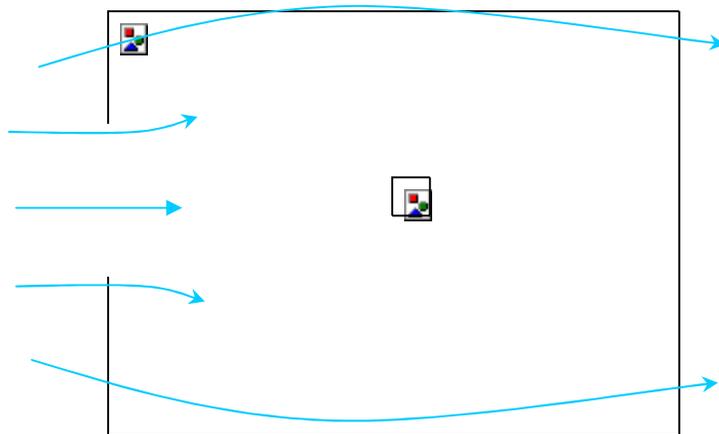


Recomendação: Distância do sensor: 12x a 15x o diâmetro do tubo da haste.

Assimetria do Fluxo

Depende de:

- **Geometria da haste dos sensores e equipamentos próximos;**
- **Condições do vento (perturbações do fluxo);**
- **Condições de montagem dos sensores.**



Incertezas Totais

Para o cálculo do total das incertezas, deverão ser assumidos erros independentes. Assim os erros deverão ser combinados a partir da raiz da soma do quadrados.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2}$$

IEA – Recommended Practices Part 11:

- **Campanha de medição conforme recomendado pela norma** [mínimo 1,5%];
- **Campanha de medição não segue as recomendações da norma** [até 7,0%];

AWEA – Standard procedures for Meteorological Measurement:

- **Campanha de medição – Somatório das incertezas** [**< 3,0%**].



Conclusões



- **Uma das principais fontes de incertezas do desenvolvimento de um projeto eólico é a campanha de medição do vento.**
- **O sucesso de uma campanha está relacionado, principalmente, a elaboração de um satisfatório Plano da Campanha de medição, e não unicamente a qualidade dos equipamentos especificados;**
- **Atualmente existem boas fontes de informações a cerca do tema, como normas, handbook e práticas recomendadas;**
- **A especificação dos equipamentos e a metodologia adotada na campanha de medição deve levar em conta as características do projeto, buscando assim mitigar ainda mais as incertezas;**
- **Saber medir o vento é apenas uma peça do xadrez, e a movimentação desta peça deverá estar de acordo com a estratégia pensada para ganhar o jogo.**