



# Universidade Federal do Maranhão

## Instituto de Energia Elétrica



### *Estudo do desempenho da geração maremotriz através de análises CFD*

---

**Aluno:** Hércules Araújo Oliveira

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Antonio de Souza Ribeiro

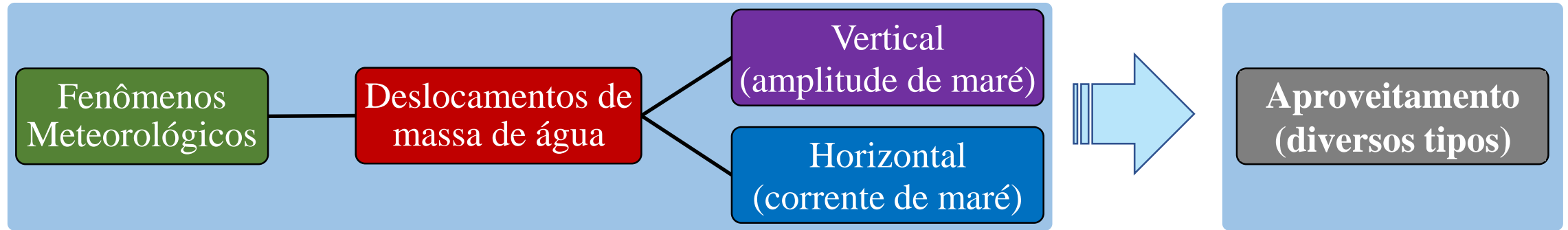
**Coorientador:** Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

# *Sumário*

- 1. Introdução**
- 2. Objetivos**
- 3. Energia Maremotriz**
- 4. Metodologia para Análise CFD**
- 5. Projeto de Rotor – Turbina de Eixo Horizontal**
- 6. Considerações Finais**

# 1. Introdução

## ➤ Energia proveniente dos mares



## ➤ Vantagens

- Maior densidade de potência se comparado à geração eólica;
- Alta previsibilidade;
- Grande potencial:



Mundial  
2.10<sup>3</sup> TWh/ano



Maranhão  
39 TWh/ano

## 2. *Objetivos*

### ➤ **Geral**

- Identificar e analisar fatores que influenciam a eficiência de uma usina de corrente de maré, para desenvolver uma modelagem integrada que permita a extração da máxima produção de potência.

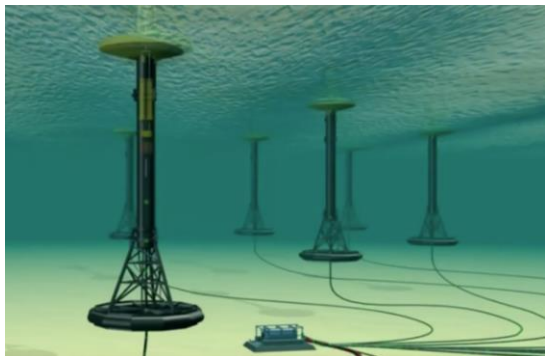
### ➤ **Específicos**

- Estabelecer modelos de turbinas para análises fluidodinâmicas;
- Estudar a influência da disposição física entre turbinas;
- Analisar a influência do tipo de escoamento;
- Realizar simulações no Ansys – CFD.

# 3. Energia Maremotriz

## ➤ Tipos de aproveitamento

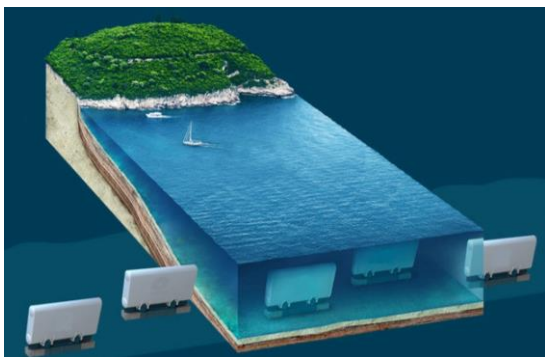
### Ondas



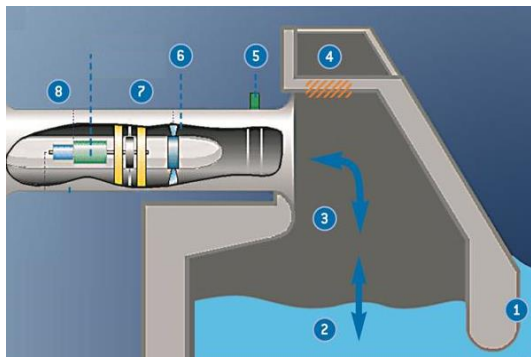
Powerbuoy



Pelamis

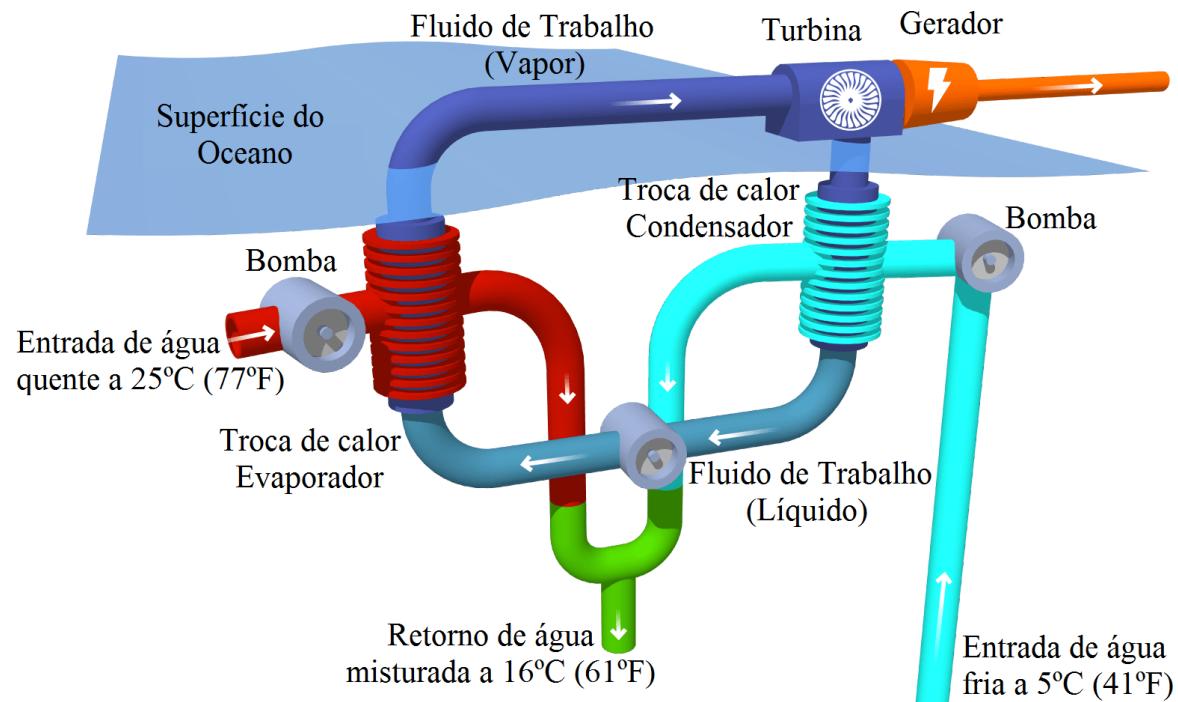


Waveroller



Oscillating water column

### Térmicas Oceânicas



### 3. *Energia Maremotriz*

#### ➤ Tipos de aproveitamento

Gradiente de Maré

#### ➤ Funcionamento

- Efeito simples;
- Efeito duplo;
- Alternado.

#### ➤ Vantagens

- Alta previsibilidade;
- Similaridade com turbinas de baixa queda.

#### ➤ Desvantagens

- Alto investimento;
- Poucas regiões propícias no mundo;
- Geração intermitente;
- Acúmulo de sedimentos nos reservatórios.

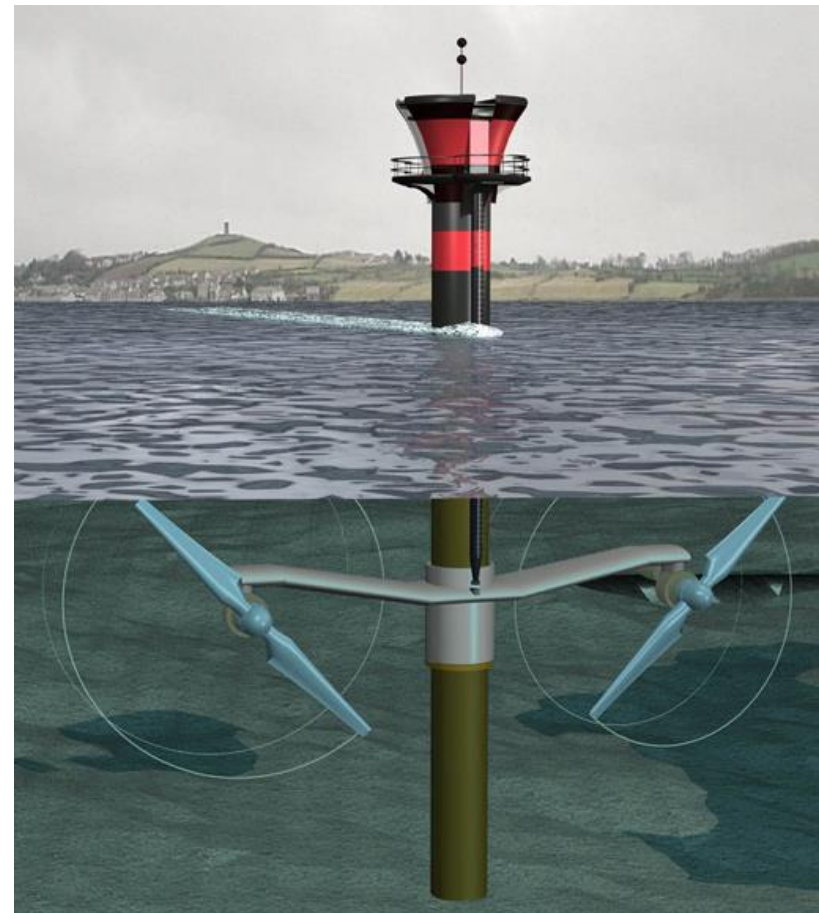


## 3. Energia Maremotriz

### ➤ Tipos de aproveitamento

Correntes (marés/oceânicas)

- Princípio de geração semelhante à eólica;
- Turbinas hidrocinéticas;
- Maior densidade de potência.



## 3. Energia Maremotriz

### ➤ Correntes de marés – Tipos de turbinas

#### Eixo Vertical

##### ➤ Vantagens

- Manutenção mais fácil;
- Indepe de da direção do fluido;
- Simplicidade da geometria de lâmina.

##### ➤ Desvantagens

- Maior oscilação do torque;
- Propensa a vibração mecânica;
- Baixo conjugado de partida;
- Limitada para regulação de potências em altas velocidades do fluido;
- Menor eficiência.



#### Eixo Horizontal

##### ➤ Vantagens

- Força de sustentação uniforme;
- Alto conjugado de partida;
- Maior eficiência;
- Regulação de potência em altas velocidades do fluido;
- Compatível com difusor.

##### ➤ Desvantagens

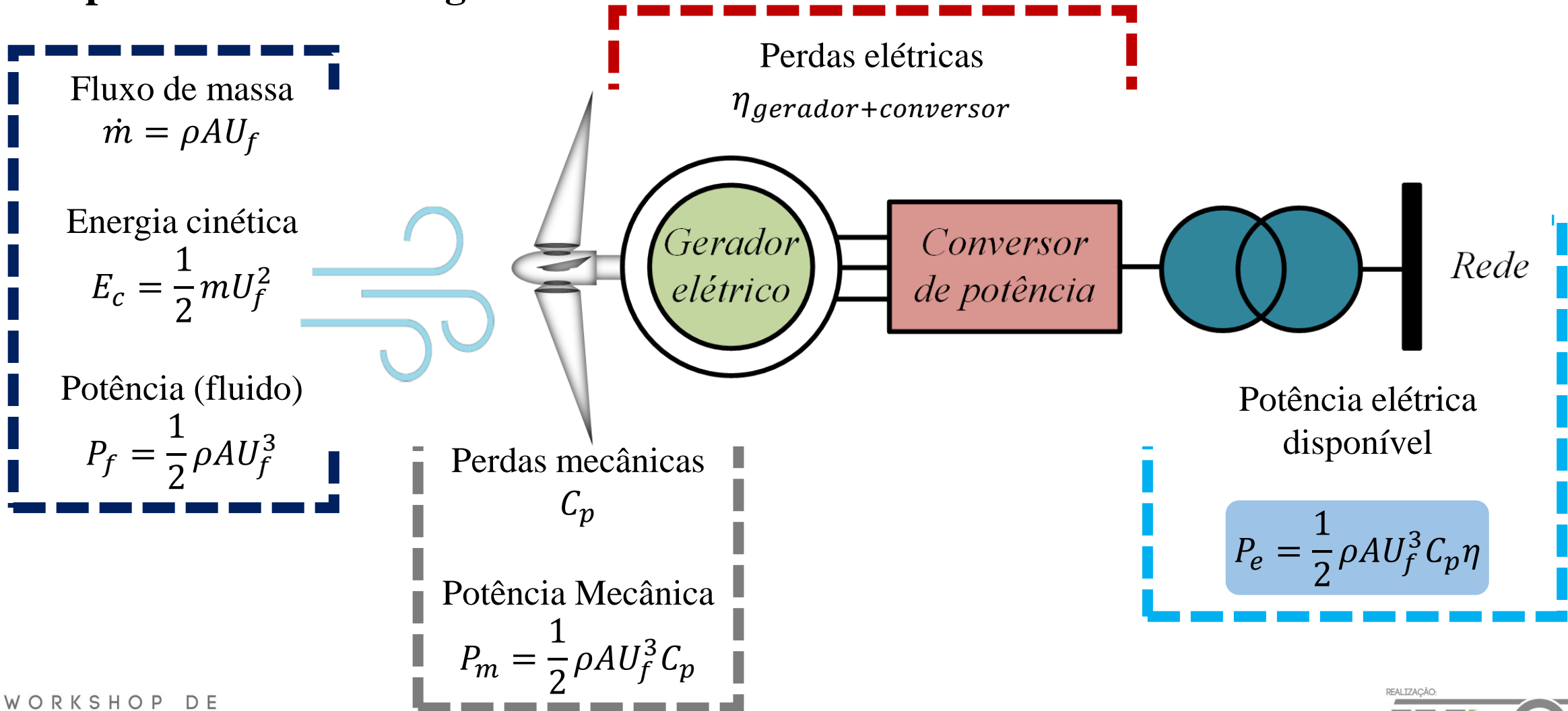
- Maior custo de fabricação;
- Dificuldade com instalação e manutenção do gerador.





### 3. Energia Maremotriz

#### ➤ Aproveitamento energético



### 3. Energia Maremotriz

#### ➤ Coeficiente de potência

- Lei da conservação: massa, energia e momento.

$$\dot{m} = \rho A U_f$$

$$\rho A_1 U_{f_1} = \rho A_2 U_{f_2} = \dots = \rho A_n U_{f_n}$$

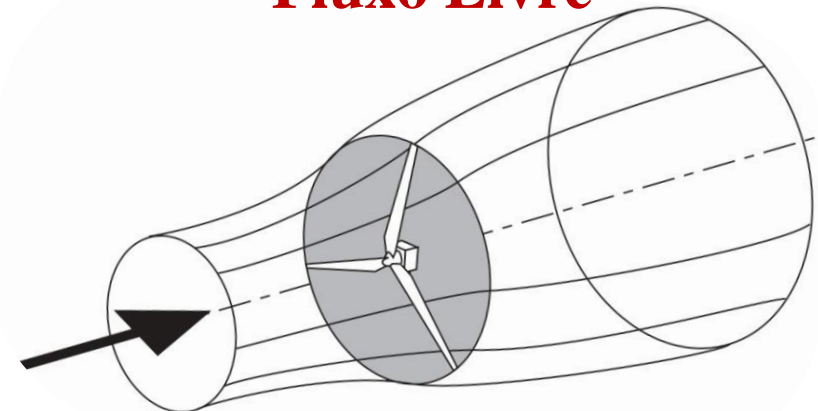
$$\rho = \text{constante}$$

$$A_1 U_{f_1} = A_2 U_{f_2} \rightarrow \uparrow A_n \downarrow U_{f_n}$$

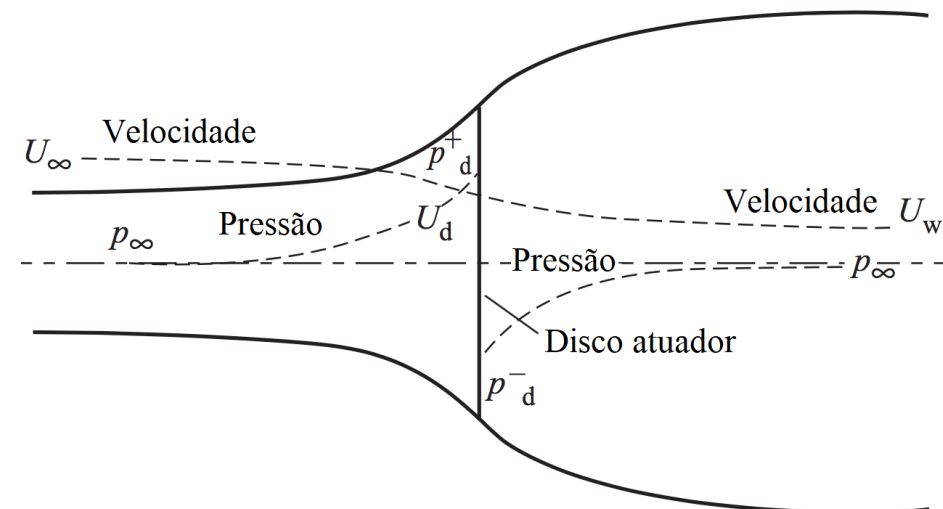
- Fluido incompressível (Mach menor que 0,3).

$$\left( M = \frac{V}{c} \right)$$

#### Fluxo Livre

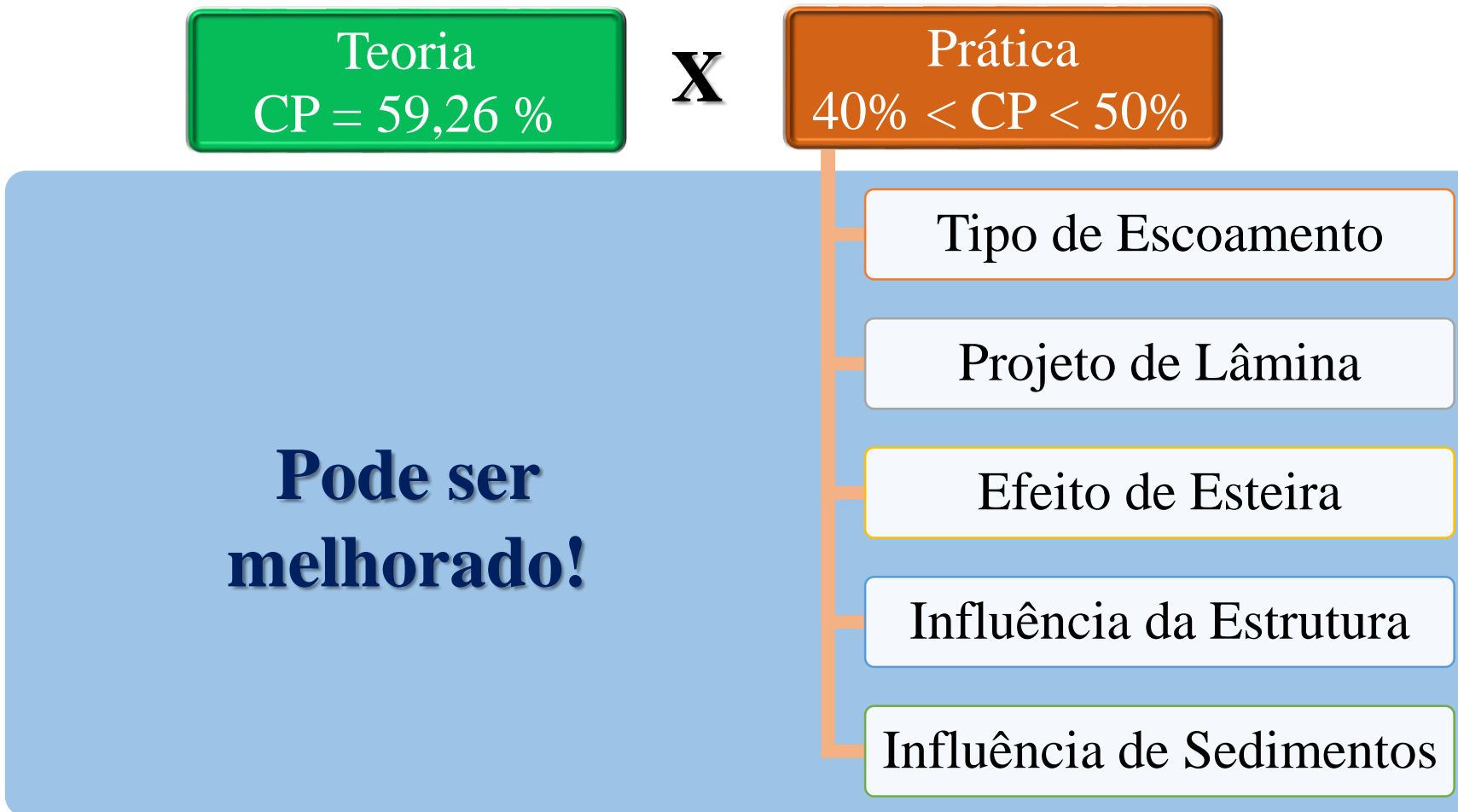


**Limite de Betz  $C_p = 59,26\%$**

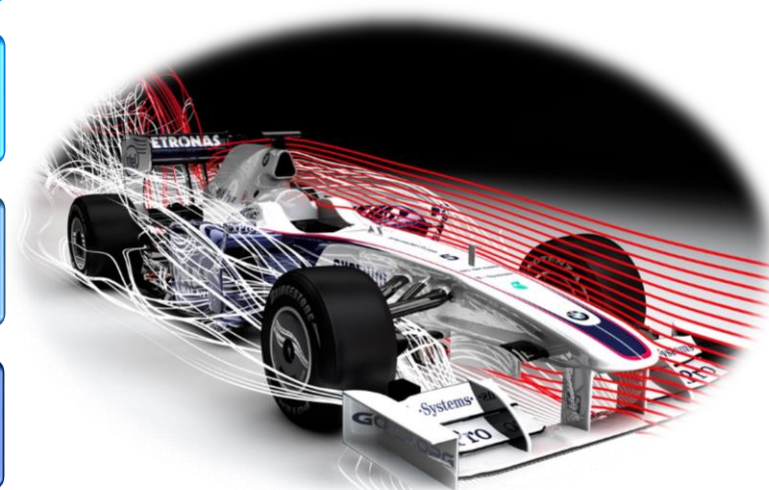
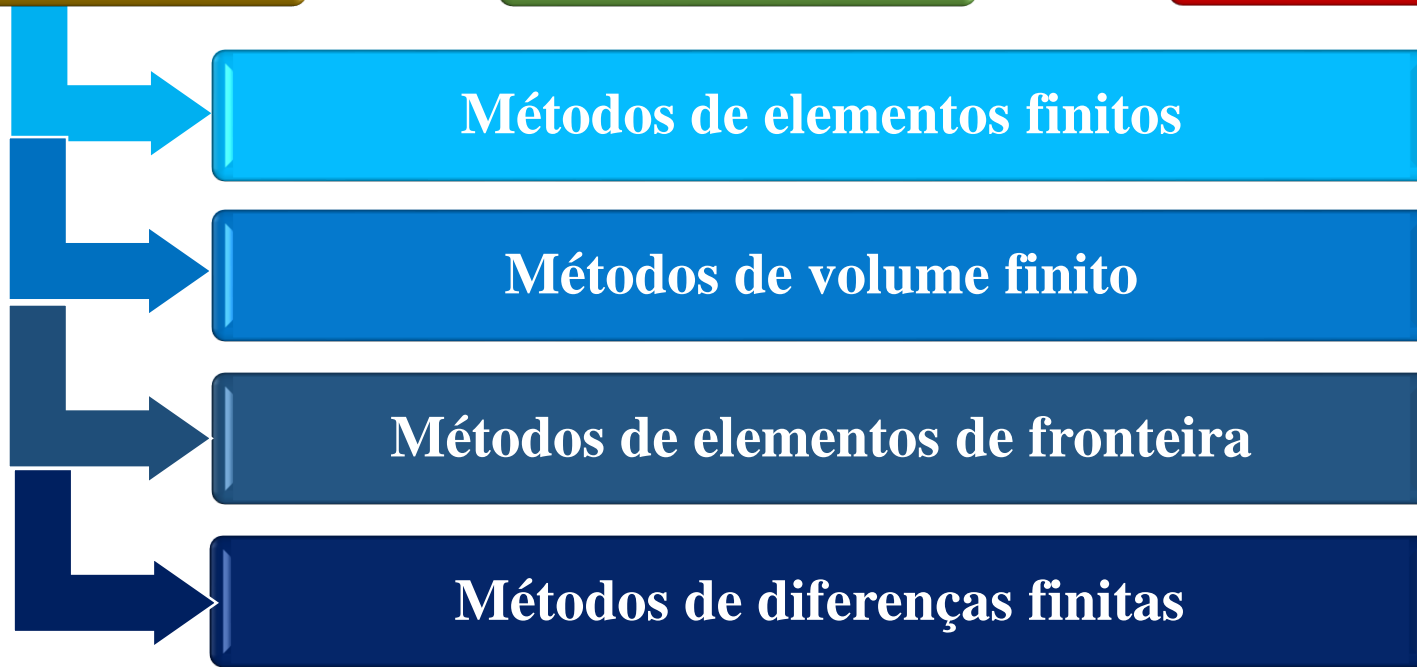


### 3. Energia Maremotriz

#### ➤ Coeficiente de potência



# 4. Metodologia para Análise CFD



CFD = Equações Físicas + Métodos Numéricos (resolver as equações) + Computador (ferramenta de cálculo)

## 4. Metodologia para Análise CFD

### ➤ Ansys SpaceClaim

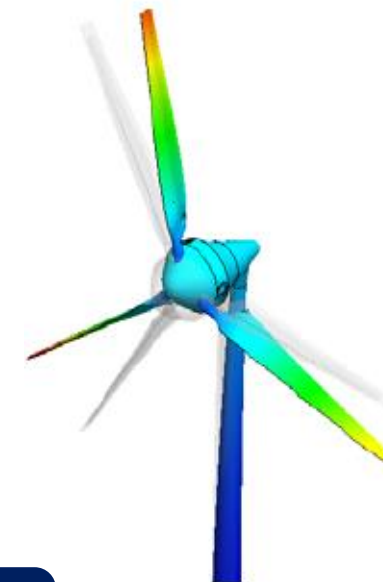
#### Modelagem Geométrica

- Geração do modelo geométrico;
- Edição e correção de problemas de geometria;
- Simplificação de geometria.

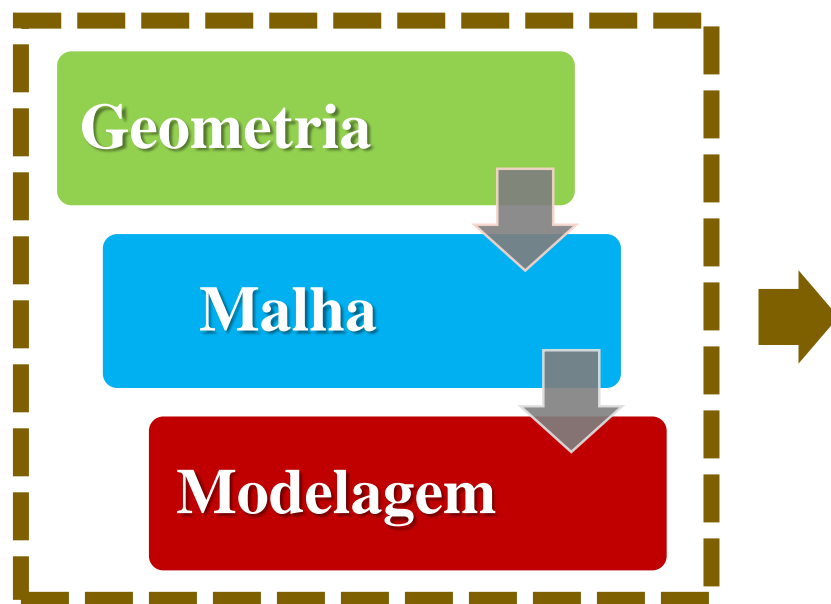
### ➤ Ansys AIM

#### Simulação CFD

- Análise por FEA;
- Análise por CFD.



#### Pré-Processamento



**Validação!!!**

## 4. Metodologia para Análise CFD

### ➤ Validação do Modelo



## 5. Projeto de Rotor – Turbina de Eixo Horizontal

### ➤ Teoria do Momento

- Axial

$$dT = 4\pi r \rho U^2 a(1-a) dr$$

- Angular

$$dQ = 4\pi r^3 \rho U \Omega a'(1-a) \pi r dr$$

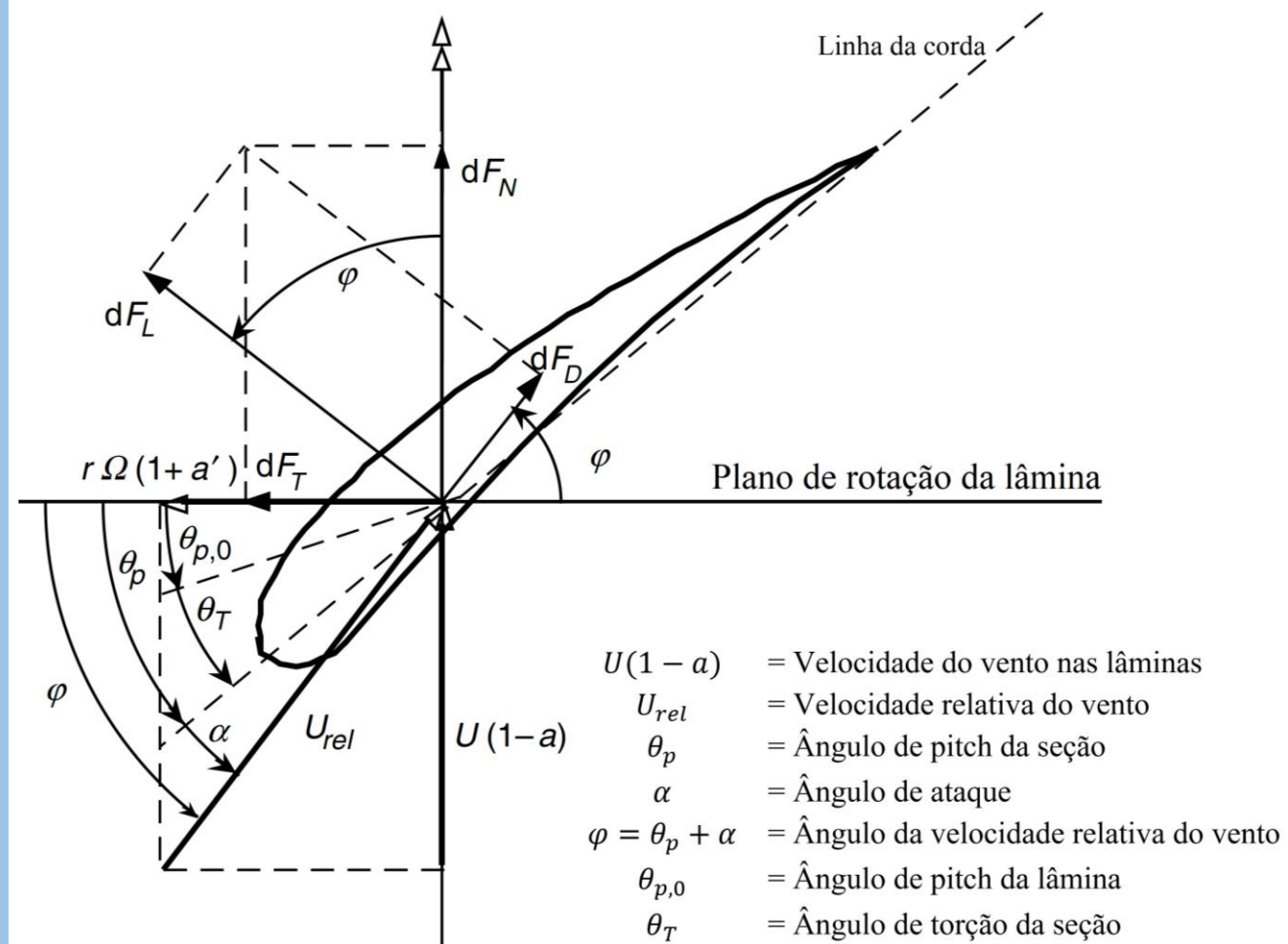
### ➤ Teoria dos Elementos de Lâmina

- Força normal

$$dF_N = \frac{1}{2} B c_p \rho \left( \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} \right) (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) dr$$

- Conjugado (força tangencial)

$$dQ = \frac{1}{2} B c_p r \left( \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} \right) (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) dr$$



## 5. Projeto de Rotor – Turbina de Eixo Horizontal

### ➤ Teoria do Momento dos Elementos de Lâmina

- Fator de indução axial

$$a \cong \left( \frac{2\pi r}{Bc} \frac{4\text{sen}^2\varphi}{C_l \cos\varphi} + 1 \right)^{-1}$$

- Fator de indução angular

$$a' \cong \left( \frac{2\pi r}{Bc} \frac{4\cos\varphi}{C_l} - 1 \right)^{-1}$$

- Coeficiente de sustentação

$$C_l \cong 4\text{sen}\varphi \frac{2\pi r (\cos\varphi - \lambda_r \text{sen}\varphi)}{Bc (\text{sen}\varphi + \lambda_r \cos\varphi)}$$

- Coeficiente de potência

$$C_p \cong \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \lambda_r^3 a' (1 - a) d\lambda_r$$

### ➤ Método de Prandtl

- Perda de ponta (fator de correção)





## 5. Projeto de Rotor – Turbina de Eixo Horizontal

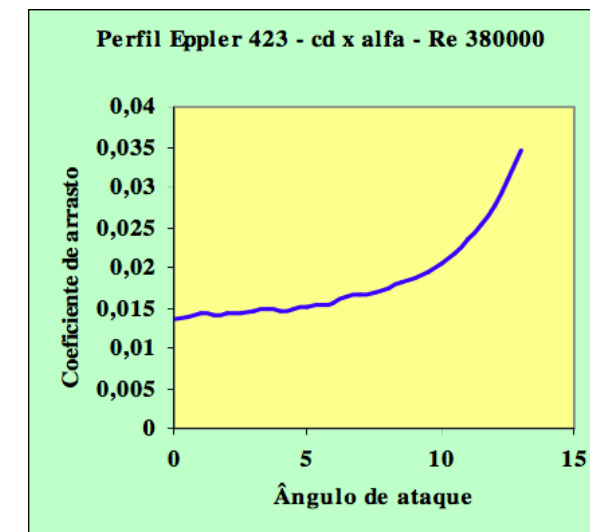
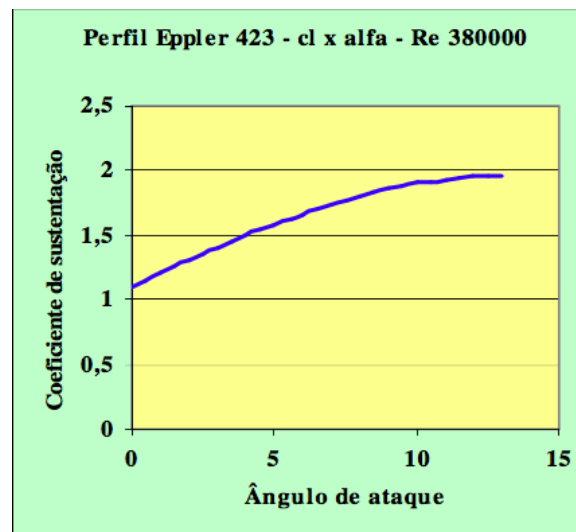
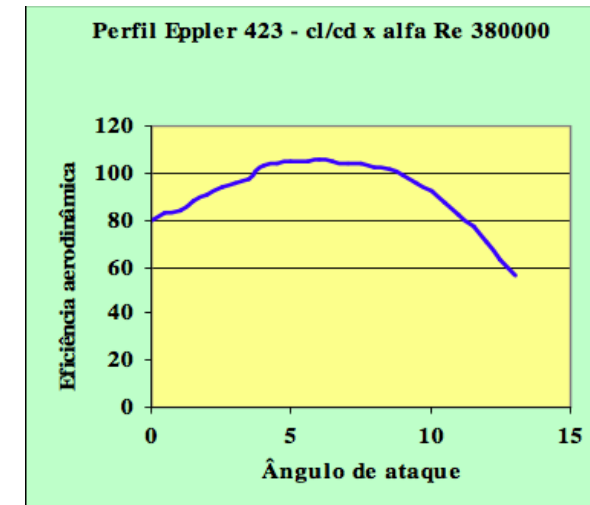
### ➤ Procedimento Generalizado

- Determinar os parâmetros básicos do rotor

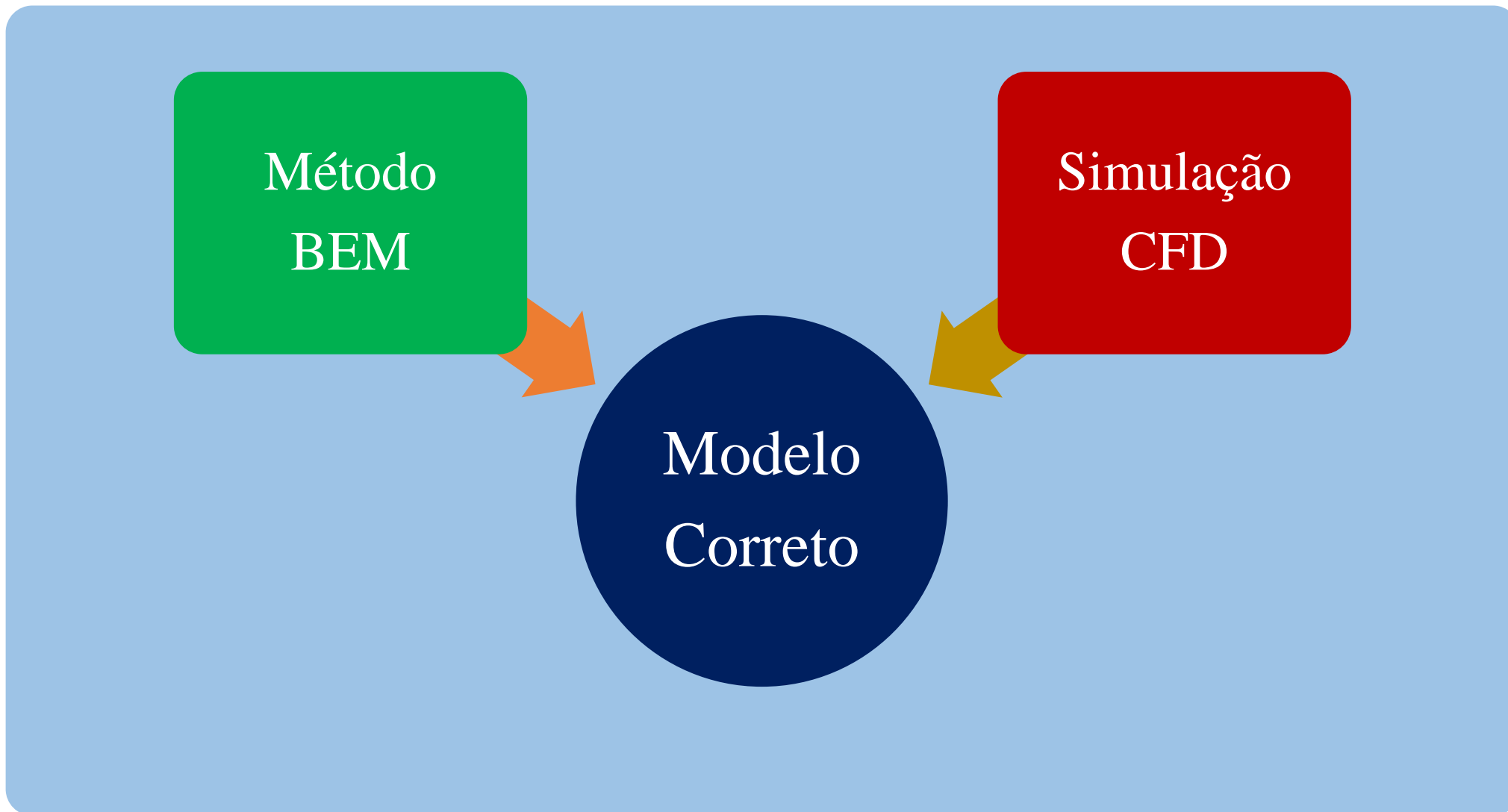
$$P_e = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_f^3 C_p \eta$$

- Determinar a relação da velocidade de ponta
- Determinar o número de lâminas
- Analisar as curvas empíricas para as propriedades fluidodinâmicas do aerofólio
- Calcular os fatores de indução
- Calcular o coeficiente de potência
- Calcular o desempenho do rotor

$\lambda$	$B$
1	8–24
2	6–12
3	3–6
4	3–4
>4	1–3



## 5. Projeto de Rotor – Turbina de Eixo Horizontal



## ***6. Considerações Finais***

- **A turbina de eixo horizontal é mais adequada ao estudo de caso de aplicação do INEOF;**
- **São necessários estudos direcionados à otimização do modelo geométrico da turbina;**
- **A partir da validação do modelo geométrico, é possível se pensar em construir um protótipo.**

- **Os valores de velocidade de corrente de maré é um obstáculo a ser superado!!!**
- **A solução convencional é a utilização de Difusor.**

*Obrigado!!!*