



II WORKSHOP DE
ENERGIAS
OCEÂNICAS E FLUVIAIS

**Avaliação da Aerodinâmica de
Turbinas Eólicas**

Apresentação: Dr. Mojtaba Maali Amiri

Prof. Segen Farid Estefen

Agosto de 2019

Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) COPPE/UFRJ

Sumário:

1.Introdução

2.Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

3.Objetivos e metodologia

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Porque a energia eólica?

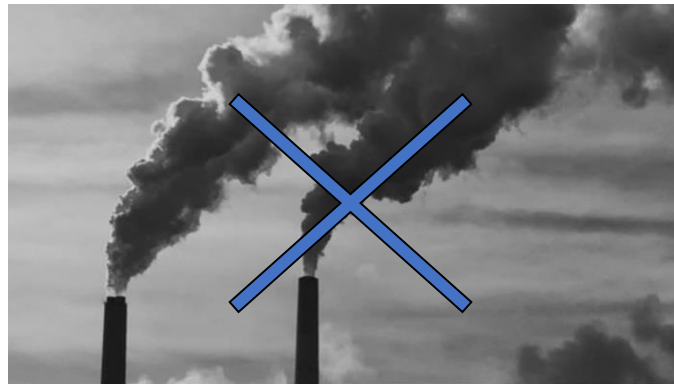
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Porque a energia eólica?

1. Ambientalmente amigável



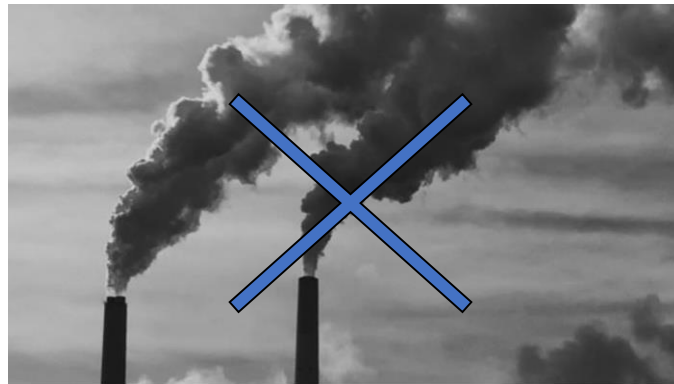
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Porque a energia eólica?

1. Ambientalmente amigável



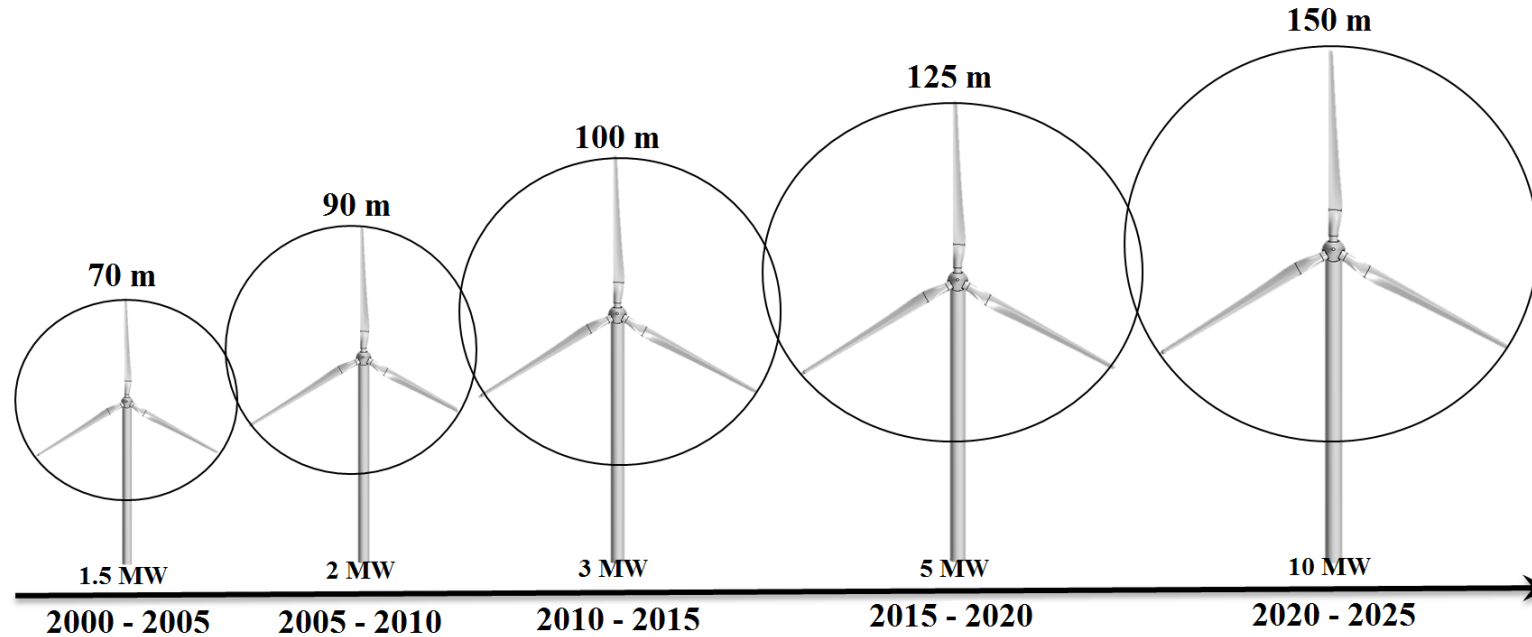
2. Os suprimentos são ilimitados

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

A evolução das turbinas eólicas



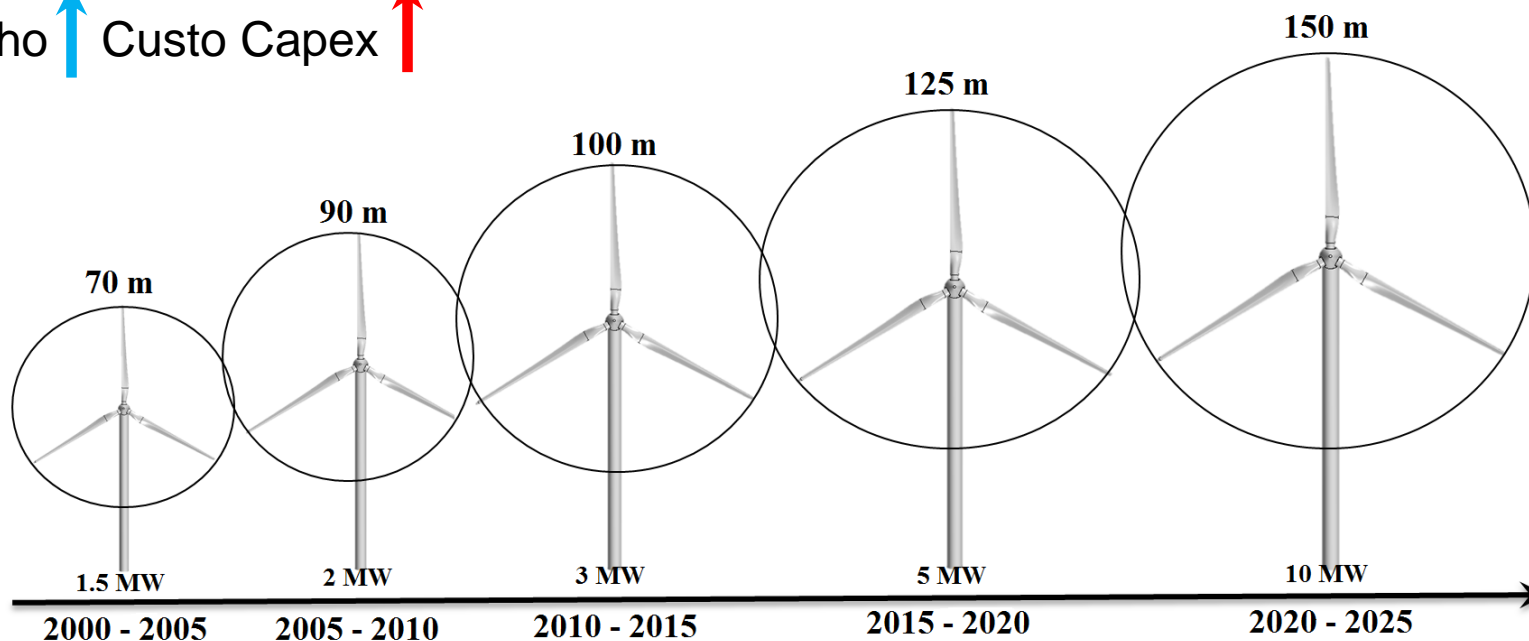
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

A evolução das turbinas eólicas

Tamanho ↑ Custo Capex ↑



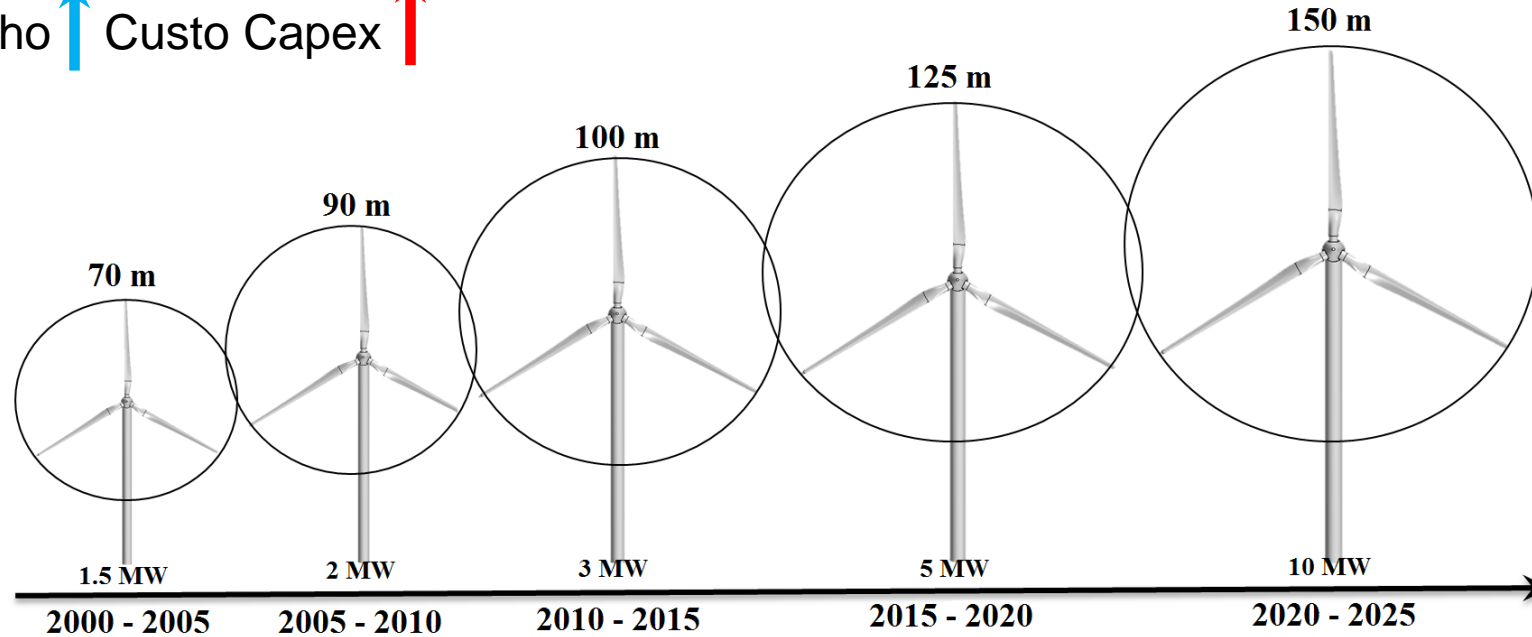
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

A evolução das turbinas eólicas

Tamanho ↑ Custo Capex ↑



Otimização em relação às cargas aerodinâmicas

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Importância da previsão correta das cargas aerodinâmicas

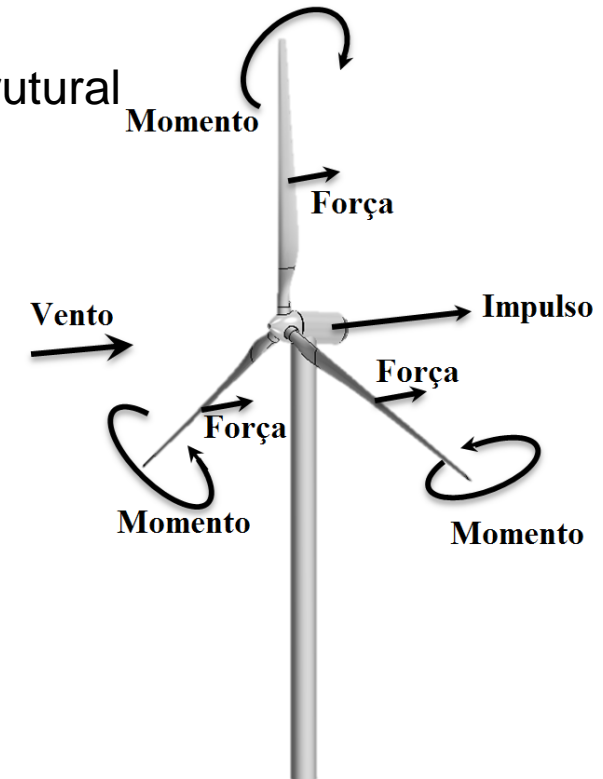
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Importância da previsão correta das cargas aerodinâmicas

- As cargas têm um impacto grande no comportamento estrutural



Introdução

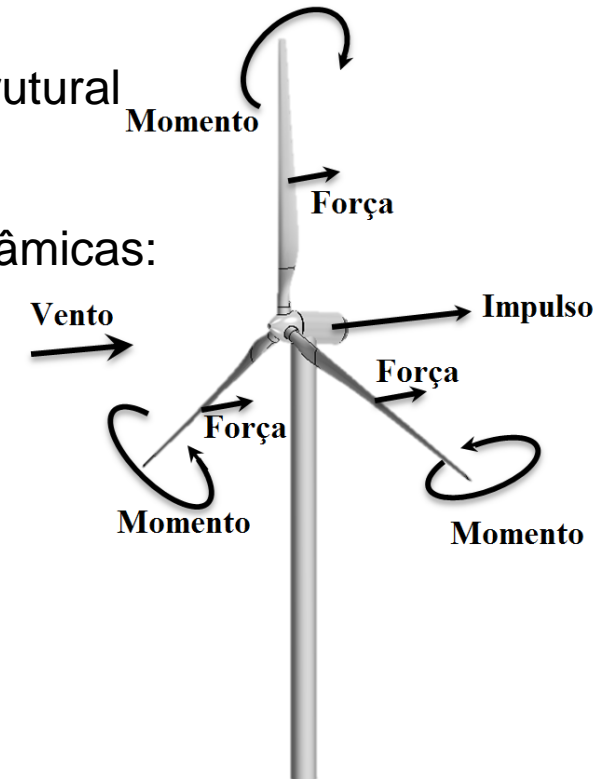
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Importância da previsão correta das cargas aerodinâmicas

- As cargas têm um impacto grande no comportamento estrutural
- Falta de conhecimento suficiente sobre as cargas aerodinâmicas:

Falha no projeto



Introdução

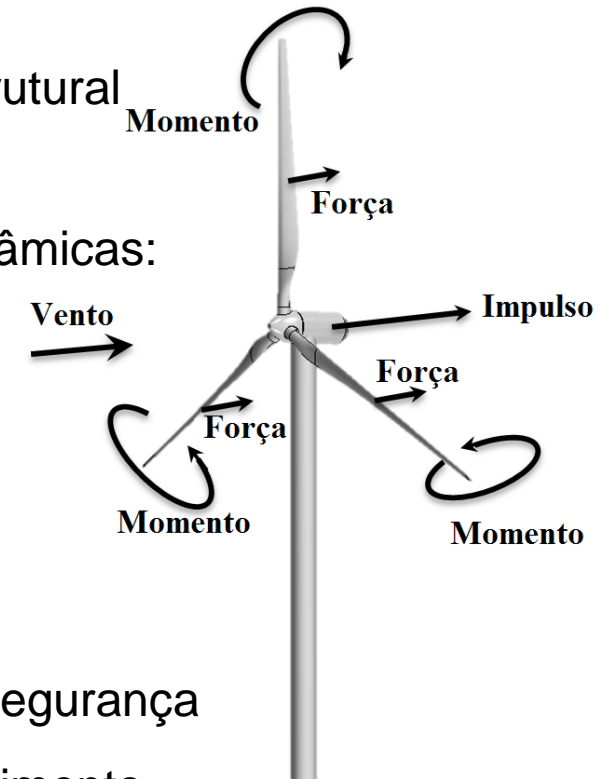
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Importância da previsão correta das cargas aerodinâmicas

- As cargas têm um impacto grande no comportamento estrutural
- Falta de conhecimento suficiente sobre as cargas aerodinâmicas:

Falha no projeto



Soluções:

1. Uso de fatores de segurança
2. Aumentar o conhecimento sobre a aerodinâmica das turbinas eólicas

Introdução

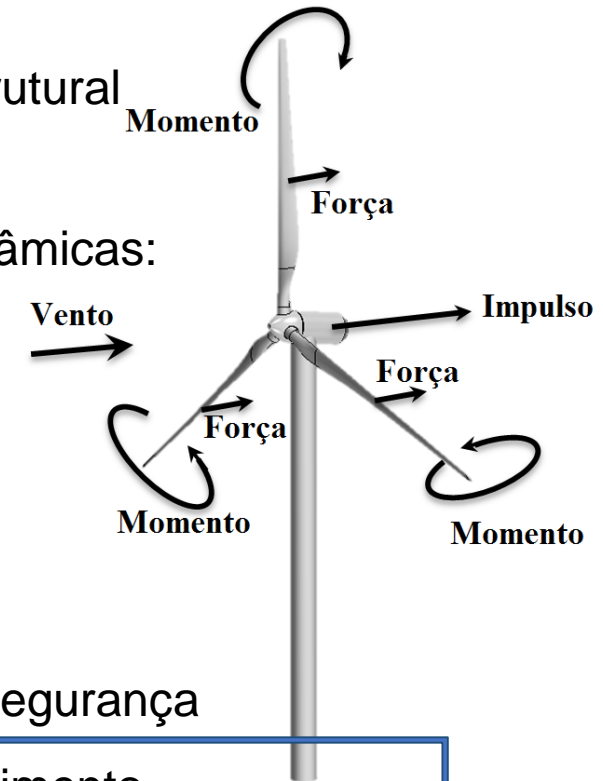
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Importância da previsão correta das cargas aerodinâmicas

- As cargas têm um impacto grande no comportamento estrutural
- Falta de conhecimento suficiente sobre as cargas aerodinâmicas:

Falha no projeto



Soluções:

1. Uso de fatores de segurança

2. Aumentar o conhecimento
sobre a aerodinâmica das turbinas eólicas

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

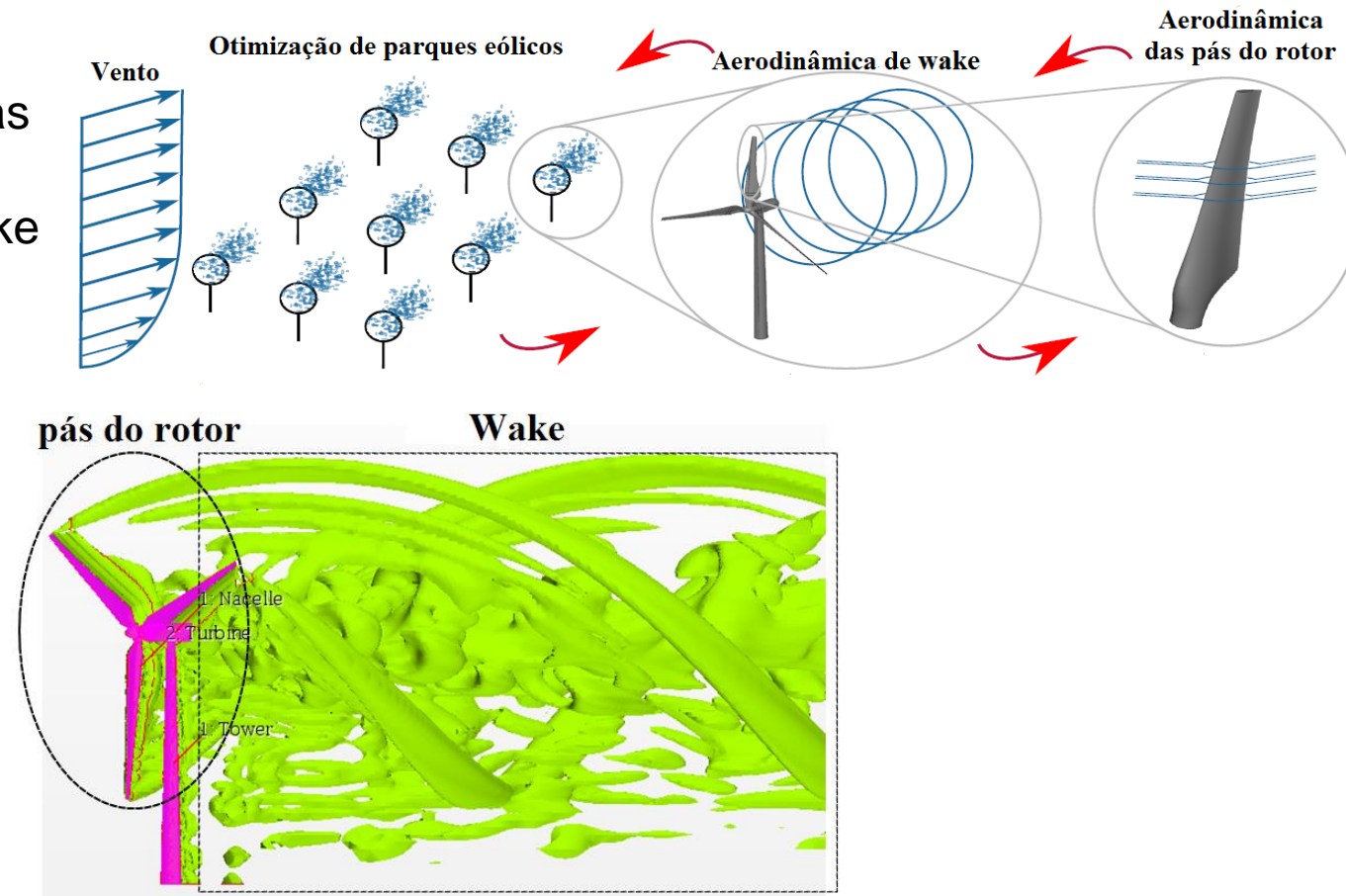
Objetivos e
Metodologia

Aerodinâmica das turbinas eólicas

Introdução	avaliação da aerodinâmica	Objetivos e Metodologia
------------	---------------------------	-------------------------

Aerodinâmica das turbinas eólicas

1. Aerodinâmica das pás
2. Aerodinâmica de wake



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

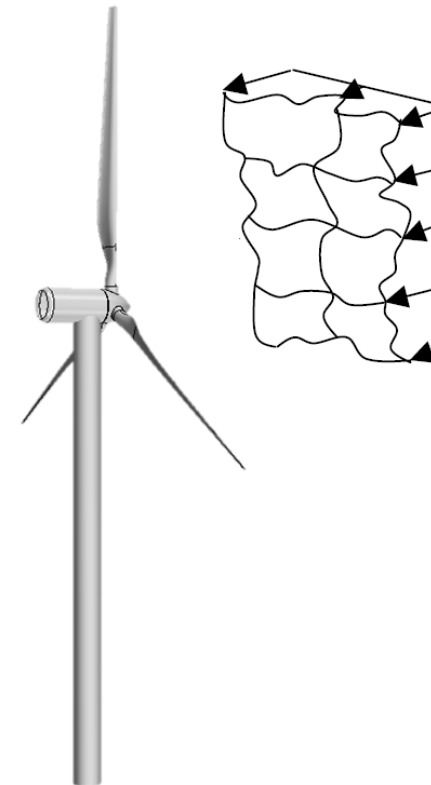
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

1. Turbinas eólicas operam em escoamento turbulento



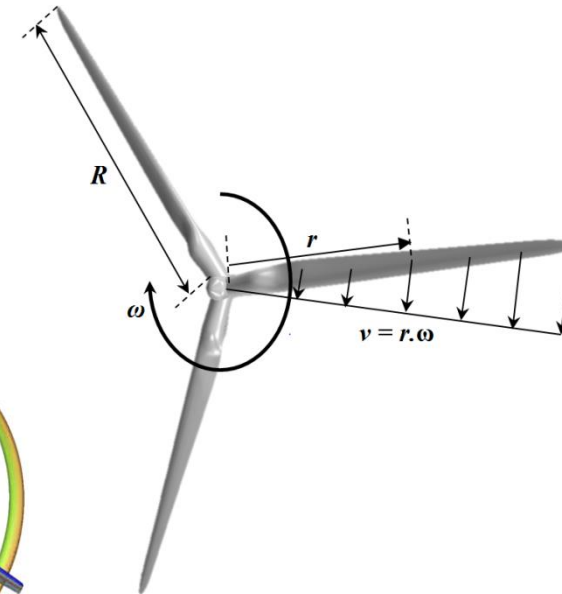
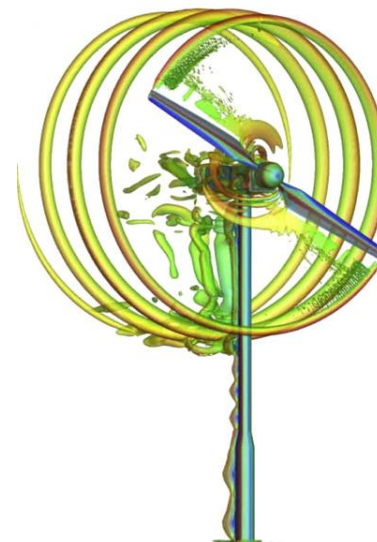
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

2. O escoamento está sujeito as



Introdução

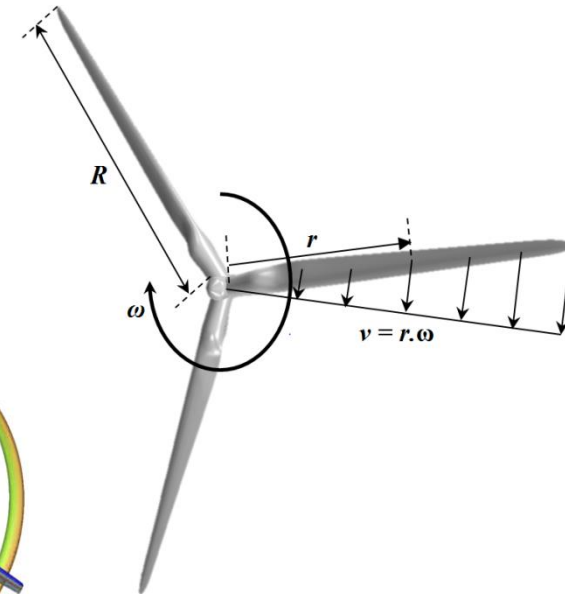
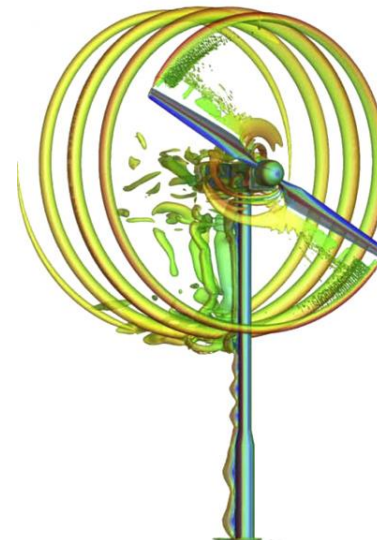
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

2. O escoamento está sujeito as

a) efeito rotacional induzido pela rotação do rotor



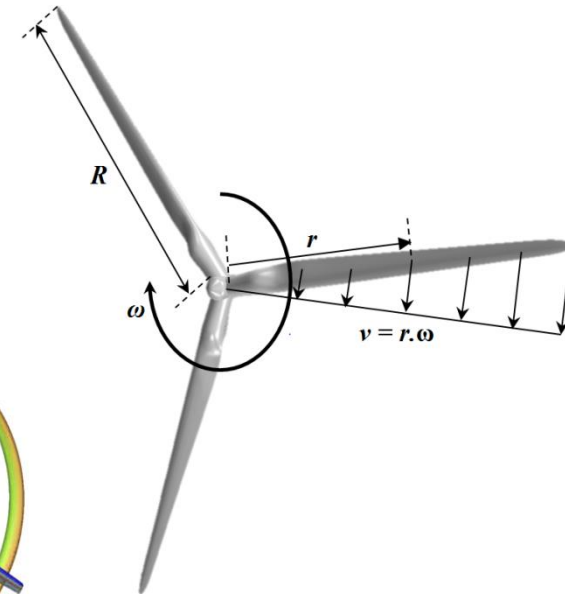
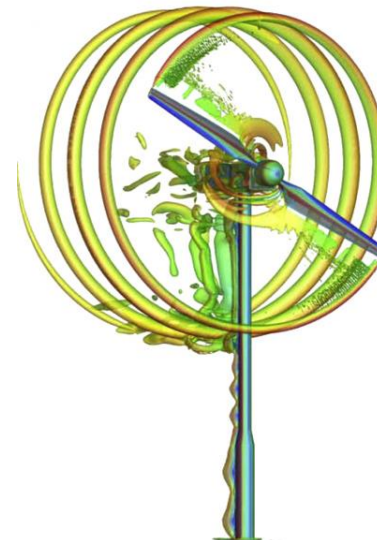
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

2. O escoamento está sujeito as
 - a) efeito rotacional induzido pela rotação do rotor
 - b) o ângulo de ataque alcança grandes valores próximos à raiz da pá



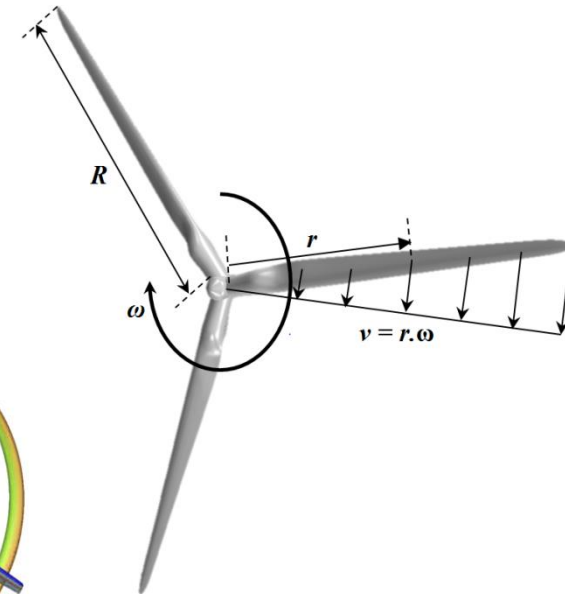
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

2. O escoamento está sujeito as
 - a) efeito rotacional induzido pela rotação do rotor
 - b) o ângulo de ataque alcança grandes valores próximos à raiz da pá
 - c) vórtices próximo à ponta da pá.



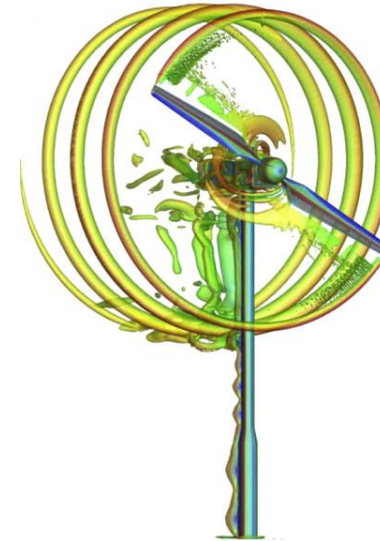
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

3. As turbinas eólicas estão sujeitas a várias interações



Introdução

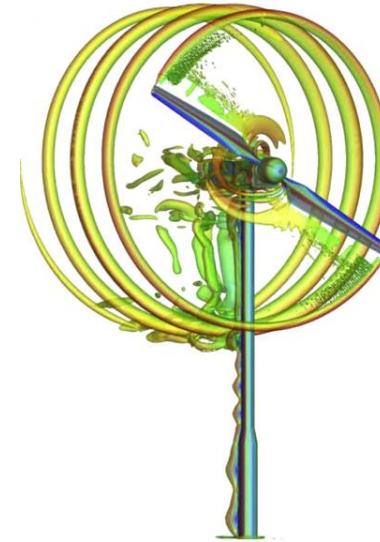
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Desafios relacionados à aerodinâmica das turbinas eólicas

3. As turbinas eólicas estão sujeitas a várias interações

O escoamento é altamente complexo e tridimensional



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

NREL/NASA (2000)

Turbina Eólica NREL fase VI

Complexo, demorado e caro!



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

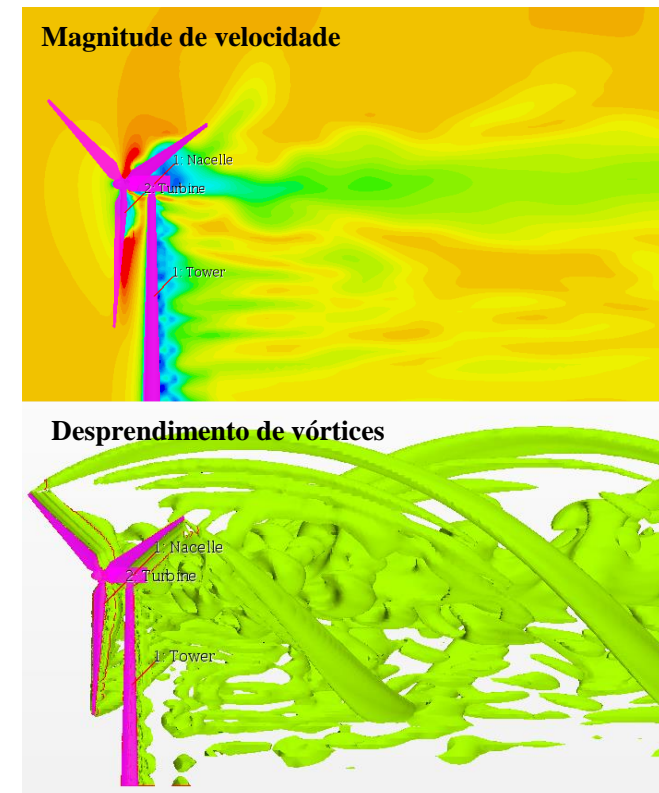
Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

- Visualizar o escoamento.
- Evitar o efeito da escala.
- Evitar altos custos e complexidade de realizar experimentos.
- **Demorado.**

CFD

BEM



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

Equações governantes são equações de Navier-Stokes

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

Equações governantes são equações de Navier-Stokes

Nível de representação da realidade

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

Equações governantes são equações de Navier-Stokes

Nível de representação da realidade

DNS

LES

URANS

- Resolve as equações transientes de Navier-Stokes
- Nenhuma modelagem é usada
- O custo computacional é demais
- Impraticável para escoamentos industriais

- Grandes vórtices são resolvidos, mas os menores são modelados
- Menos caro que o DNS, mas ainda muito caro para a maioria das aplicações

- Resolve as equações promediadas temporais de Navier-Stokes
- O efeito de turbulência é modelado usando um modelo de turbulência
- Os resultados dependem da escolha do modelo de turbulência

Introdução

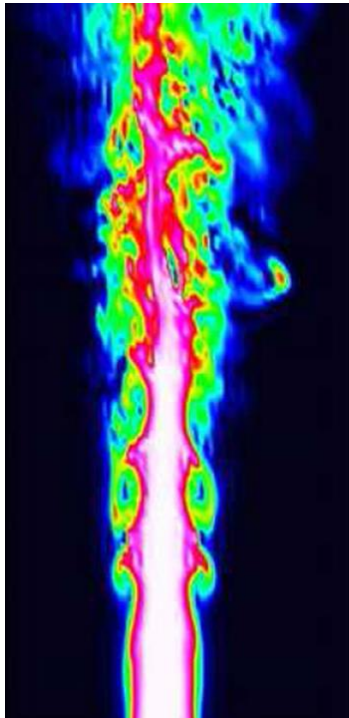
avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

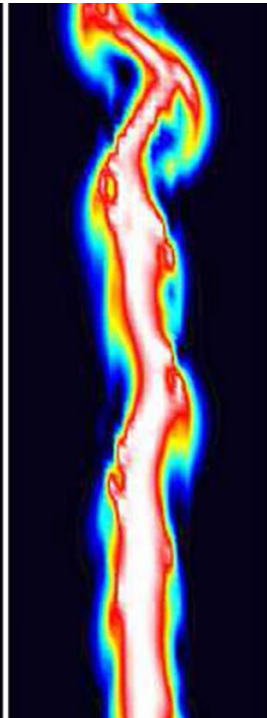
Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

DNS

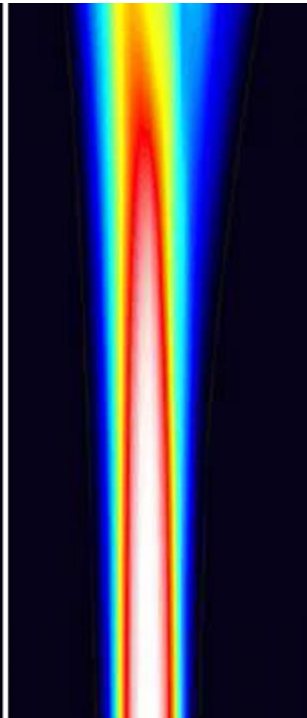


LES



CFD

URANS



BEM

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

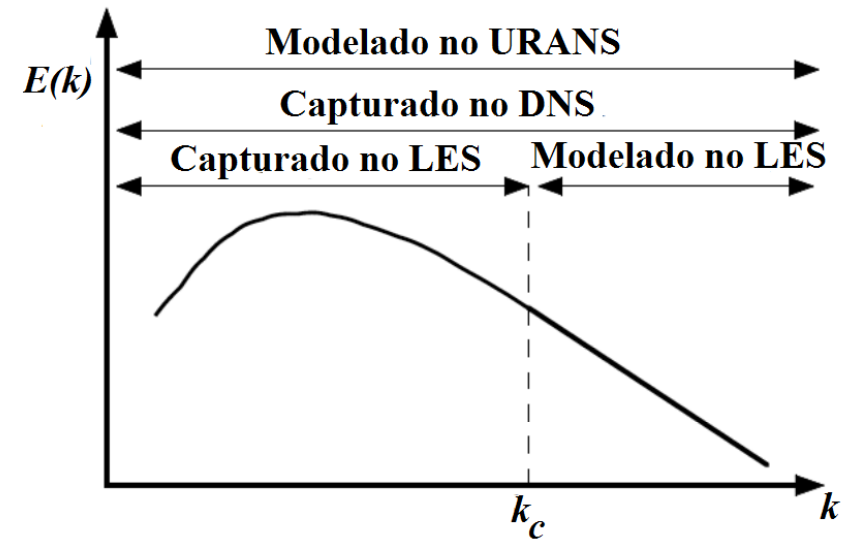
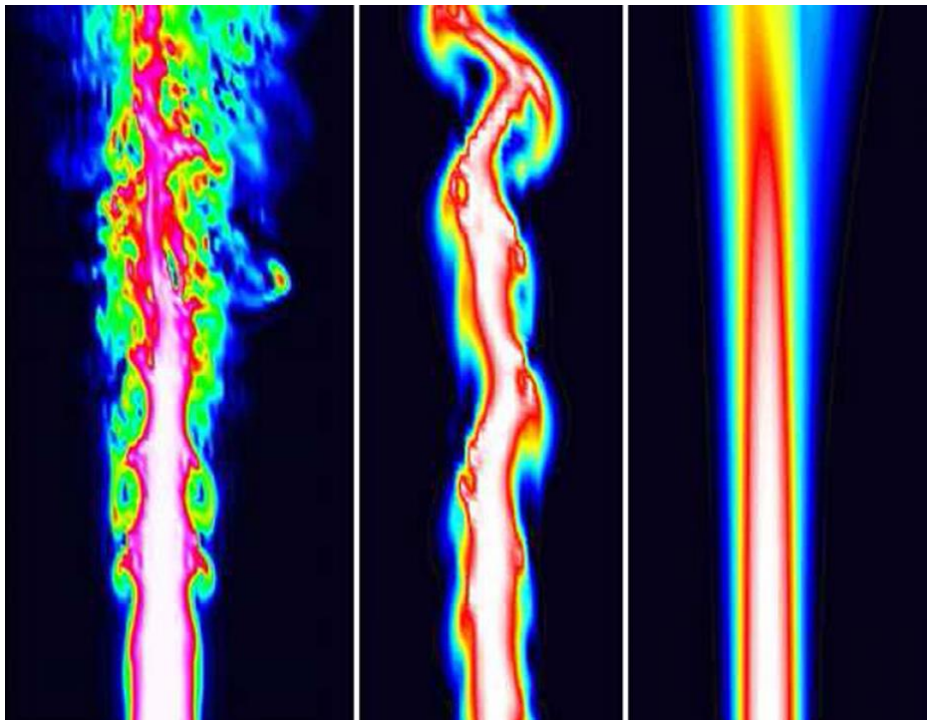
CFD

BEM

DNS

LES

URANS



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental
URANS

1. Viscosidade turbulenta linear
2. Viscosidade turbulenta não-linear
3. Modelos de Reynolds

CFD

Levando em conta a tridimensionalidade do escoamento e a anisotropia da turbulência



BEM

Aumento na
acurácia

Introdução	avaliação da aerodinâmica	Objetivos e Metodologia
------------	---------------------------	-------------------------

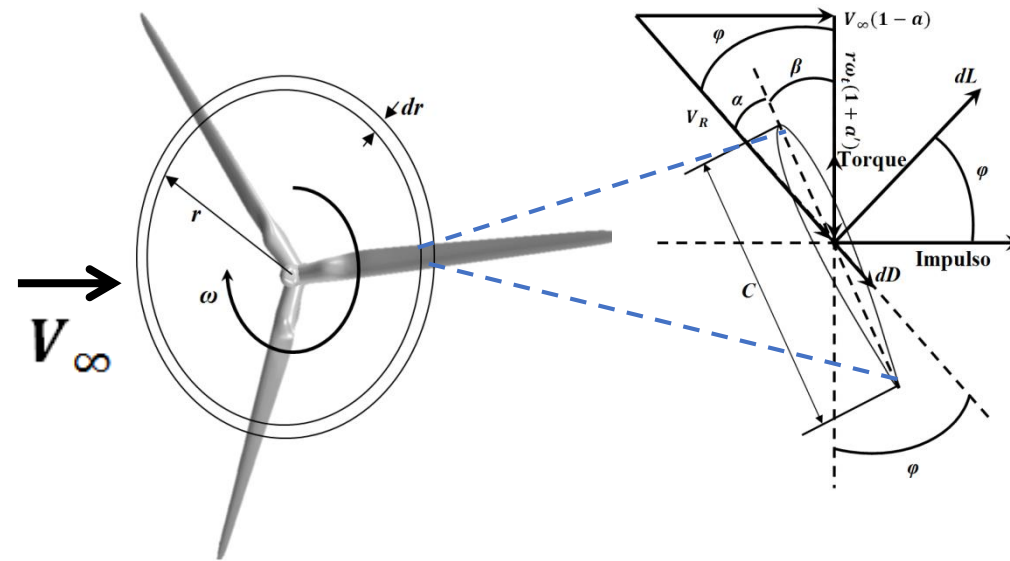
Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Experimental

CFD

BEM

Forças em elementos individuais da pá + Conservação da quantidade de movimento



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

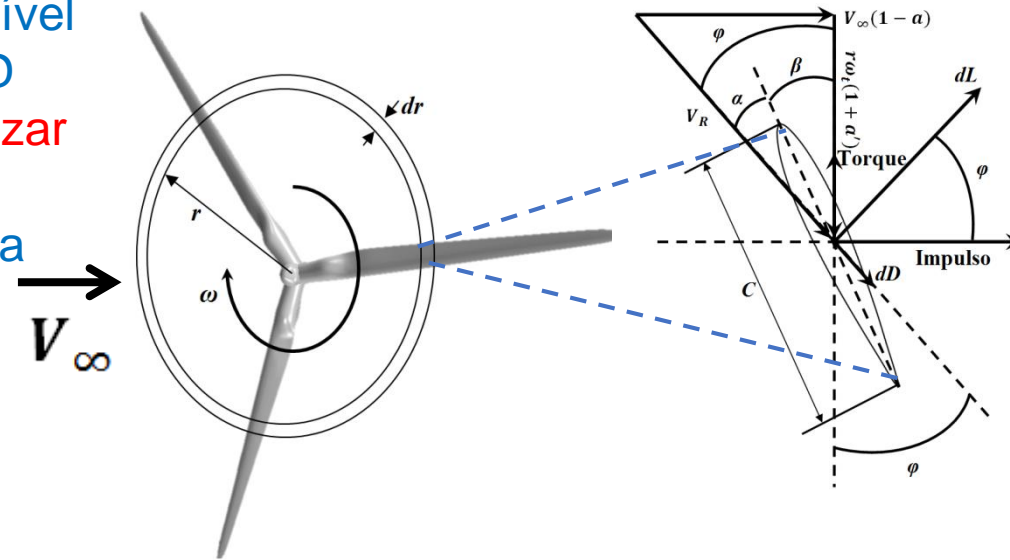
Experimental

CFD

BEM

Forças em elementos individuais da pá + Conservação da quantidade de movimento

- É o método mais popular disponível
- O escoamento é considerado 2D
- Falta de capacidade de contabilizar os efeitos 3D
- Vários corações são usadas para levar em conta os efeitos tridimensionais
- A incerteza na estimativa das cargas da pá é quase 20%
- A acurácia depende muito da disponibilidade dos dados confiáveis de aerofólio



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Métodos híbridos

Esses métodos são usados para estudar os efeitos de wake em parques eólicos para Otimização de layout.

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Métodos híbridos

Esses métodos são usados para estudar os efeitos de wake em parques eólicos para Otimização de layout.

URANS + LES (DES)

CFD + BEM

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

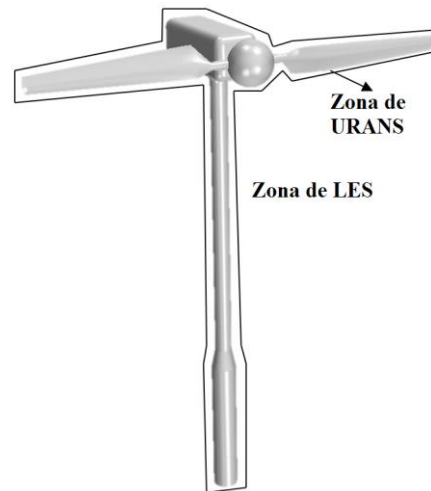
Objetivos e
Metodologia

Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Métodos híbridos

Esses métodos são usados para estudar os efeitos de wake em parques eólicos para Otimização de layout.

URANS + LES (DES)

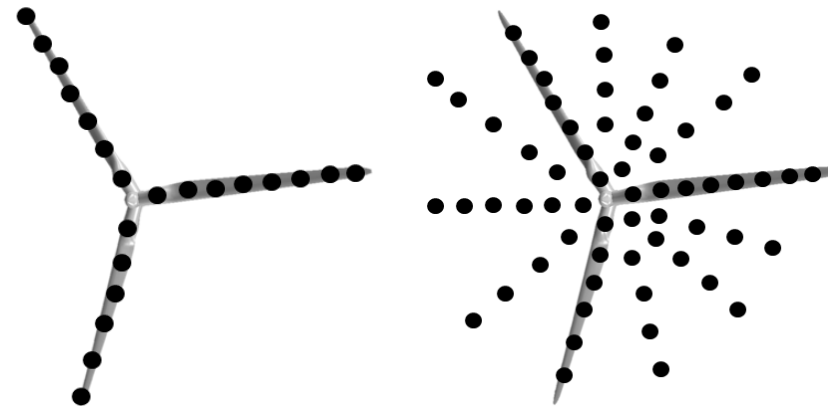


O modelo do URANS afeta a acurácia e robustez

CFD + BEM

linha de atuador (AL)

Disco de atuador (AD)



Dependem dos dados de aerofólio

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

Objetivos e
Metodologia

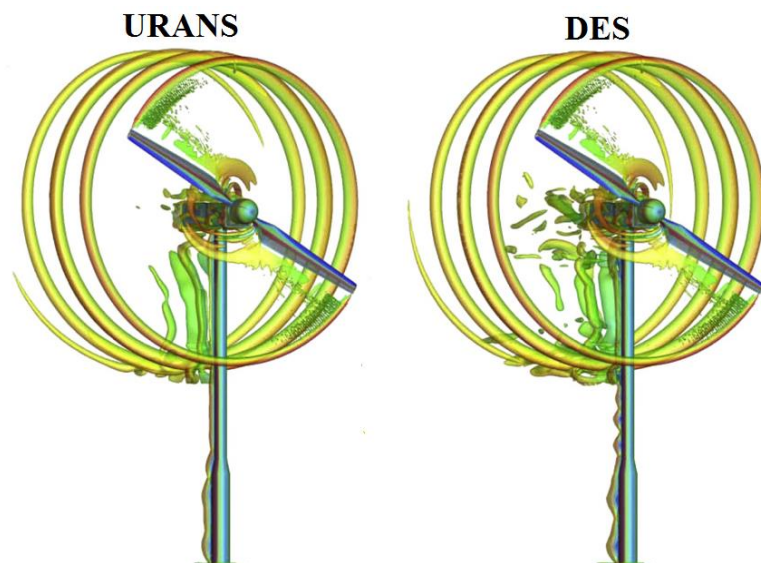
Métodos para avaliar a aerodinâmica das turbinas eólicas

Métodos híbridos

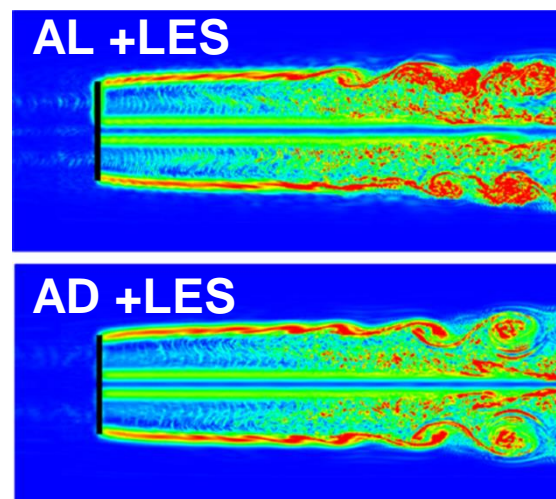
Esses métodos são usados para estudar os efeitos de wake em parques eólicos para Otimização de layout.

URANS + LES (DES)

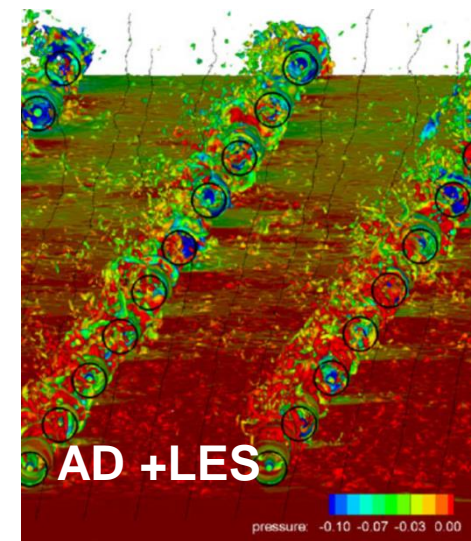
CFD + BEM



Uma turbina eólica



Parque eólico



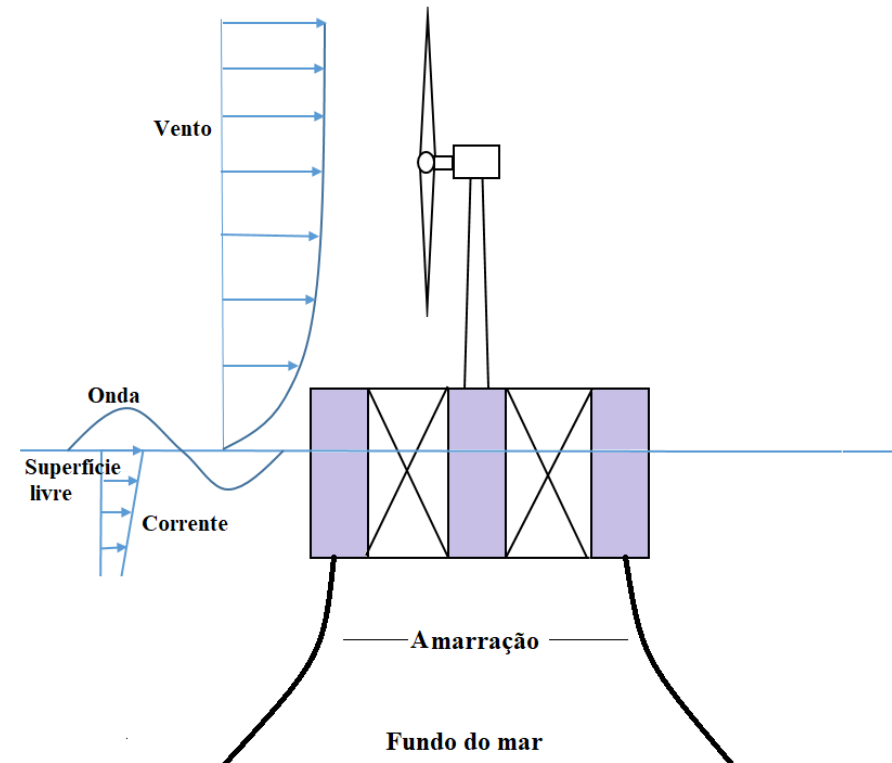
Objetivos

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**

Desenvolvimento de um modelo do CFD para avaliar a interação hidro-aerodinâmica devida as cargas acopladas de onda-corrente-vento nas turbinas eólicas offshores flutuantes



Objetivos

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**

Simulações do CFD sobre a interação hidro-aerodinâmica das turbinas eólicas offshores flutuantes

Objetivos

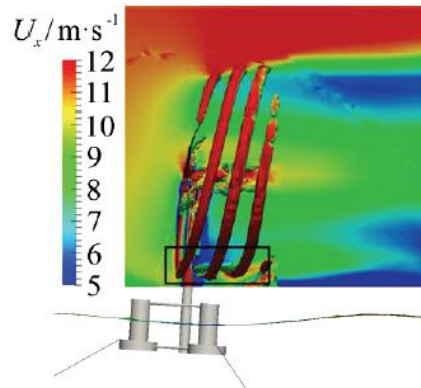
Introdução

avaliação da
aerodinâmica

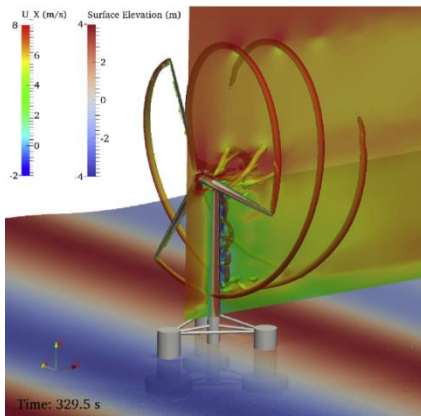
**Objetivos e
Metodologia**

Simulações do CFD sobre a interação hidro-aerodinâmica das turbinas eólicas offshores flutuantes

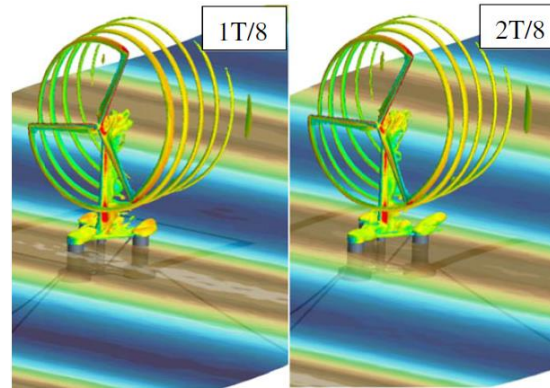
Y. Liu and Q. Xiao (2019)



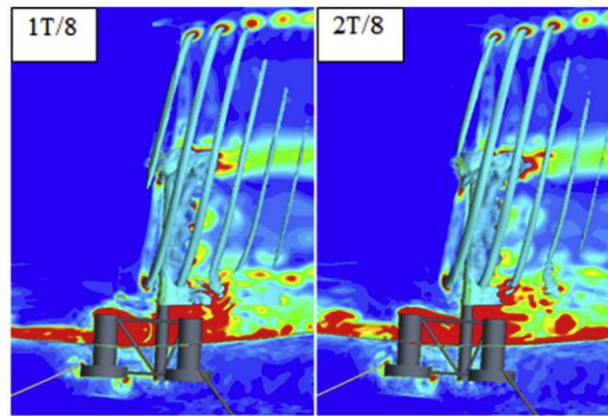
Y. Liu et al. (2017)



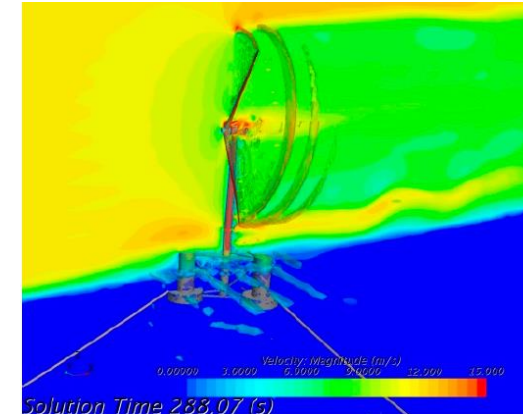
T. Tran and D. Kim (2018)



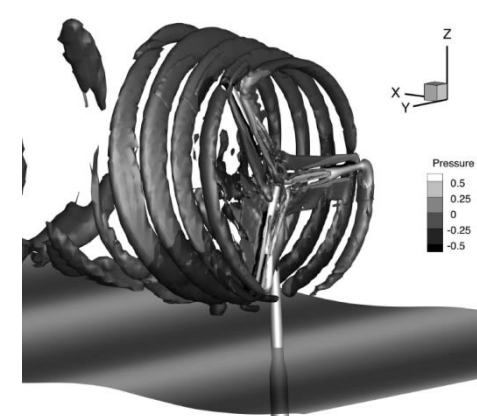
T. Tran and D. Kim (2016)



Y. Zhang and B. Kim (2018)

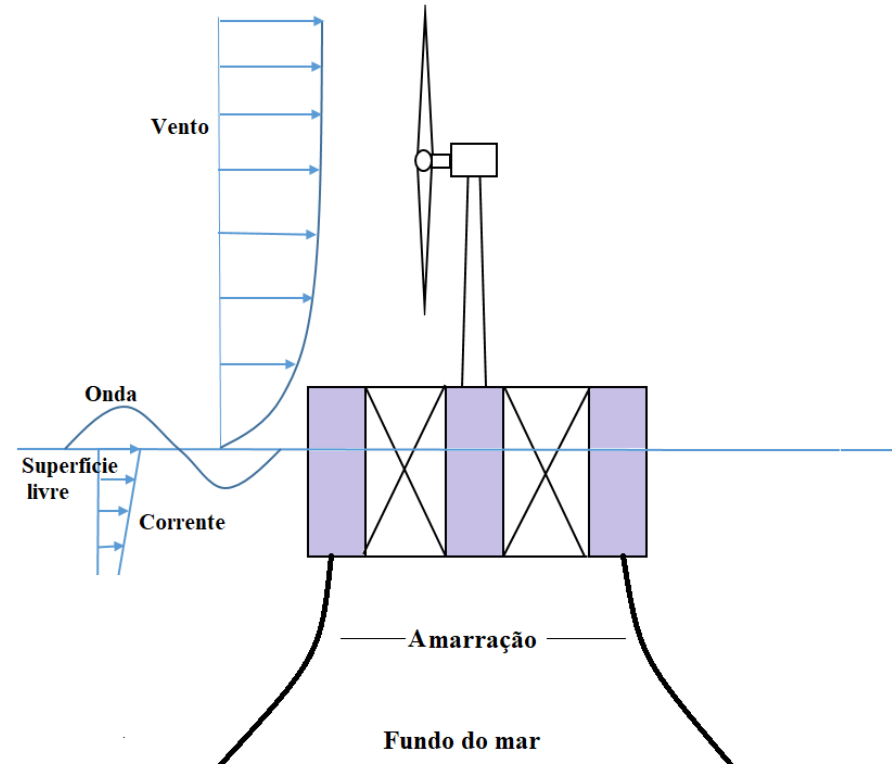


S. Quallen et al. (2014)



Metodologia

Introdução	avaliação da aerodinâmica	Objetivos e Metodologia
------------	---------------------------	--------------------------------



Introdução

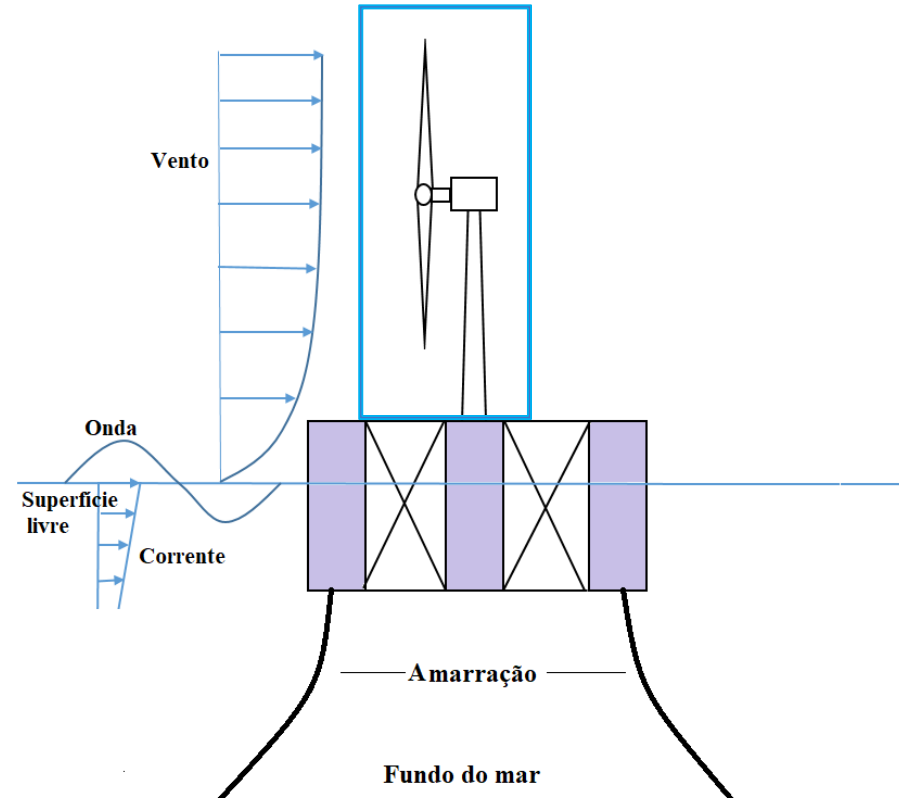
avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**

Metodologia

Simulações Aerodinâmicas

Turbina eólica



Metodologia

Simulações Aerodinâmicas

Turbina eólica

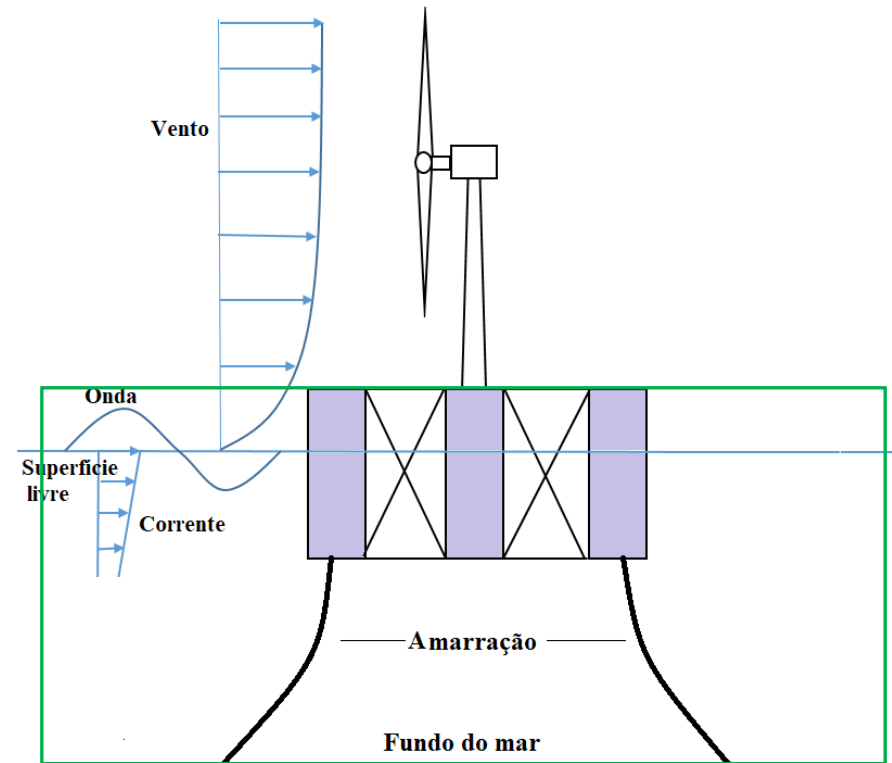
Simulações Hidrodinâmicas

semi-submersível + amarração

Introdução

avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**

Simulações Aerodinâmicas

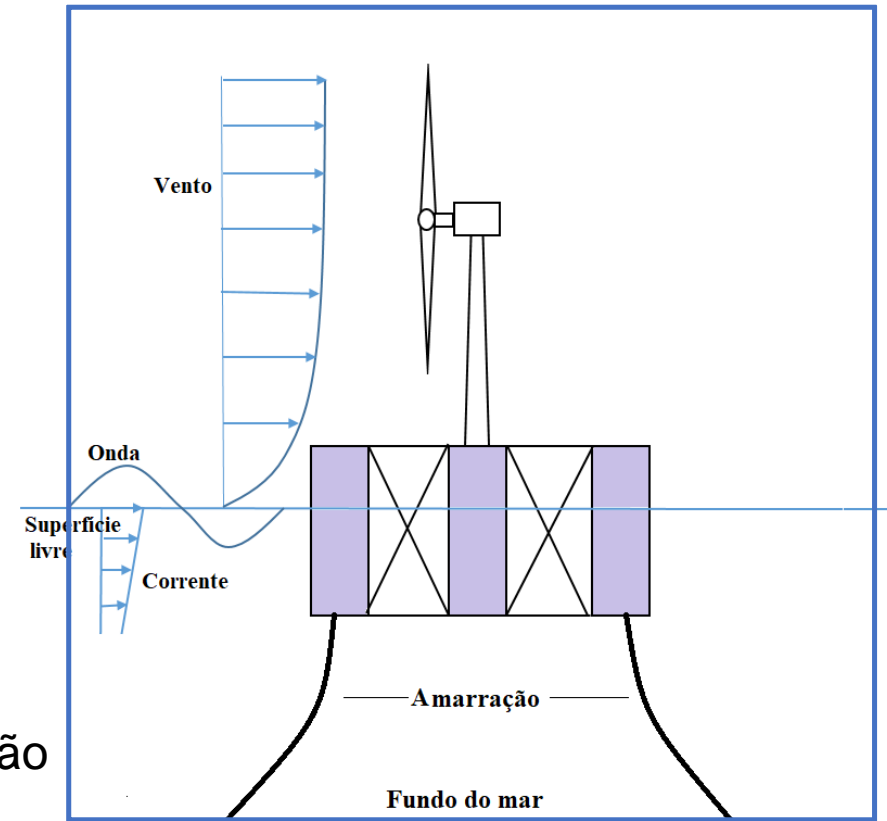
Turbina eólica

Simulações Hidrodinâmicas

semi-submersível + amarração

Simulações Hidro-aerodinâmicas

Turbina eólica + semi-submersível + amarração



Introdução

avaliação da
aerodinâmica

**Objetivos e
Metodologia**

Simulações Aerodinâmicas

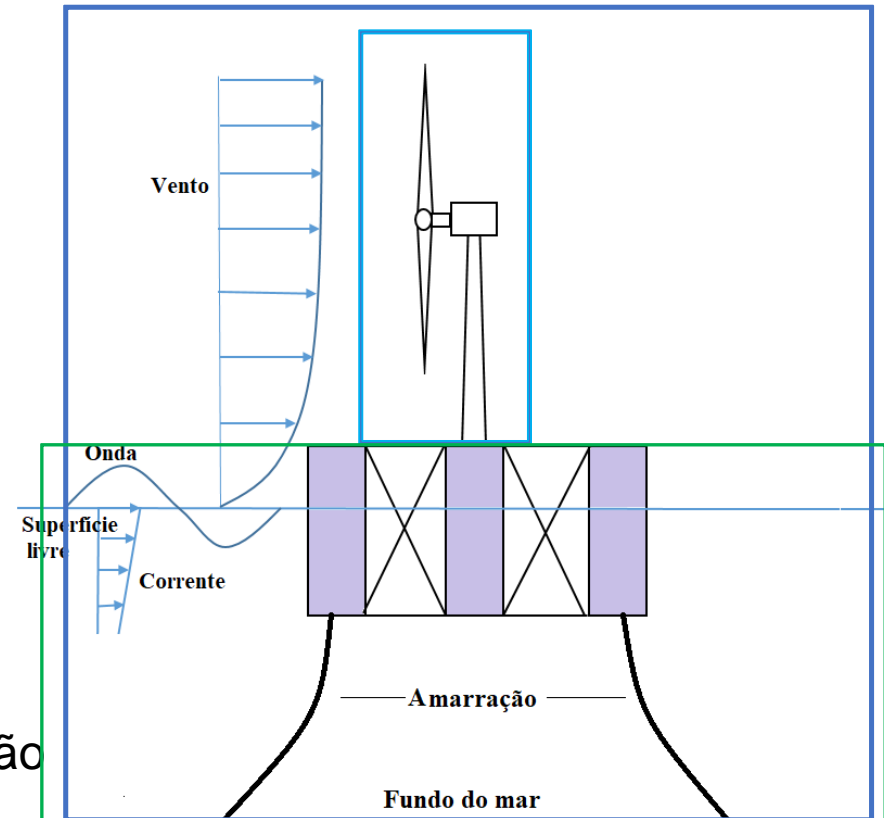
Turbina eólica

Simulações Hidrodinâmicas

semi-submersível + amarração

Simulações Hidro-aerodinâmicas

Turbina eólica + semi-submersível + amarração



Numero mínimo de células +
tamanho do passo de tempo +
um modelo de turbulência adequado (Modelos não lineares ou
modelos de Reynolds)

Obrigado!