



**UNIVERSITY OF
CALGARY**

Projeto e análise de desempenho de turbina: Eólica / Hidrocinética

Hércules A. Oliveira
Prof. Dr. David H. Wood



INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
ENERGIAS OCEÂNICAS E FLUVIAIS

SCHULICH
School of Engineering



Sumário

- Projeto
 - Introdução e objetivos

- Fase 1
 - A – Projeto da Lâmina
 - B – Desempenho do Rotor / Lâmina

- Fase 2 – Desempenho da turbina com gerador elétrico

- Fase 3 – Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência

- Conclusões parciais

- Referências

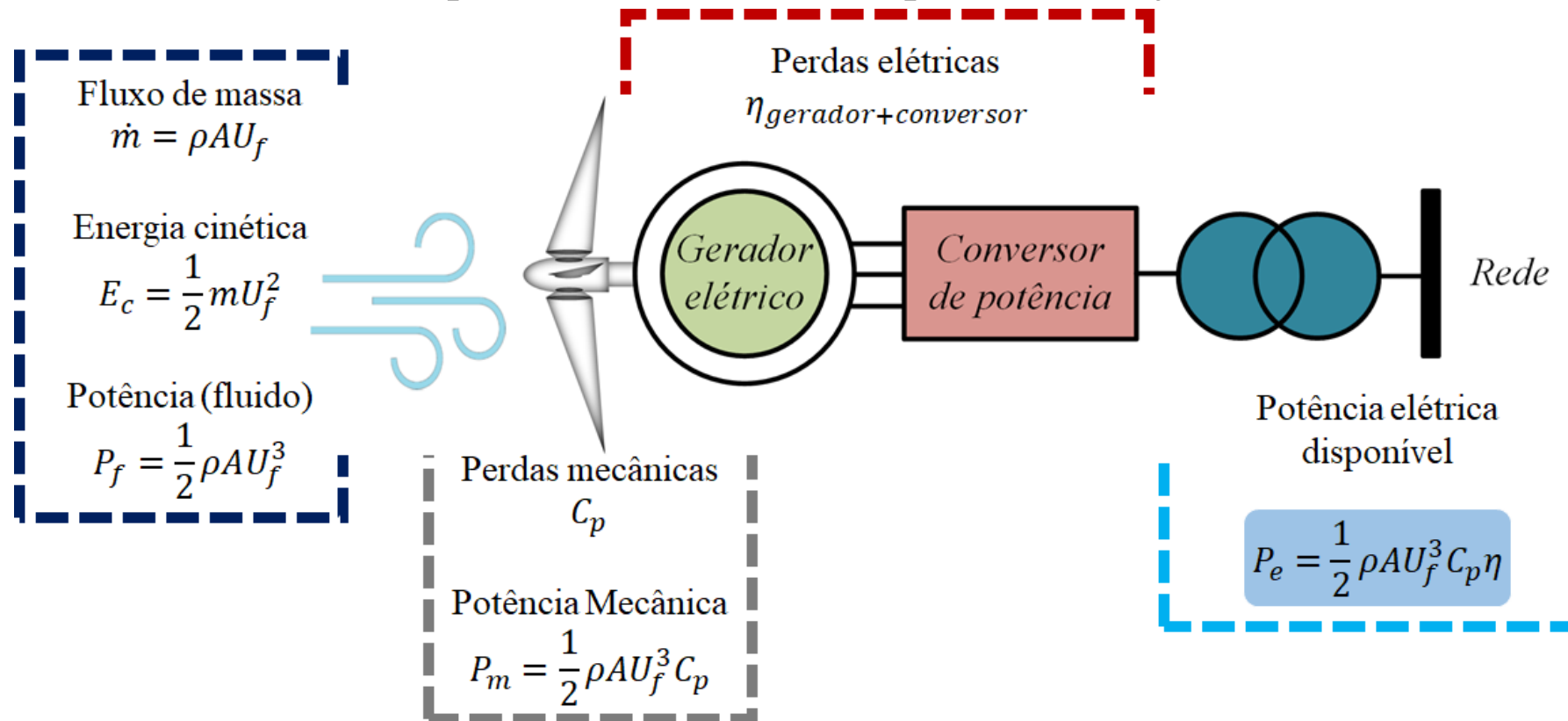
Projeto

➤ Objetivo principal

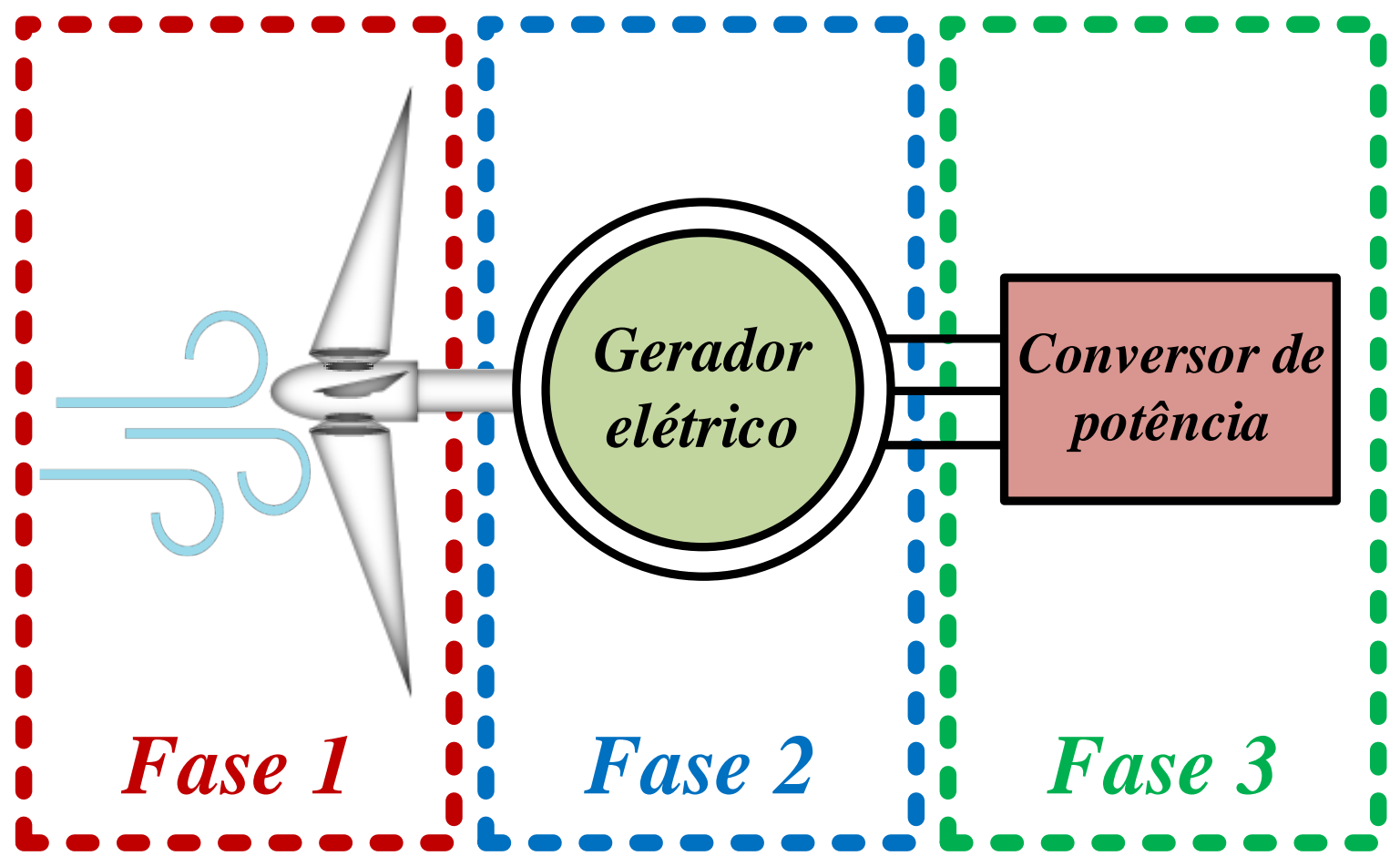
- Desenvolver um modelo integrado de turbina que permita a extração da máxima potência.

➤ Objetivos específicos

- Estudar o projeto do rotor de turbinas hidrocinéticas;
- Estudar o desempenho da interação do conjunto: turbina, gerador elétrico e conversor de potência;
- Identificar e analisar fatores que influenciam o desempenho do conjunto.



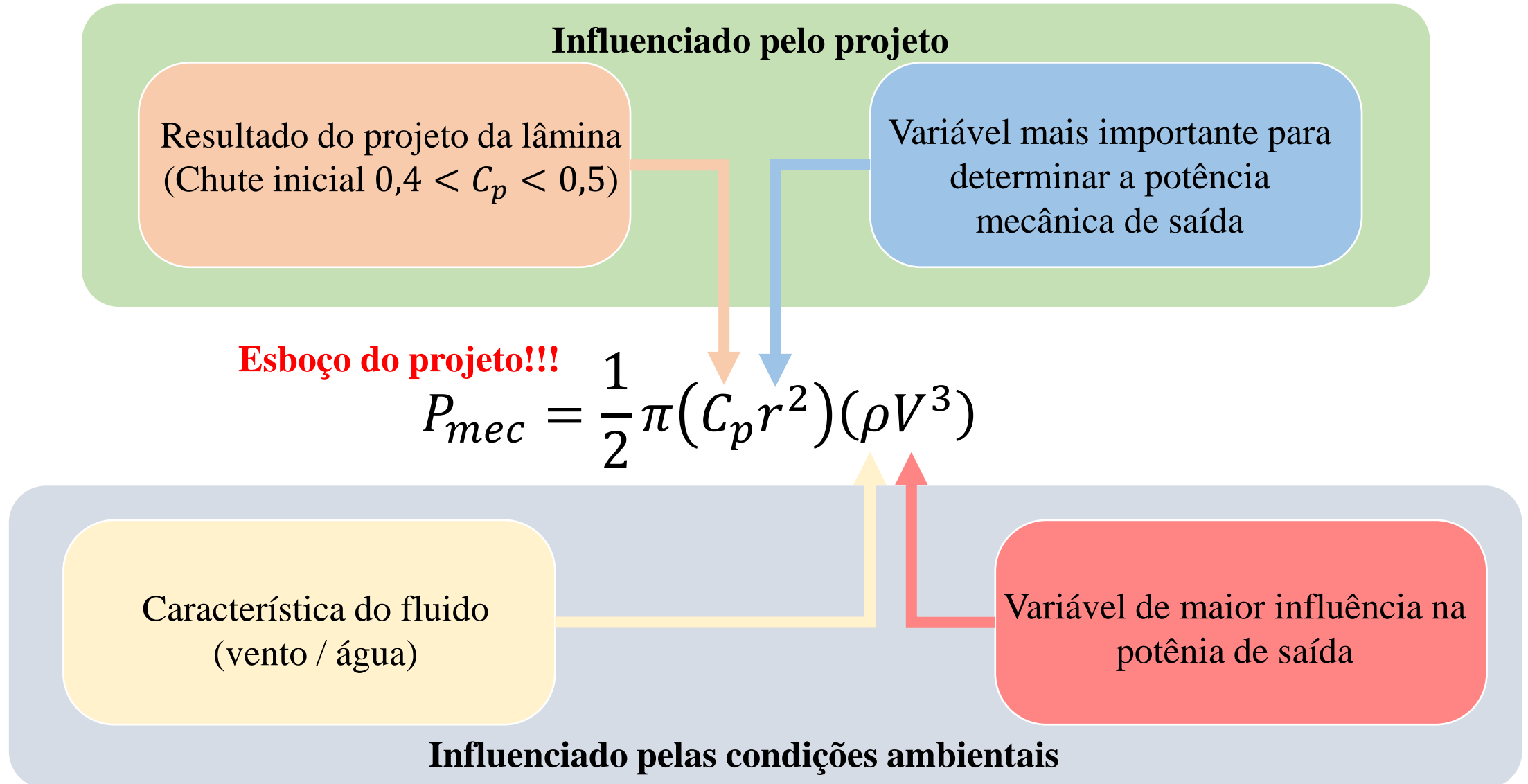
Projeto



Fase 1.A – Projeto da Lâmina

Projeto da Lâmina

- Qual a potência nominal do projeto?



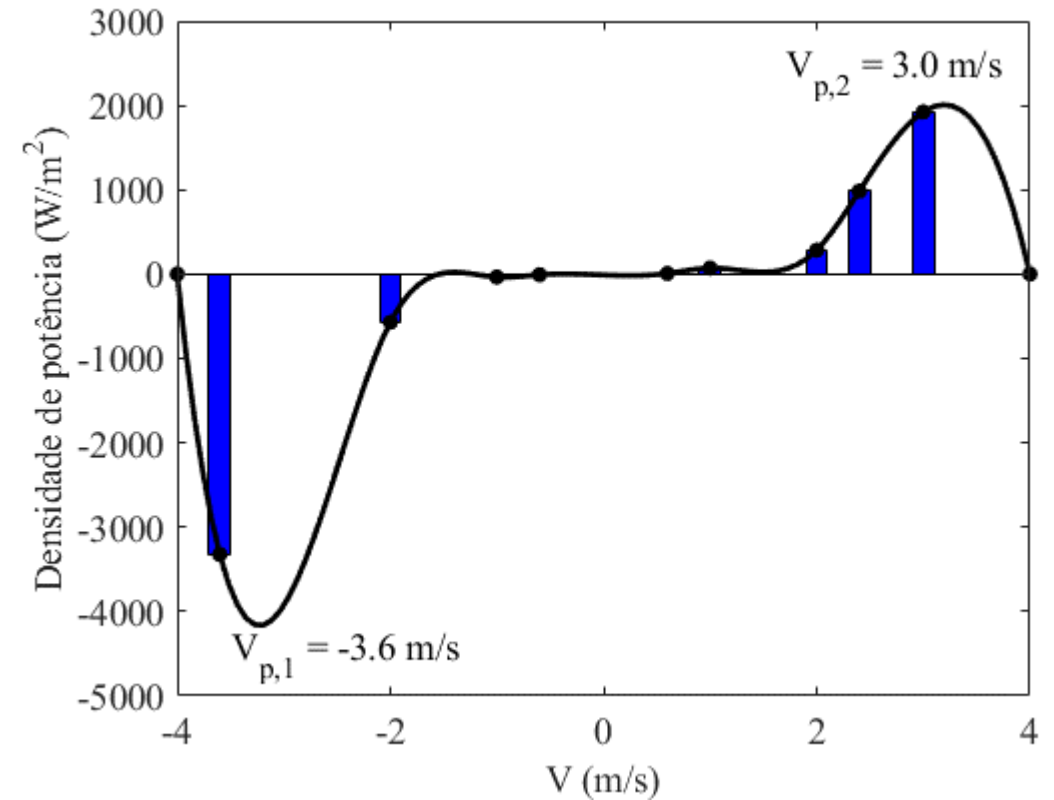
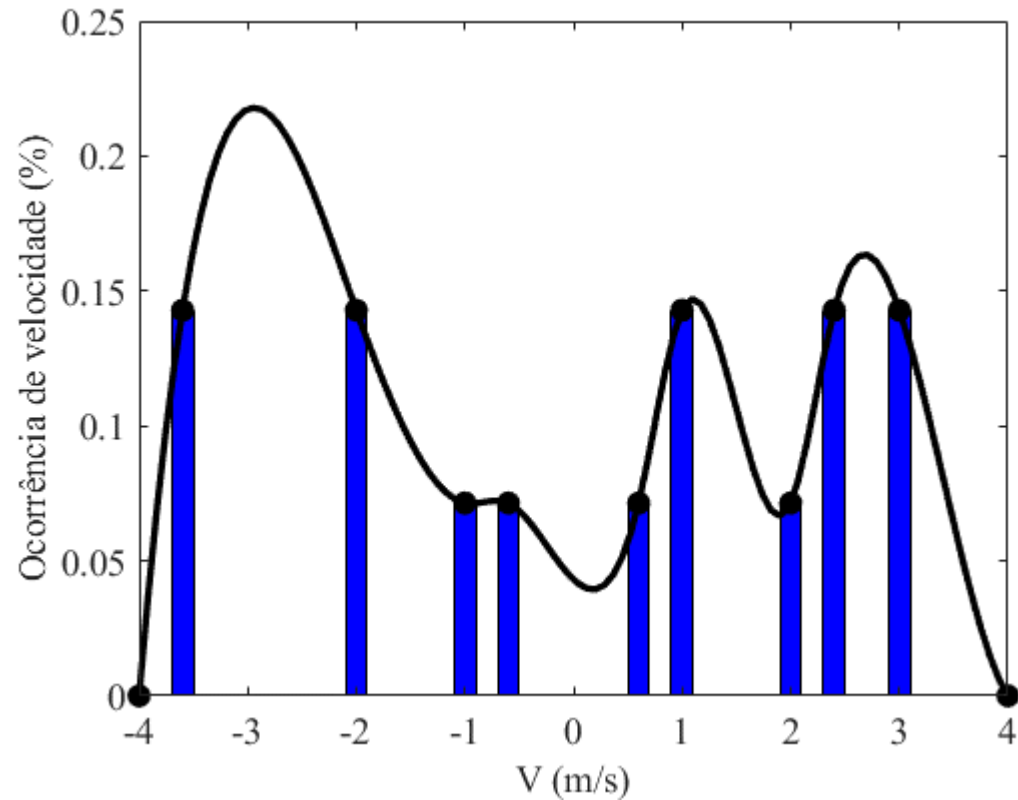
Projeto da Lâmina

➤ Escolha da velocidade do fluido para o projeto da lâmina

- Probabilidade de ocorrência de velocidade, P_o ;
- Densidade de potência, D_p .

$$P_o = \frac{\text{evento}}{\text{espaço amostral}}$$

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

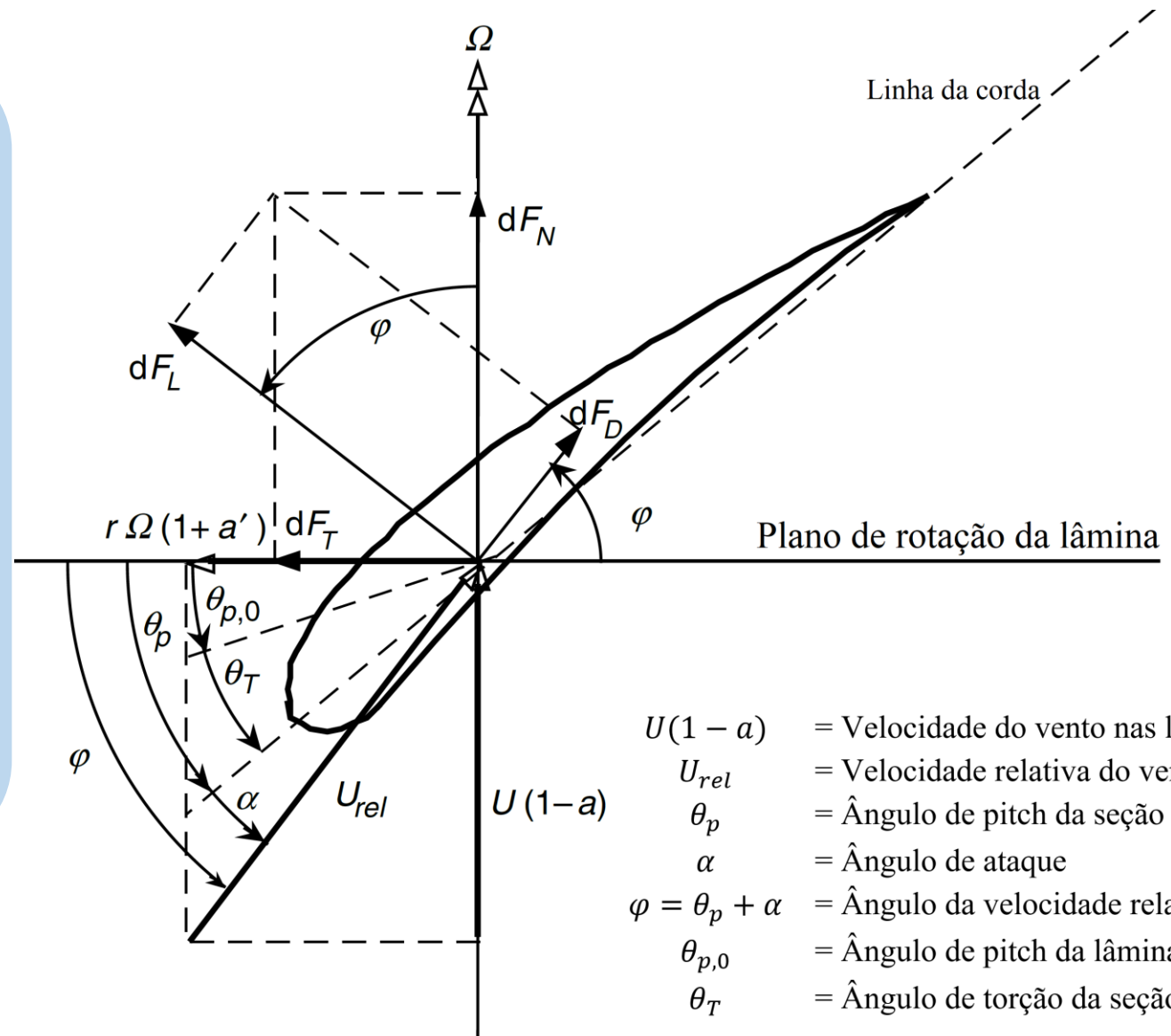


Projeto da Lâmina

➤ Conceitos básicos de aerodinâmica

- Perfil aerodinâmico;
- Escoamento laminar / turbulento;
- Força e coeficiente de sustentação;
- Força e coeficiente de arrasto;
- Número de Reynold, Re .
- Eficiência aerodinâmica do perfil;
- Corda;

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

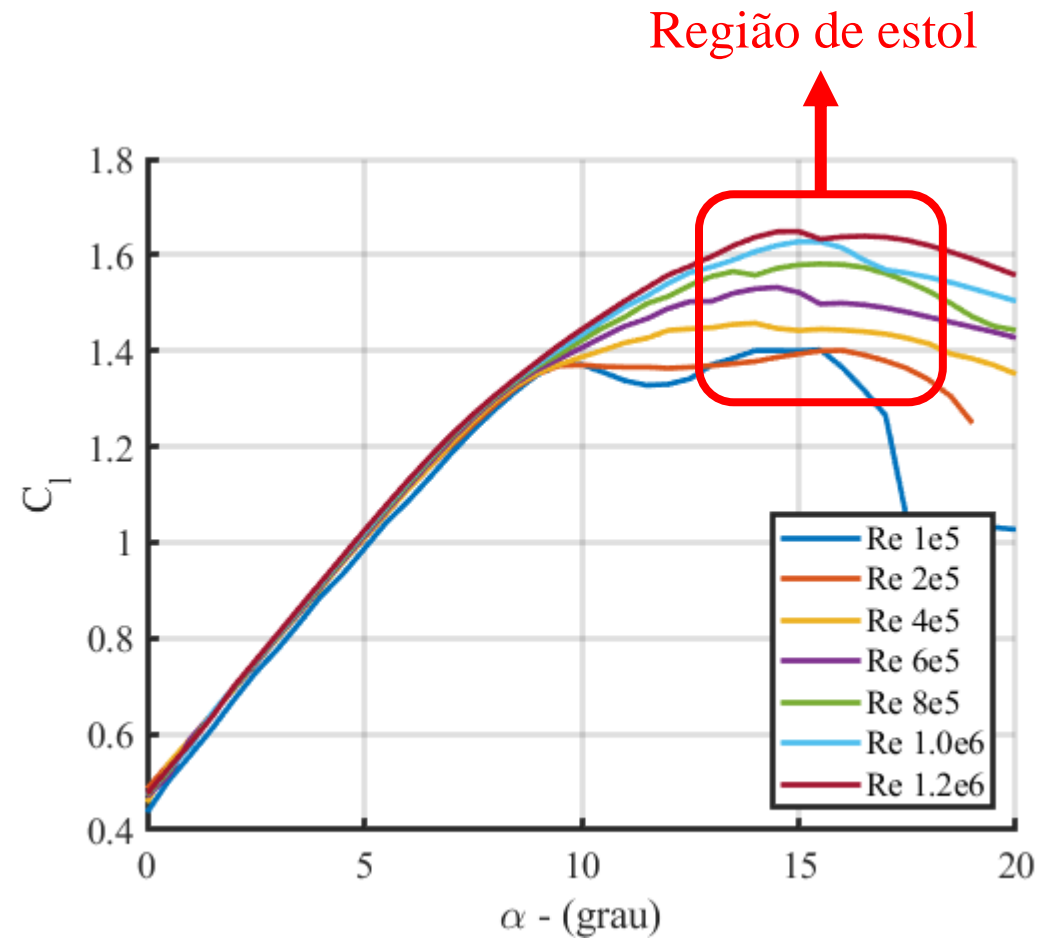
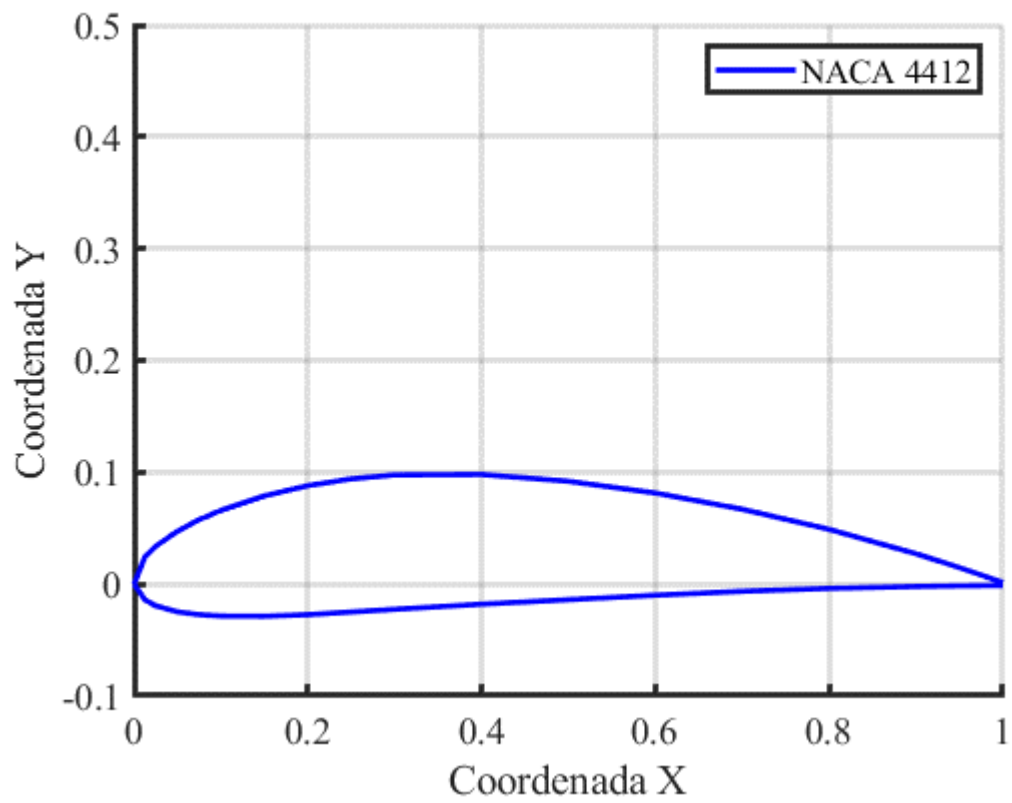


$U(1-a)$	= Velocidade do vento nas lâminas
U_{rel}	= Velocidade relativa do vento
θ_p	= Ângulo de pitch da seção
α	= Ângulo de ataque
$\varphi = \theta_p + \alpha$	= Ângulo da velocidade relativa do vento
$\theta_{p,0}$	= Ângulo de pitch da lâmina
θ_T	= Ângulo de torção da seção

Adaptado de [1].

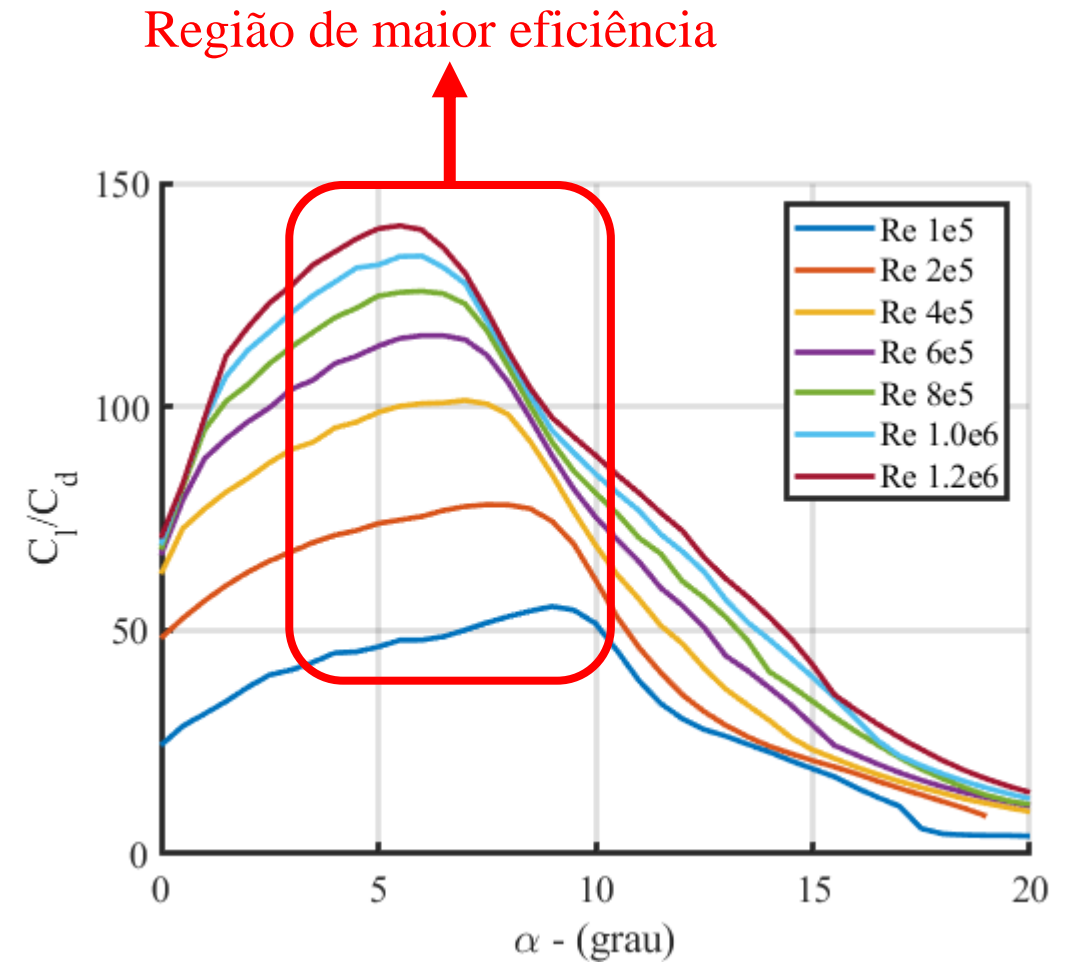
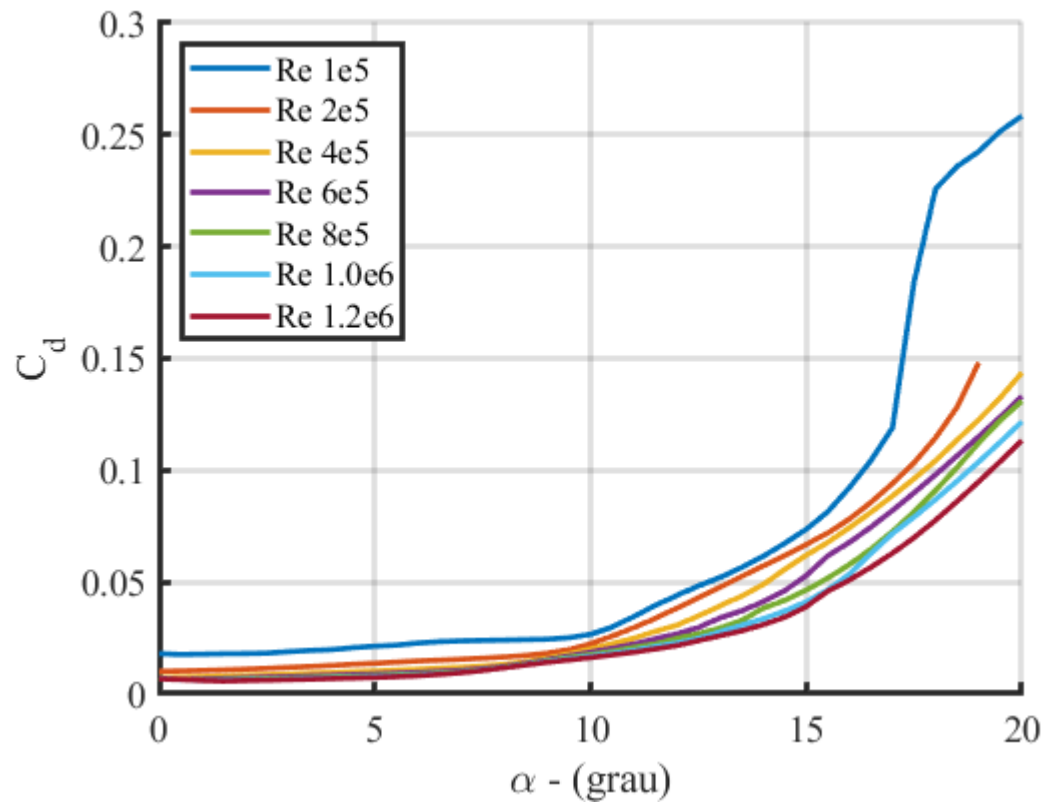
Projeto da Lâmina

➤ Curvas do perfil aerodinâmico



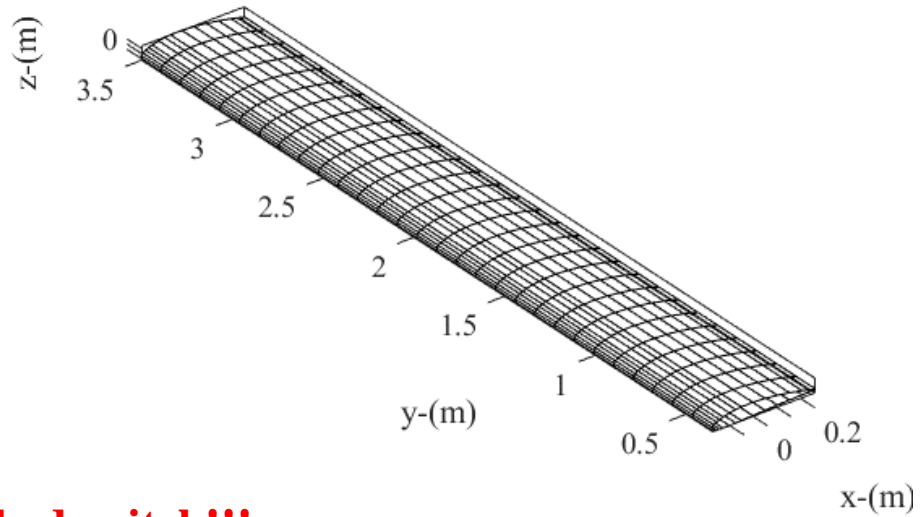
Projeto da Lâmina

➤ Curvas do perfil aerodinâmico

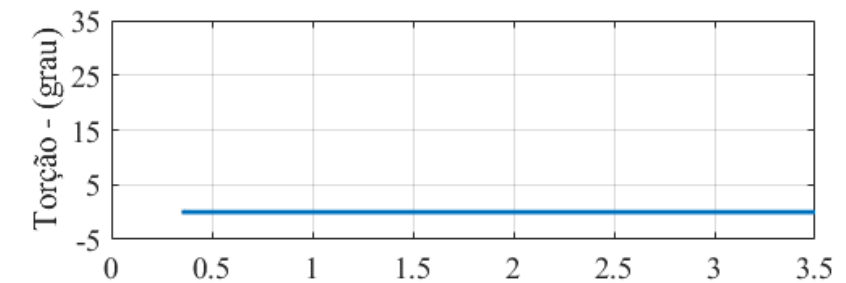
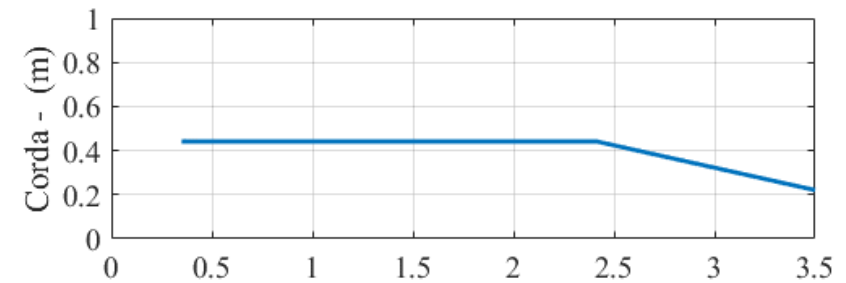
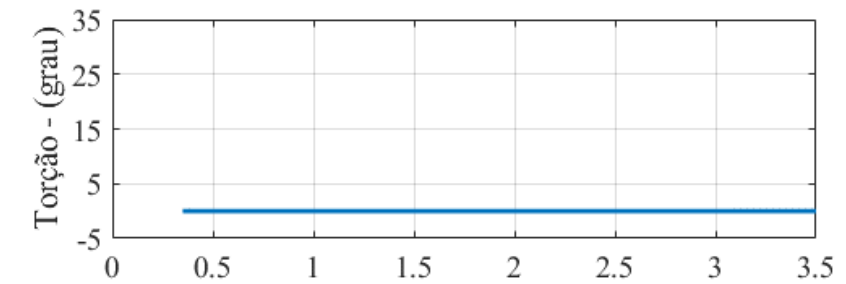
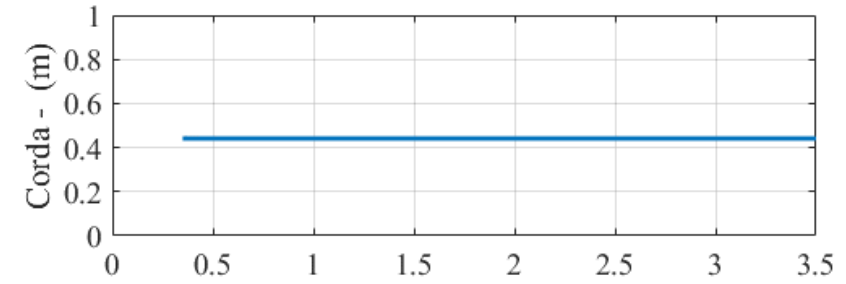
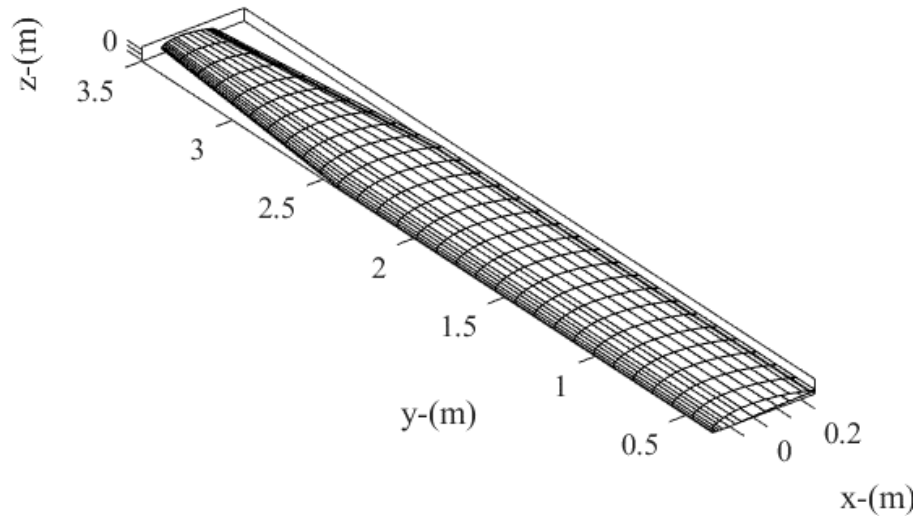


Projeto da Lâmina

➤ Modelos de lâminas



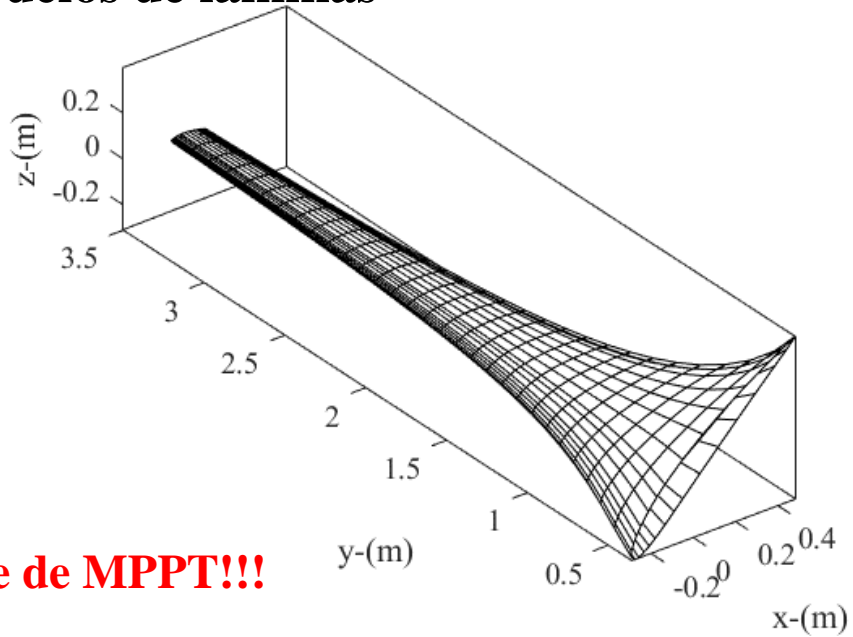
Controle de pitch!!!



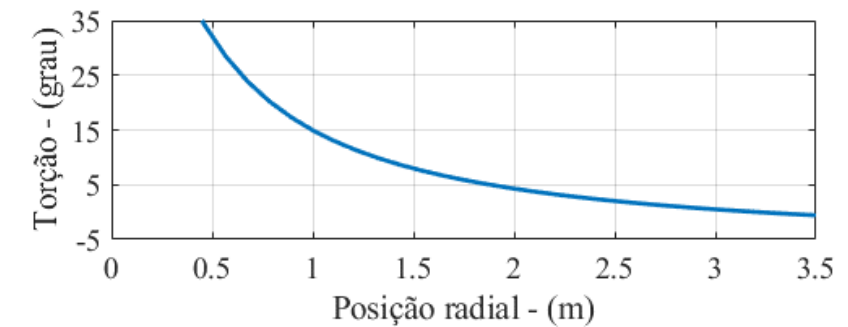
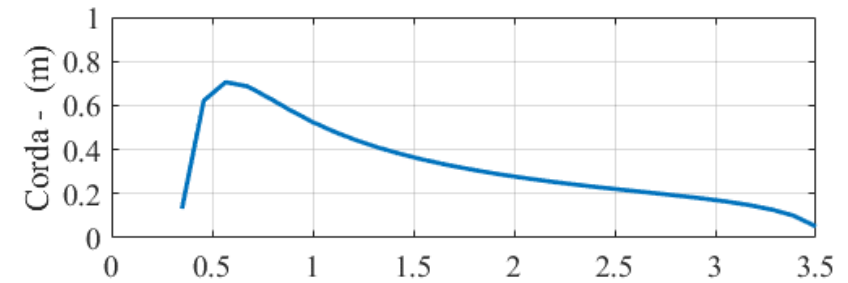
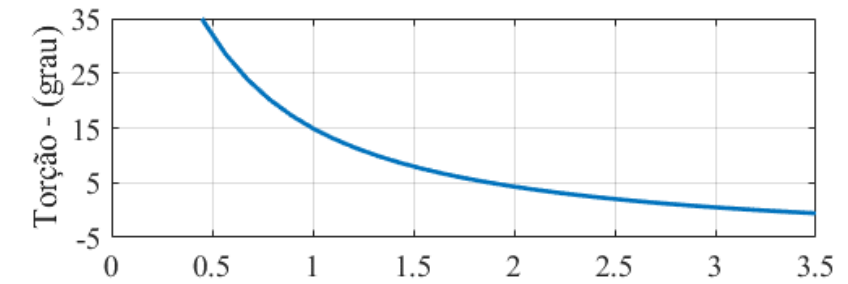
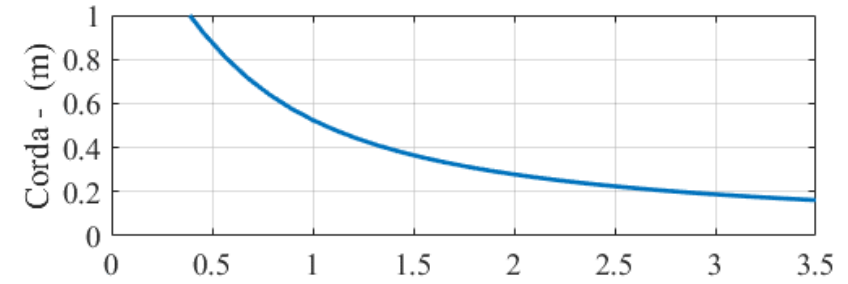
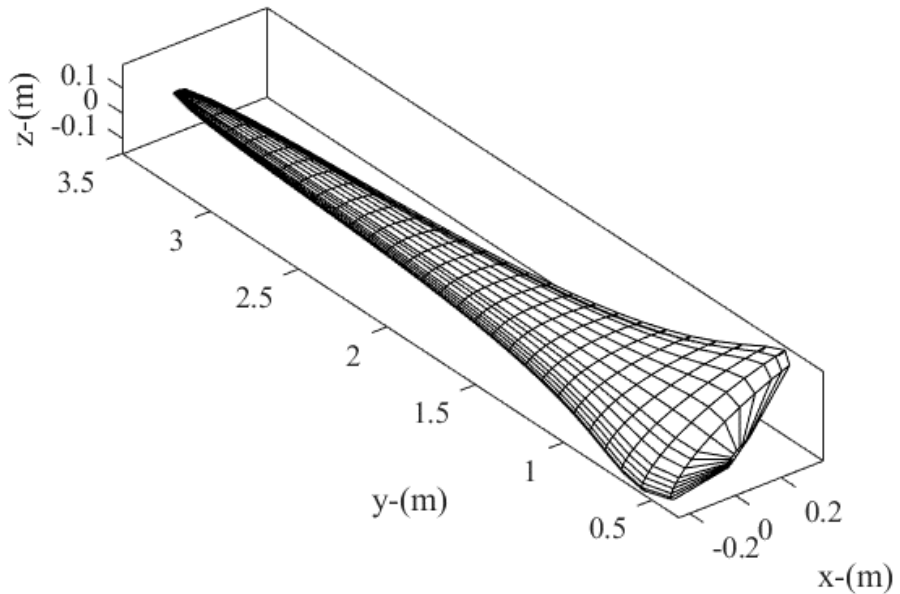
Posição radial - (m)

Projeto da Lâmina

➤ Modelos de lâminas



Controle de MPPT!!!



Projeto da Lâmina

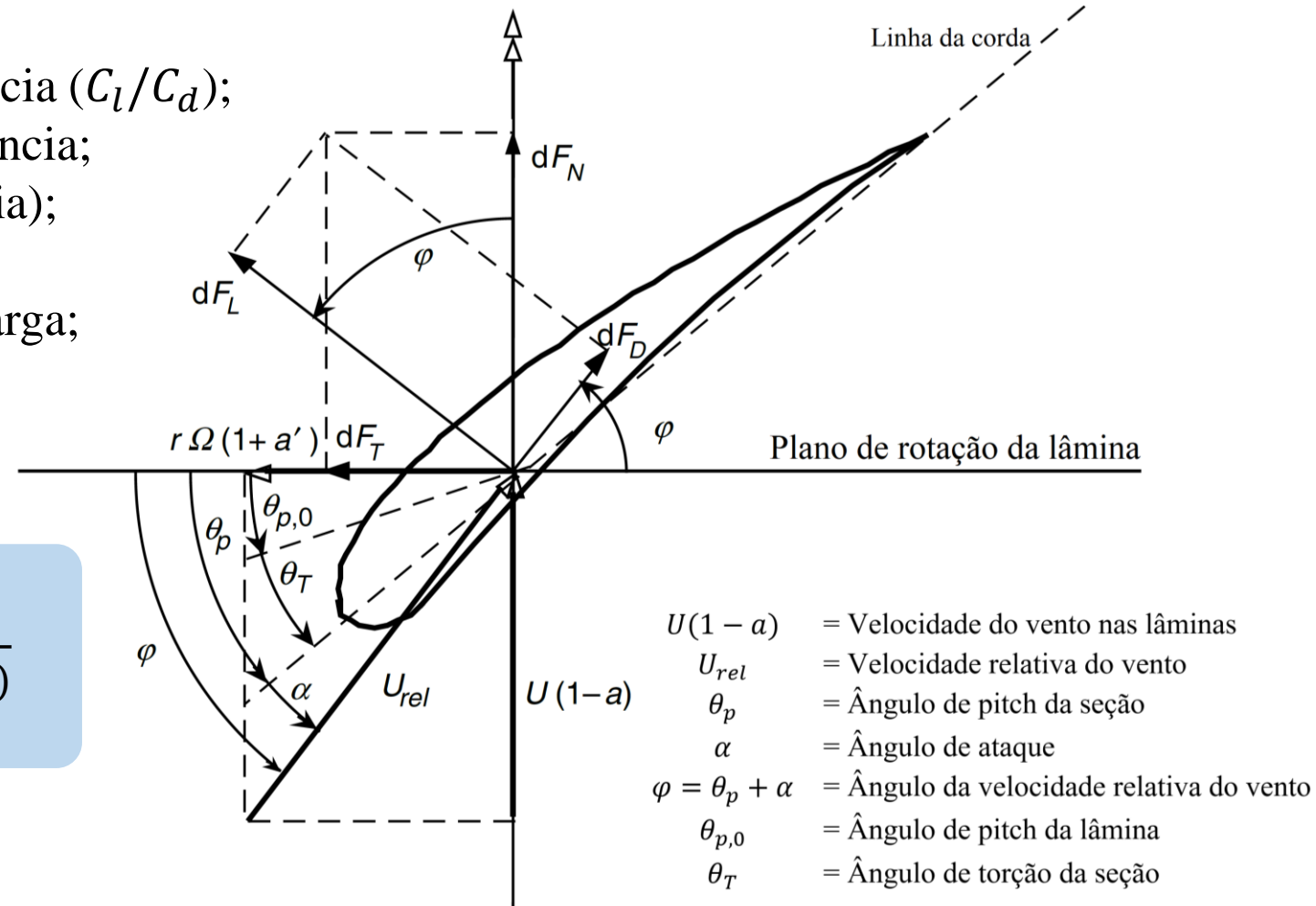
➤ Dados de entrada para o cálculo da geometria

- Tamanho dos raios da ponta e da raiz (depende do gerador);
- Características do fluido: massa específica e viscosidade dinâmica;
- Característica aerodinâmica do perfil:
 - Trabalhar com ângulo de maior eficiência (C_l/C_d);
 - Usar C_l e C_d do ângulo de maior eficiência;
- Velocidade nominal (de maior ocorrência);
- Números de lâminas;
- Rotação do eixo do gerador em plena carga;
- Fatores de indução ótimos.

$$\tan(\varphi) = \frac{U_\infty(1-a)}{\Omega r(1+a')}$$

$$\varphi = \theta_p + \alpha_{\text{ótimo}}$$

$$c = \frac{16\pi r F_{\text{loss}}}{BC_N(4 + 9\lambda_r^2)}$$

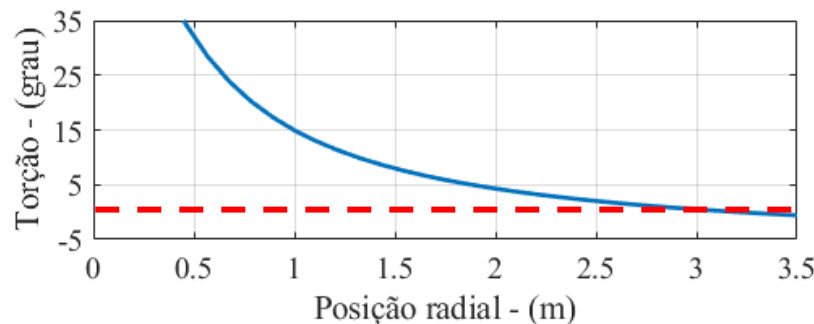
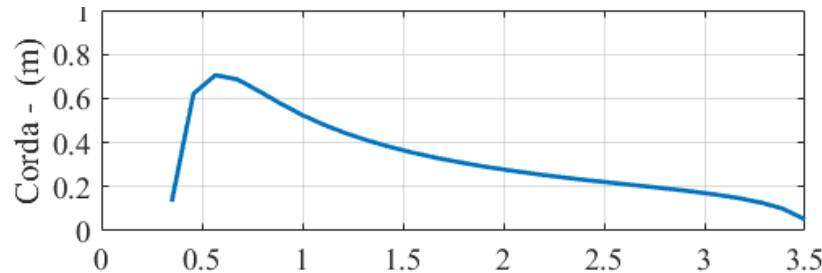
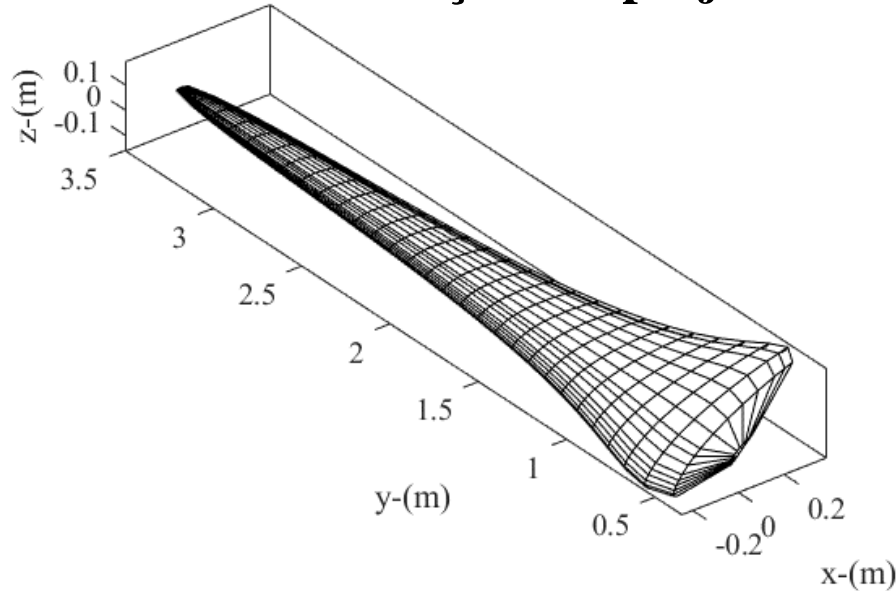


Nota: a equação da corda pode ser expressa de outras maneiras.

Adaptado de [1].

Projeto da Lâmina

➤ Resultado e considerações no projeto da lâmina



Raio x Corda x Ângulo de torção

Inércia

$$J = N\rho_L A_p R^5.$$

$$\left[\int (cr)^2 dr + \frac{A_p}{12} \left(\int c^4 \cos^2 \theta_p dr + A_p^2 \int c^4 \sin^2 \theta_p dr \right) \right]$$

Torque de partida

$$\frac{dQ}{dr} = N\rho U^2 (1 + \lambda_r^2)^{\frac{1}{2}} cr \left(\sin(\theta_p) (\cos(\theta_p) - \sin(\theta_p) \lambda_r) \right)$$

$\rightarrow \sin(2\theta_p)$

Taxa de variação de velocidade na partida

$$-\frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{T_{mec} - T_{el}^0}{J}$$

Fase 1.B – Desempenho do Rotor / Lâmina

Desempenho do Rotor / Lâmina

➤ Teoria do Momento Axial (TMA)

Consideração

Fluido livre e incompressível, estudos baseados nas leis de conservação (massa, momento e quantidade de energia).

Equação de Bernoulli

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{constante}$$

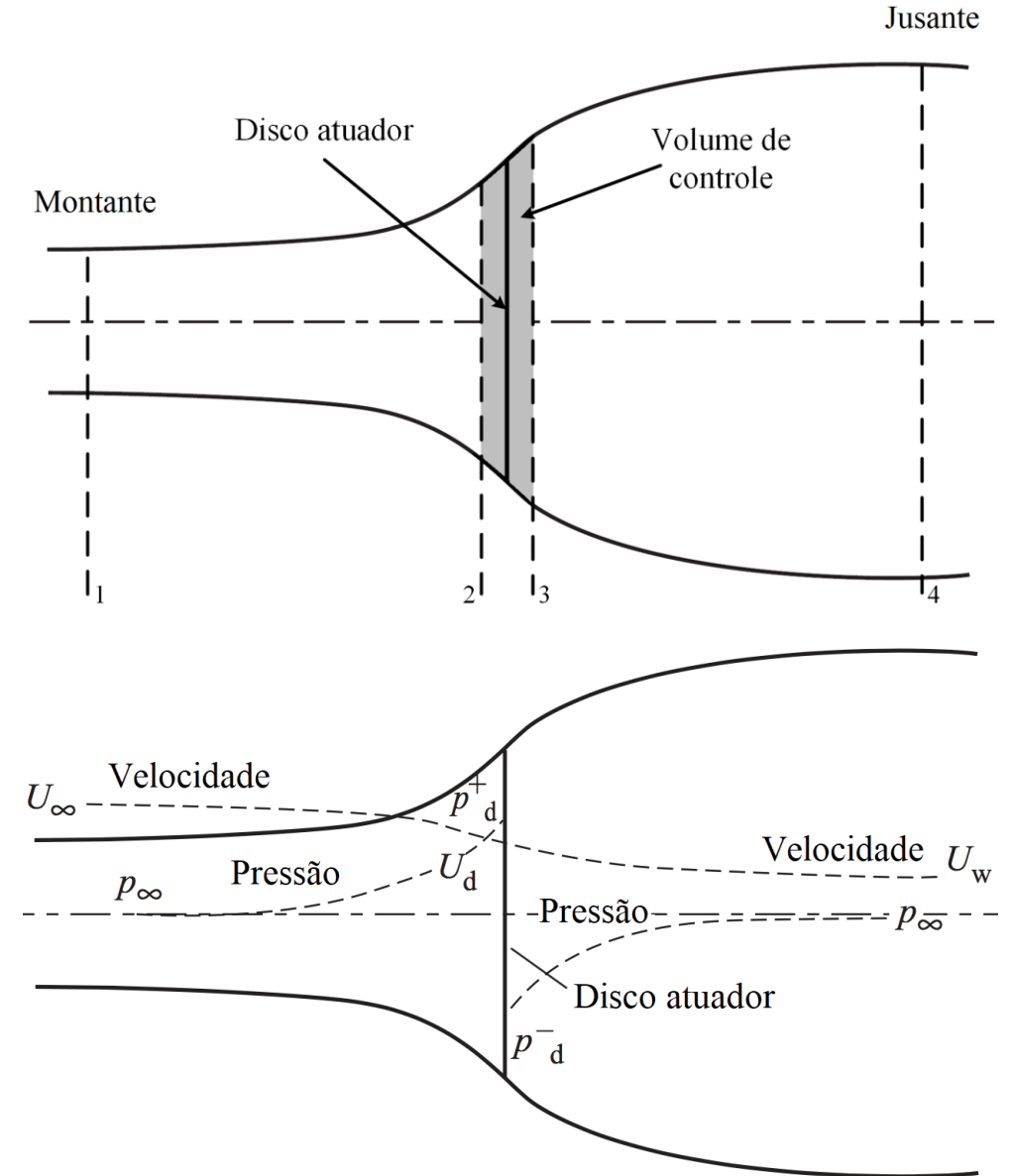
Empuxo

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

Torque

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

h = altura;
 p = pressão;
 g = aceleração da gravidade;
 Ω = velocidade angular do rotor;
 a e a' = fatores de indução axial e rotacional.



Adaptado de [1].

Desempenho do Rotor / Lâmina

➤ Teoria do Elemento de Lâmina (TEL)

Coeficientes das forças normal e tangencial

$$C_n = C_l \cos(\varphi) + C_d \sin(\varphi)$$

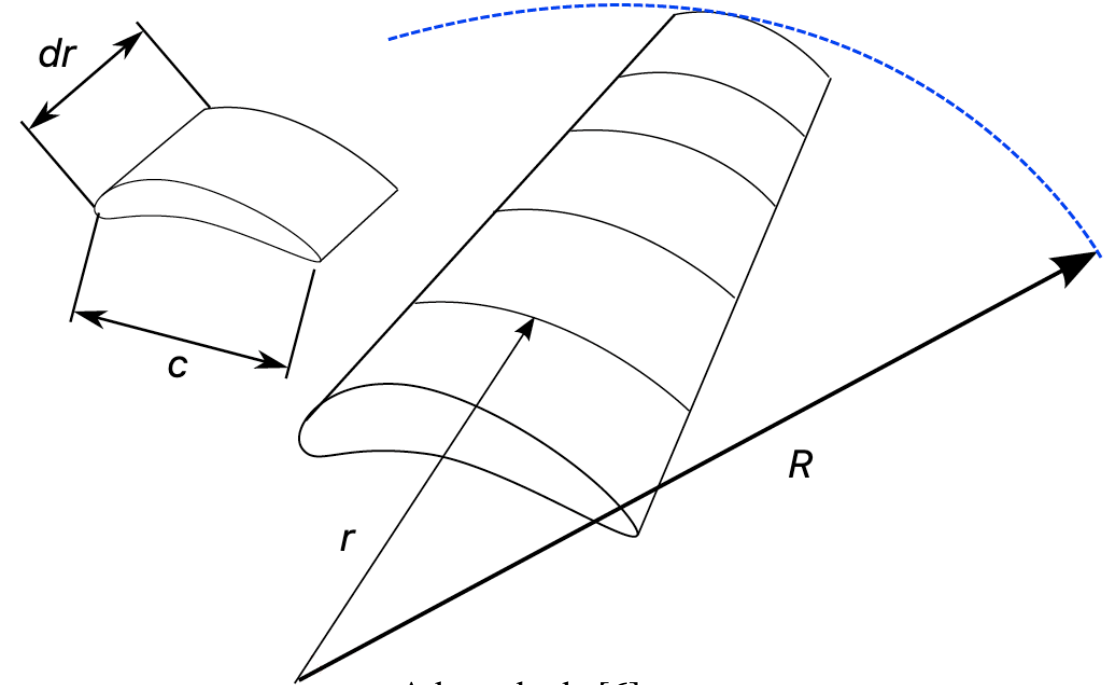
$$C_t = C_l \sin(\varphi) - C_d \cos(\varphi)$$

Forças aerodinâmicas

$$\tan(\varphi) = \frac{U_\infty(1 - a)}{\Omega r(1 + a')}$$

$$dF_L = \frac{1}{2} C_l \rho U_{rel}^2 c dr$$

$$dF_D = \frac{1}{2} C_d \rho U_{rel}^2 c dr$$



Adaptado de [6].

Empuxo

$$dF_N = \sigma' \pi \left[\rho \left(\frac{U_\infty(1 - a)}{\sin(\varphi)} \right)^2 C_n r dr \right]$$

Torque

$$dQ = \sigma' \pi \left[\rho \left(\frac{U_\infty(1 - a)}{\sin(\varphi)} \right)^2 C_t r^2 dr \right]$$

Desempenho do Rotor / Lâmina

➤ Teoria do momento do elemento de lâmina – BEM

Teoria do momento axial

Teoria do elemento de lâmina

$$\text{Empuxo (TMA)} = \text{Empuxo (TEL)}$$

$$\text{Torque (TMA)} = \text{Torque (TEL)}$$

Teoria do momento do elemento de lâmina - BEM

Fator de indução axial

Fator de indução rotational

$$a \cong \left(1 + \frac{4\sin^2(\varphi)}{\sigma' C_N} \right)^{-1}$$

$$a' \cong \left(\frac{4\cos(\varphi)\sin(\varphi)}{\sigma' C_N} - 1 \right)^{-1}$$

Modelo Clássico

Insuficiente para analisar o desempenho!!!

Complemento ao modelo clássico

➤ Correções

- Perdas na ponta e raiz da lâmina;
- Altos ângulos de ataque;
- Altos valores do fator de indução axial.

Desempenho do Rotor / Lâmina

➤ Correções complementares

Perdas na ponta e na raiz da lâmina: método de Prandtl

$$F_{tip} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[\exp^{-\left(\frac{B}{2} \frac{(R-r)}{(r \sin(\varphi))}\right)} \right]; F_{hub} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[\exp^{-\left(\frac{B}{2} \frac{(r-r_{hub})}{(r_{hub} \sin(\varphi))}\right)} \right]$$

Altos valores do fator de indução axial: método de Robert Wilson e Spera

$$K = \frac{4F_{loss} \sin^2(\varphi)}{\sigma' C_n}; a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right]; (a > a_c, \text{ onde } a_c = 0,2)$$

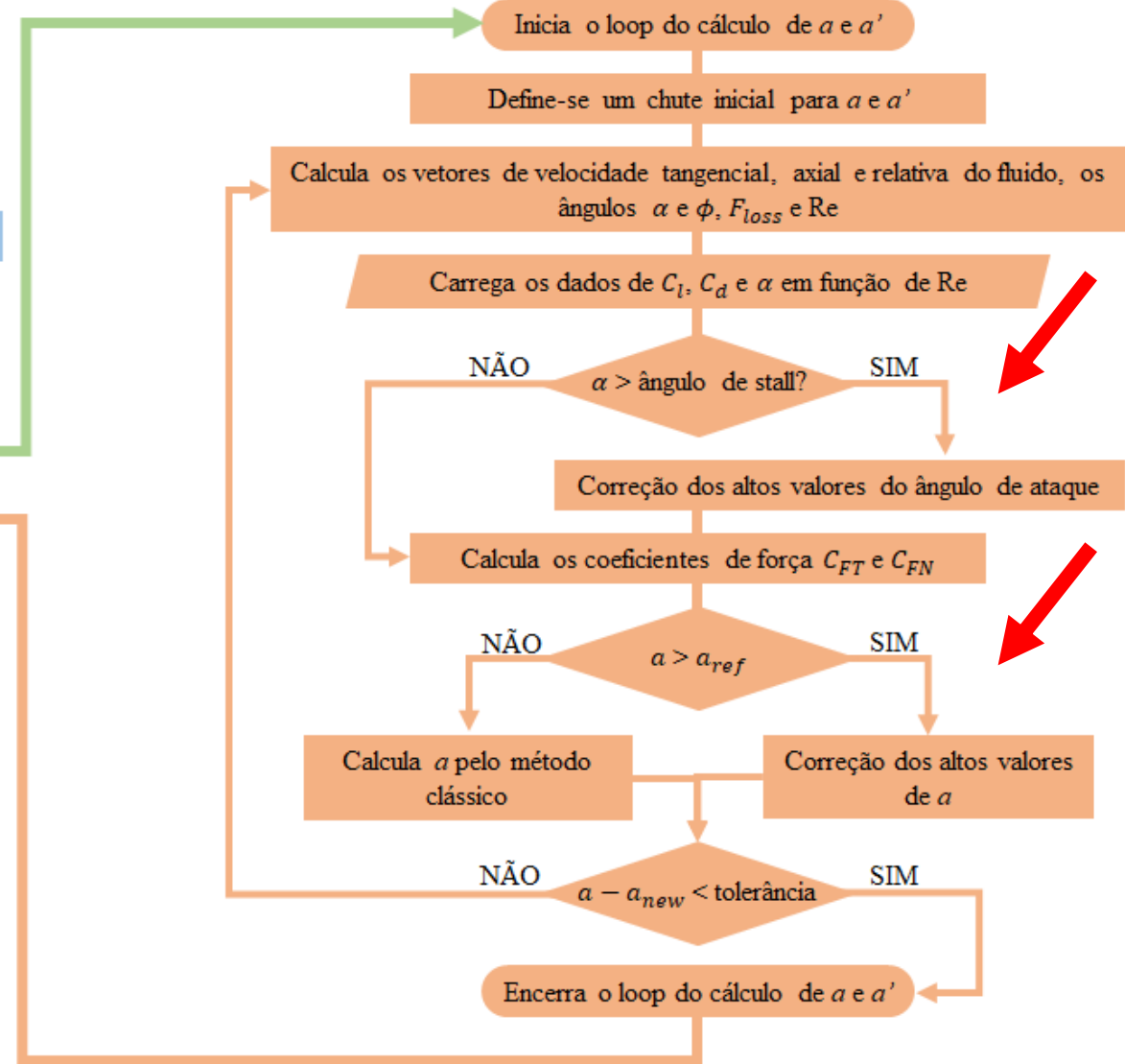
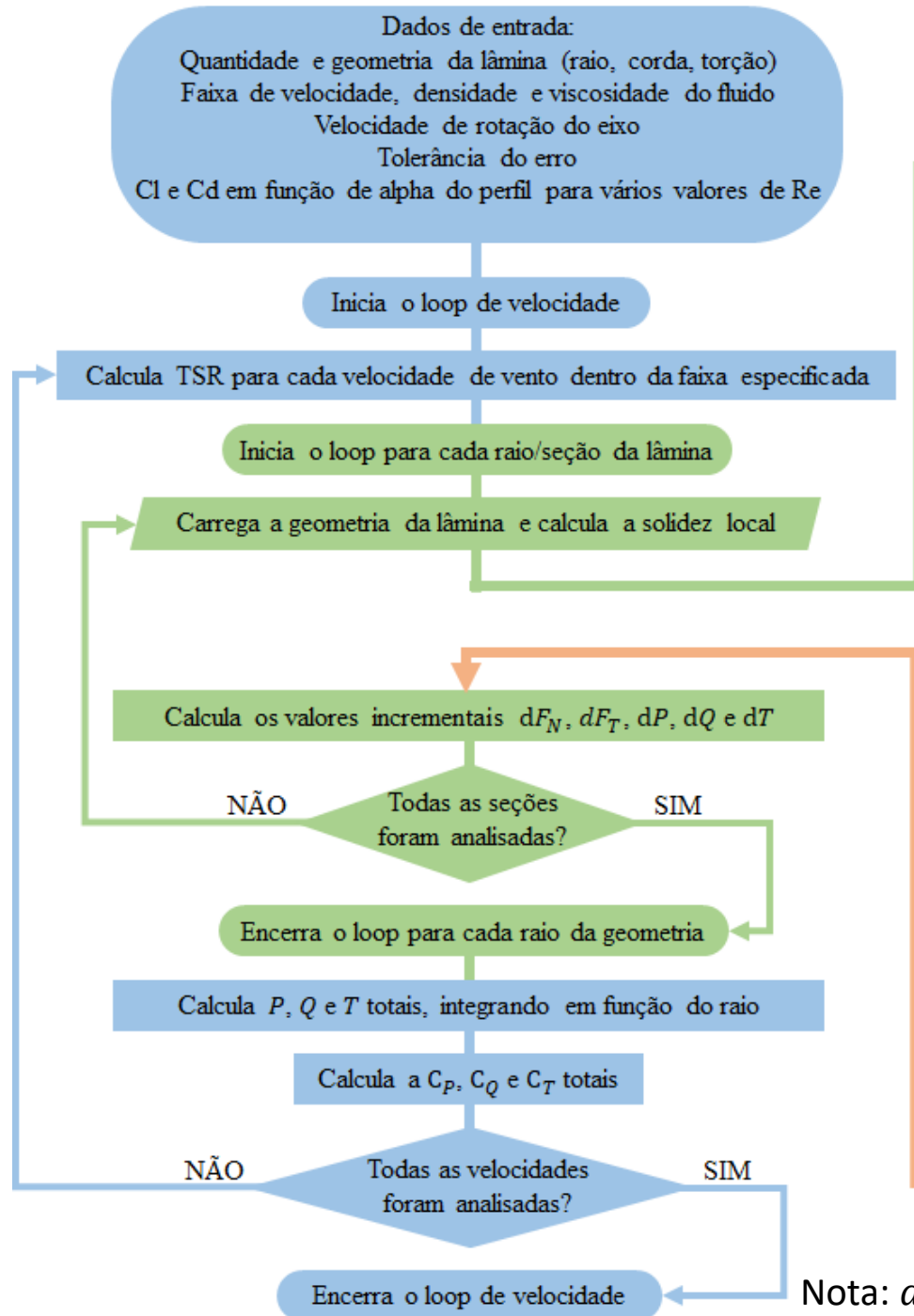
Altos ângulos de ataque: método de Viterna e Corrigan

$$C_l = A_1 \sin(2\alpha) + A_2 \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\sin(\alpha)} \right); C_d = B_1 \sin^2(\alpha) + B_2 \cos(\alpha)$$

$$A_1 = \frac{B_1}{2}; A_2 = C_{ls} - C_{dmax} \sin(\alpha_s) \cos(\alpha_s) \left(\frac{\sin(\alpha_s)}{\cos^2(\alpha_s)} \right); B_1 = C_{dmax}; B_2 = \frac{C_{ds} - C_{dmax} \sin^2(\alpha_s)}{\cos(\alpha_s)}$$

$$C_{dmax} = 1.11 + 0.018\mu; \mu = \frac{R-r_{hub}}{c}$$

Fluxograma do método



Nota: a_{ref} depende do método de correção dos altos valores do fator de indução axial.

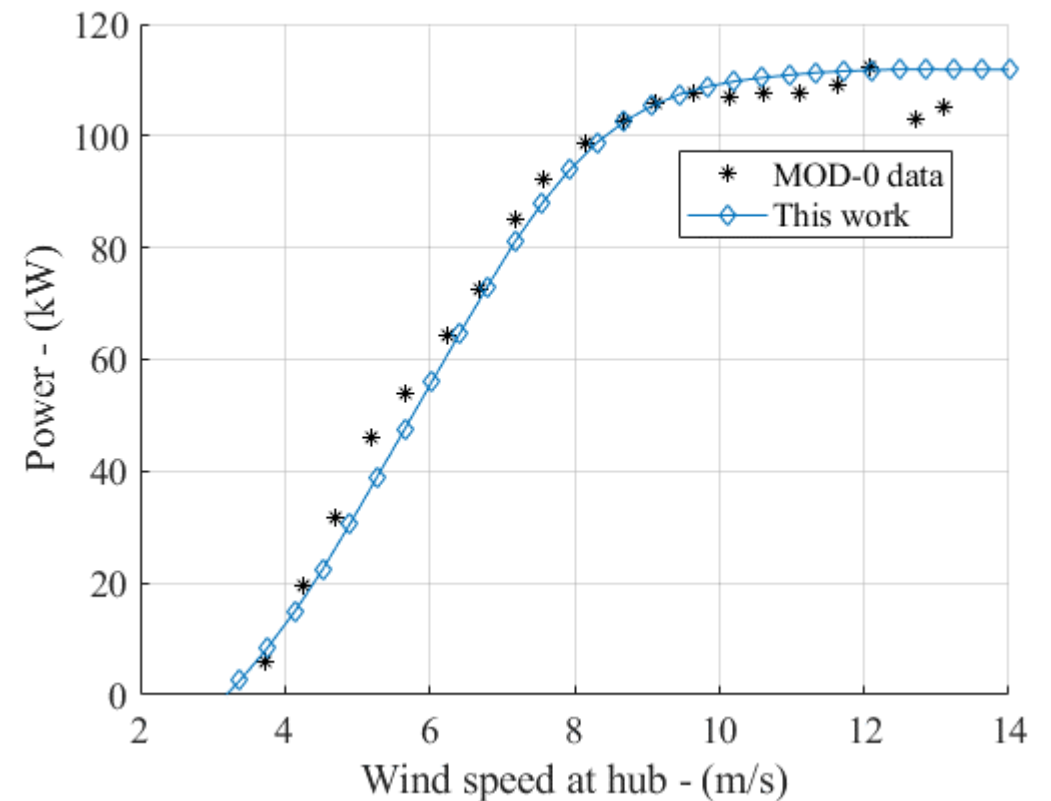
Desempenho do Rotor / Lâmina

Turbina NASA MOD-0

Características:

- ✓ 2 lâminas;
- ✓ Potência nominal 100 kW;
- ✓ $C_p = 0,37$ (aproximadamente);
- ✓ Perfil aerodinâmico, série NACA 230XX;
- ✓ Velocidade nominal do rotor/lâminas 27 rpm;
- ✓ Ângulo de pitch 0° ;
- ✓ Diâmetros externo e interno: 38 m e 7,84 m;

Resultados



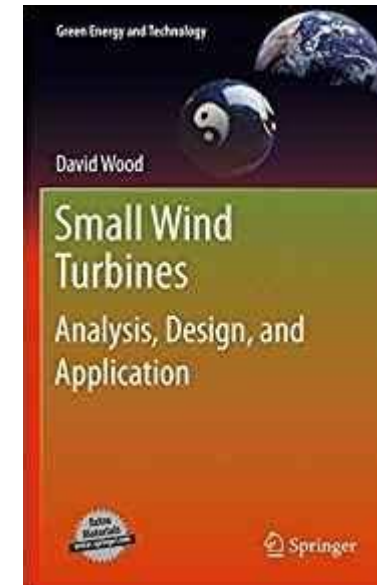
Fonte [8].

Desempenho do Rotor / Lâmina

David Wood 2011/Book

Características:

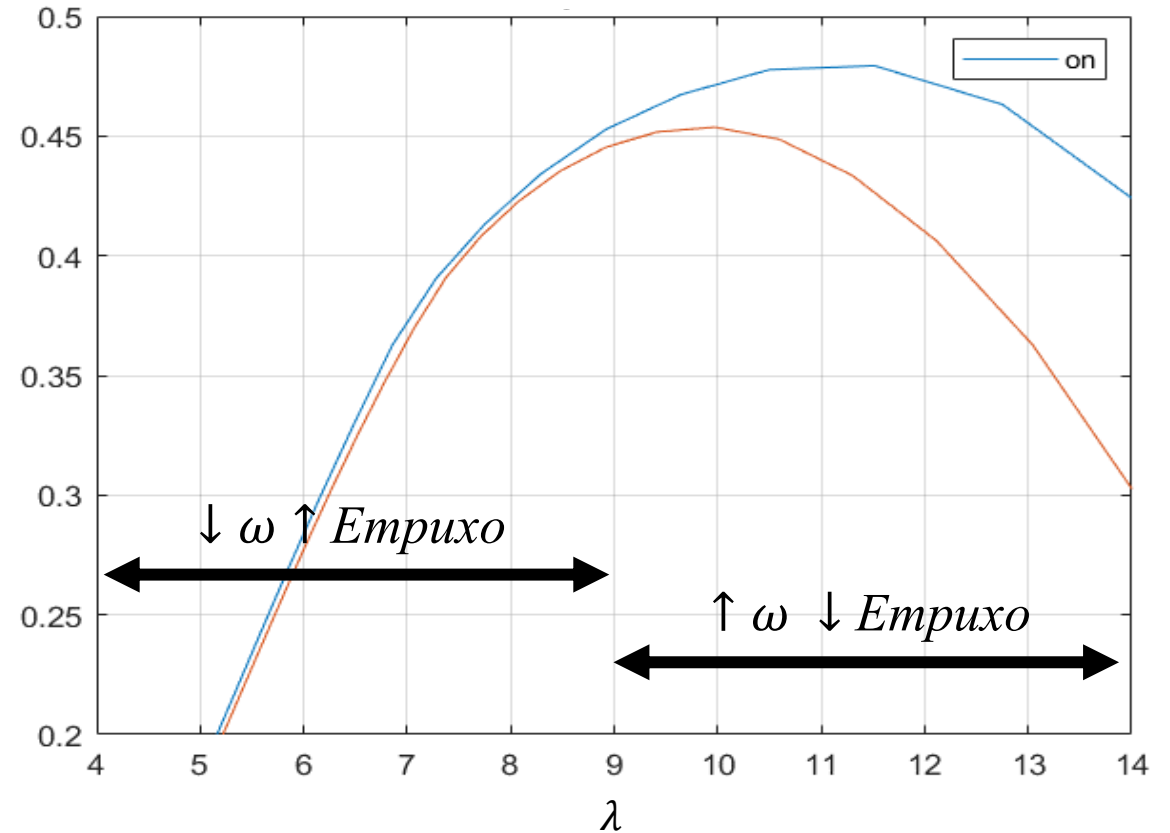
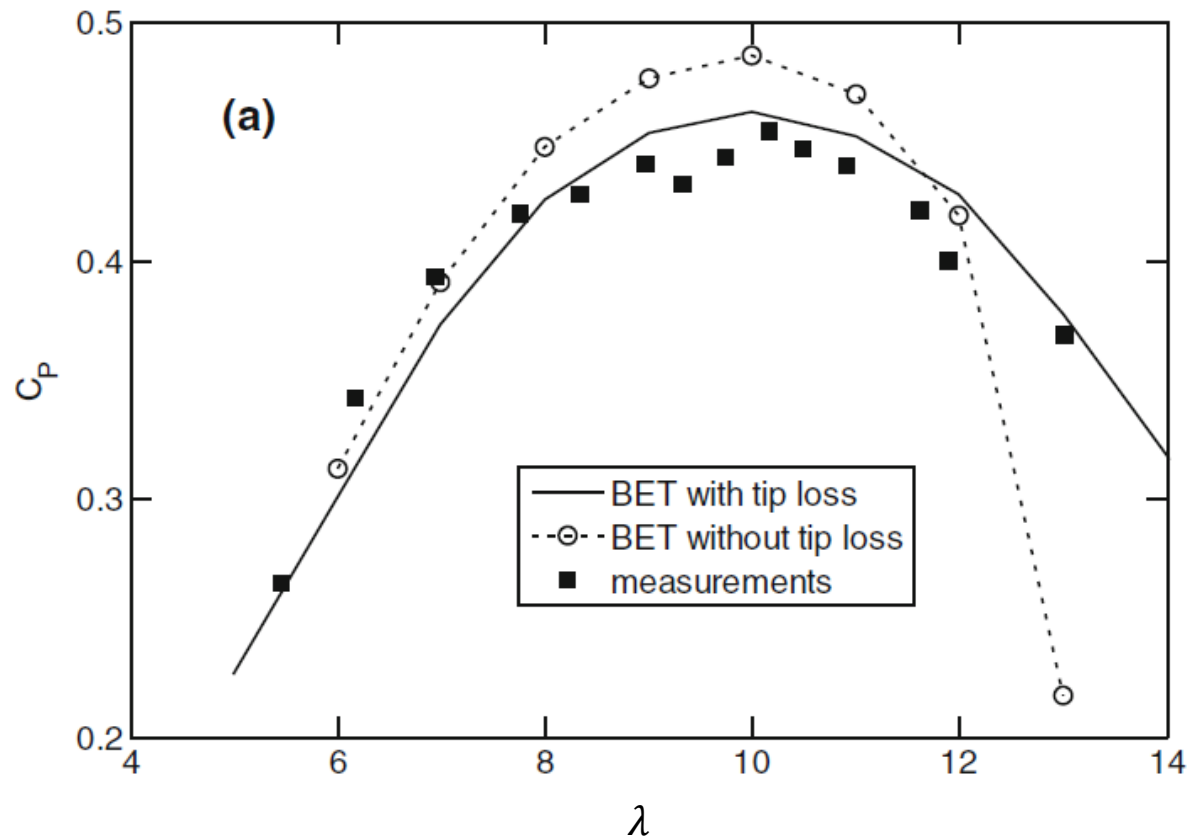
- ✓ 2 lâminas;
- ✓ Potência nominal 1,9 kW;
- ✓ $C_p = 0,45$ (aproximadamente);
- ✓ Perfil aerodinâmico, NACA 4412;
- ✓ Ângulo de pitch variável ao longo da lâmina;
- ✓ Diâmetros externo e interno: 3 m e 0.266 m;



Desempenho do Rotor / Lâmina

David Wood 2011/Book

Resultados



A diferença entre os dois métodos é apenas a correção do fator de indução axial

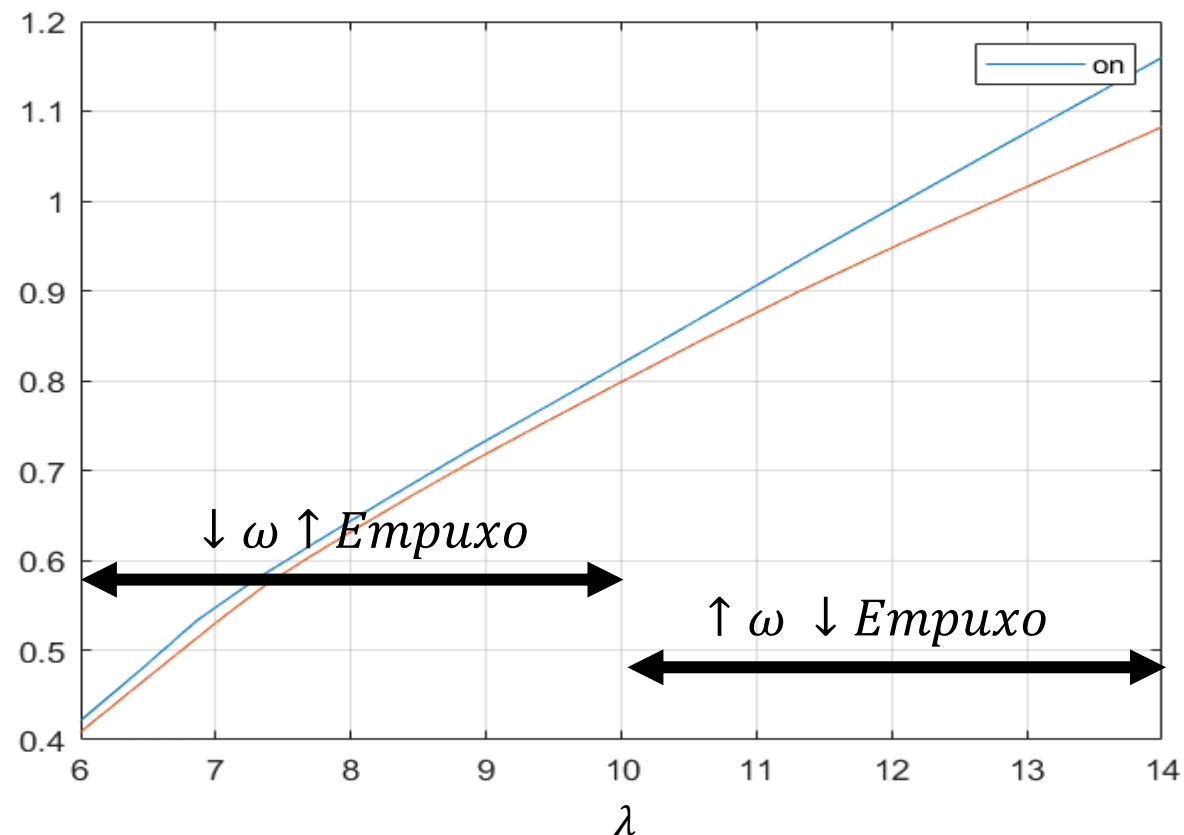
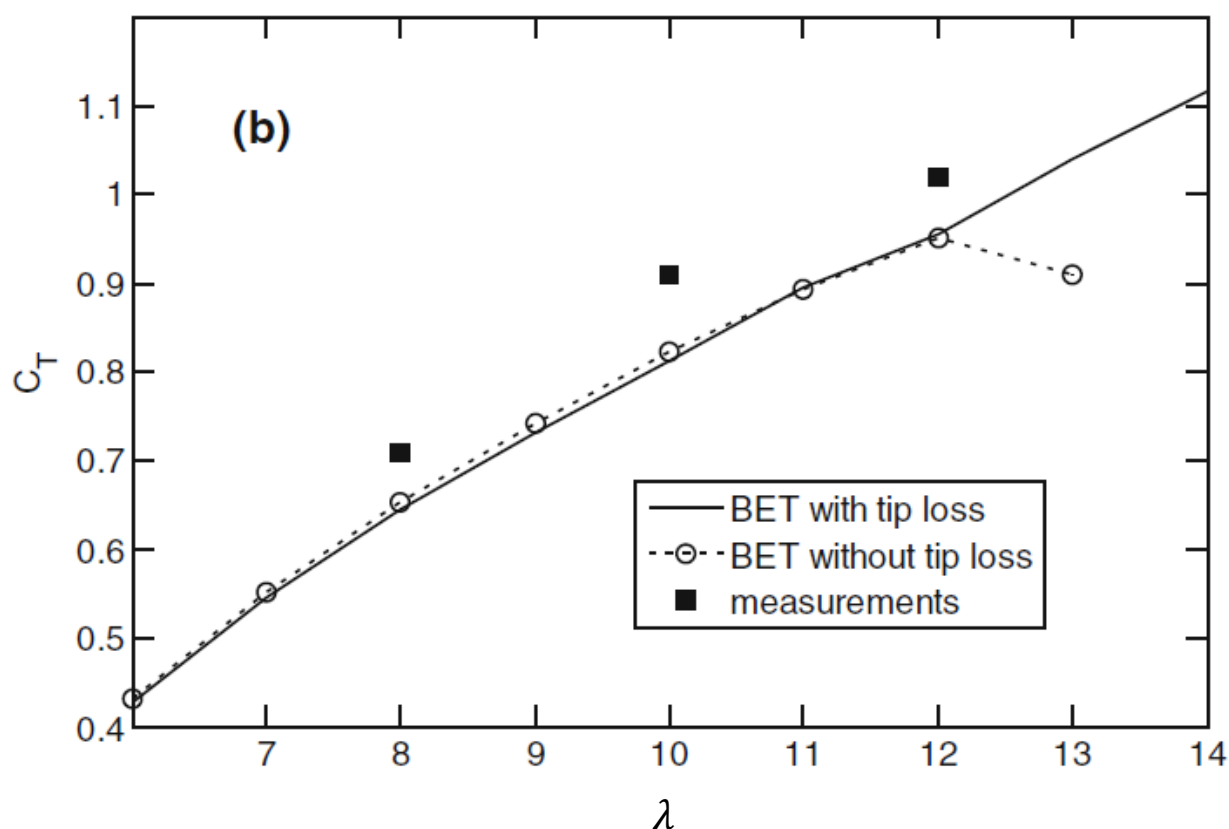
Linha azul: Robert Wilson e Spera.

Linha vermelha: Vries e Clifton-Smith, citado em D. Wood 2011.

Desempenho do Rotor / Lâmina

David Wood 2011/Book

Resultados



A diferença entre os dois métodos é apenas a correção do fator de indução axial

Linha azul: Robert Wilson e Spera.

Linha vermelha: Vries e Clifton-Smith, citado em D. Wood 2011.

Fase 2 – Desempenho da turbina com gerador eléctrico

Desempenho da turbina com gerador elétrico

Como foi feito?

O desempenho do gerador foi calculado usando o bloco modelo do Simulink / Matlab.

Um modelo foi implementado usando as equações da máquina. Os resultados são similares, mas o tempo de simulação aumenta consideravelmente.

Principais parâmetros do gerador elétrico

Potência nominal	10 kW
Número de pares de polos	19
Fluxo magnético	0.3651 V.s/rad
Indutância do estator	4.48 mH ($L_{ds} = L_{qs}$)
Resistência do estator	0.5 ohms
Inércia	55 kg.m ²
Resistência do trem de potência	1.59 Nm/(rad/s)

➤ Tipo da máquina

- Gerador síncrono à ímã permanente.

➤ Razões

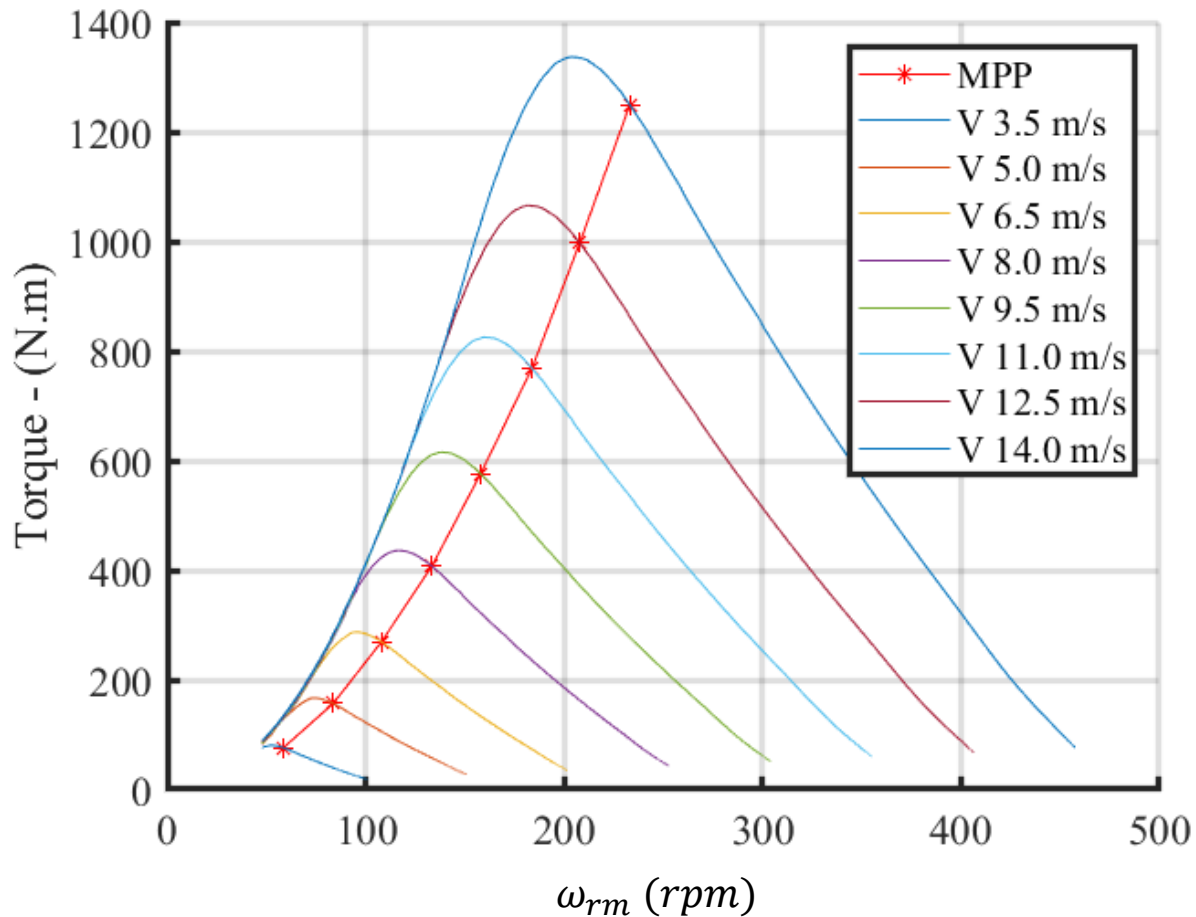
- Apresenta alto desempenho em baixa velocidade quando comparado com outros modelos;
- Pode ser acoplado diretamente com o eixo da turbina (sem caixa de engrenagem).

➤ Outras razões

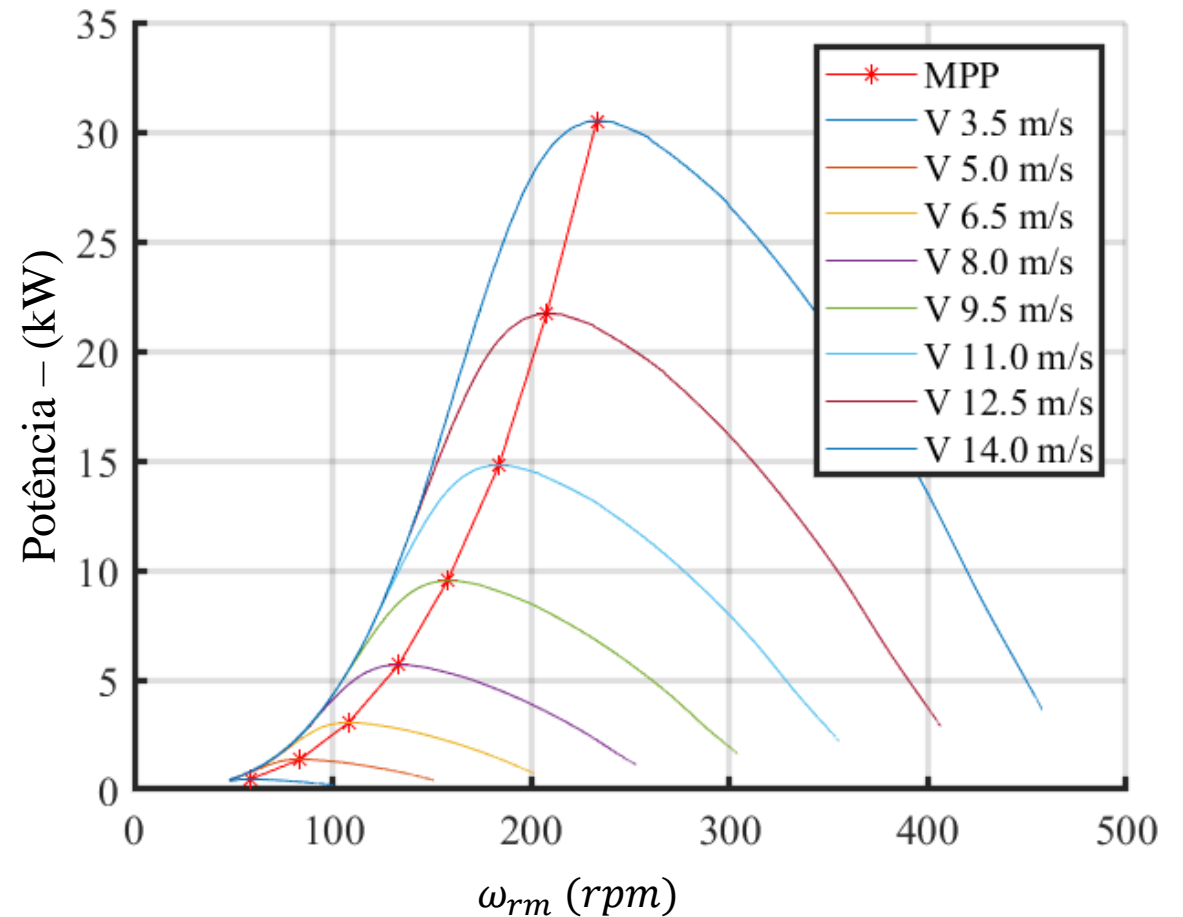
- Conhecimento dos parâmetros e curva de desempenho;
- Unidades acessíveis:
UFMA;
Ilha dos Lençóis – MA.

Desempenho da turbina com gerador elétrico

Curvas características da turbina sem carga elétrica!!!



Torque mecânico como uma função da velocidade do vento, destacando o “*maximum power point*” (MPP)



Potência mecânica como uma função da velocidade do vento, destacando o “*maximum power point*” (MPP)

Desempenho da turbina com gerador elétrico

Nas 3 situações a seguir são mostradas as curvas de torque e potência mecânica, destacando a situação em que o MPP é alcançado.

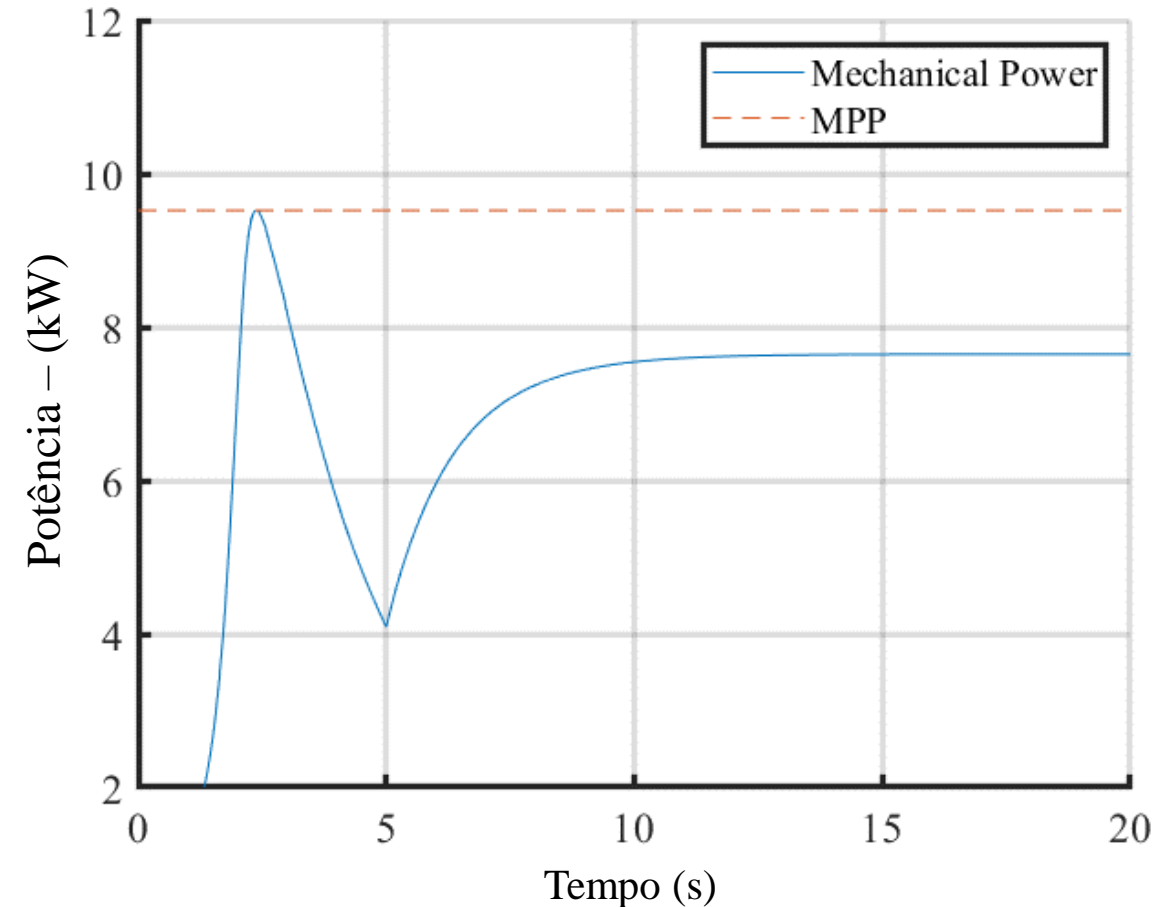
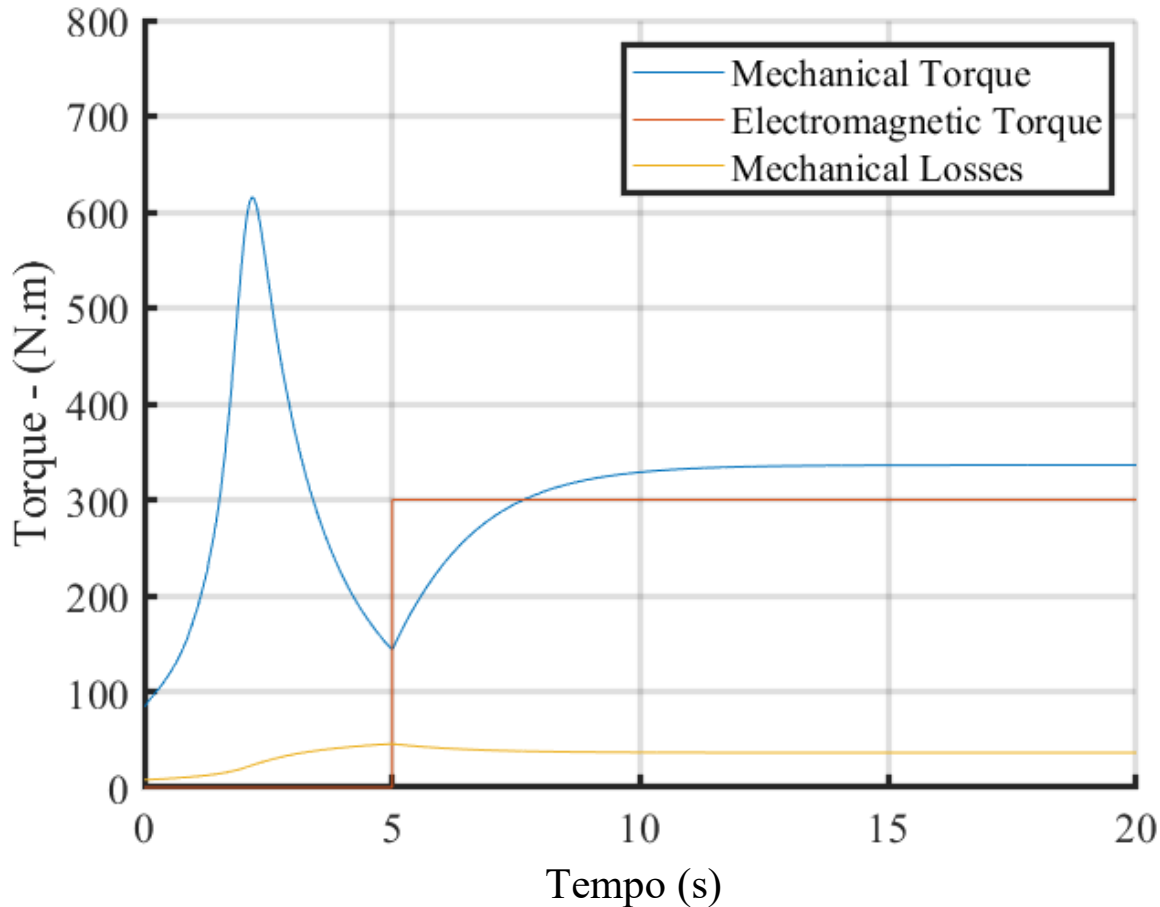
Velocidade de vento 9,5 m/s

- Situação 1 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas < Torque mecânico no MPP;
- Situação 2 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas > Torque mecânico no MPP;
- Situação 3 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas = Torque mecânico no MPP.

Torque eletromagnético = Carga elétrica (escolhida)

Desempenho da turbina com gerador elétrico

- **Situação 1 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas < Torque mecânico no MPP**

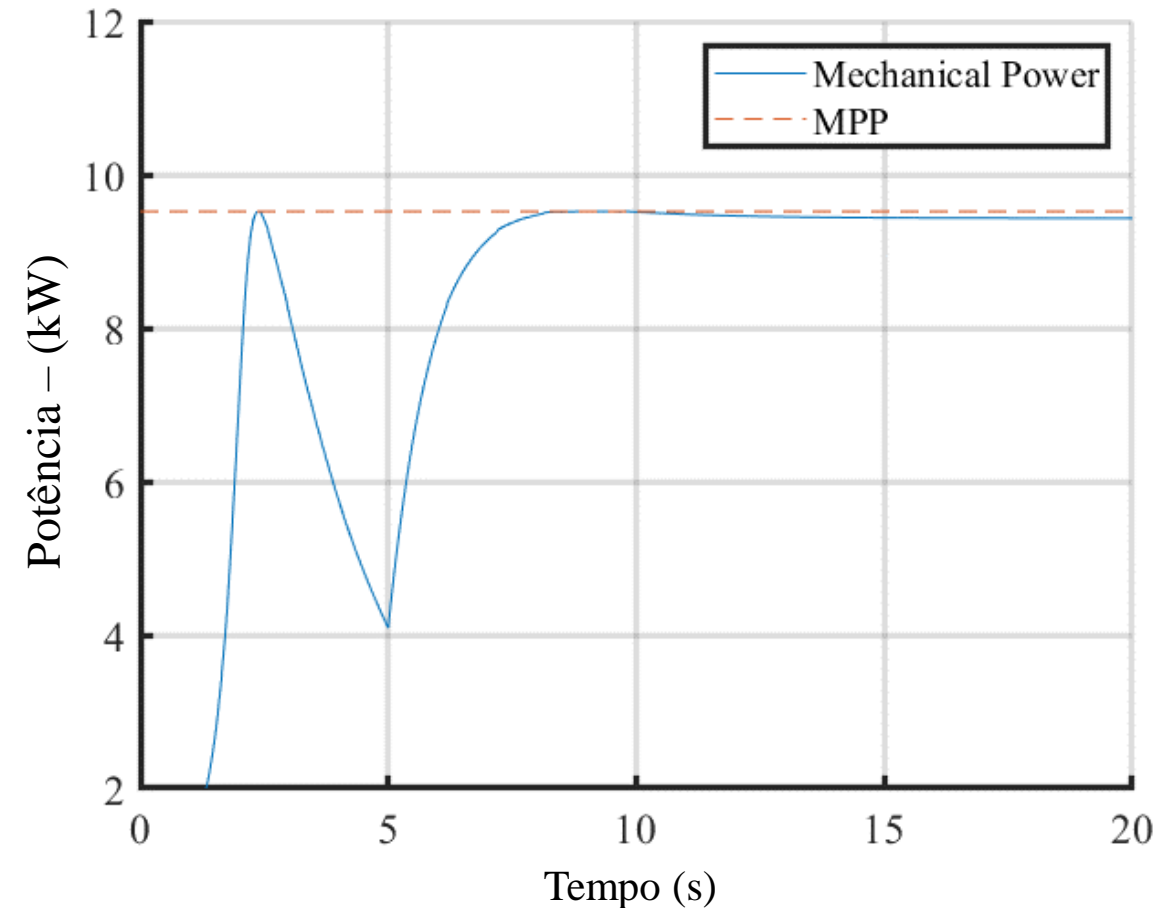
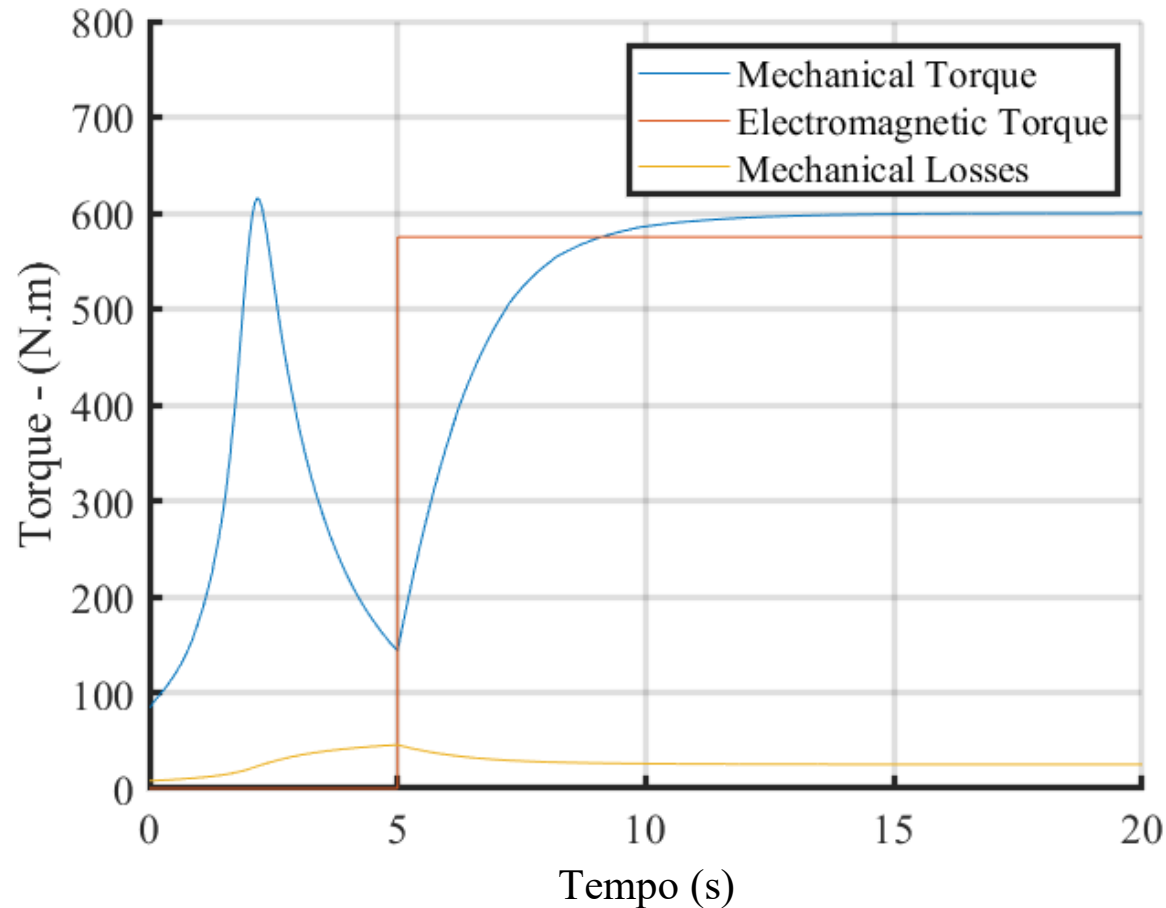


No tempo 5 s um torque eletromagnético foi aplicado, representando uma **pequena carga**.

Esse torque é **menor do que o de MPP**. Por isso MPP **não é alcançado**.

Desempenho da turbina com gerador elétrico

- **Situação 2 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas > Torque mecânico no MPP**

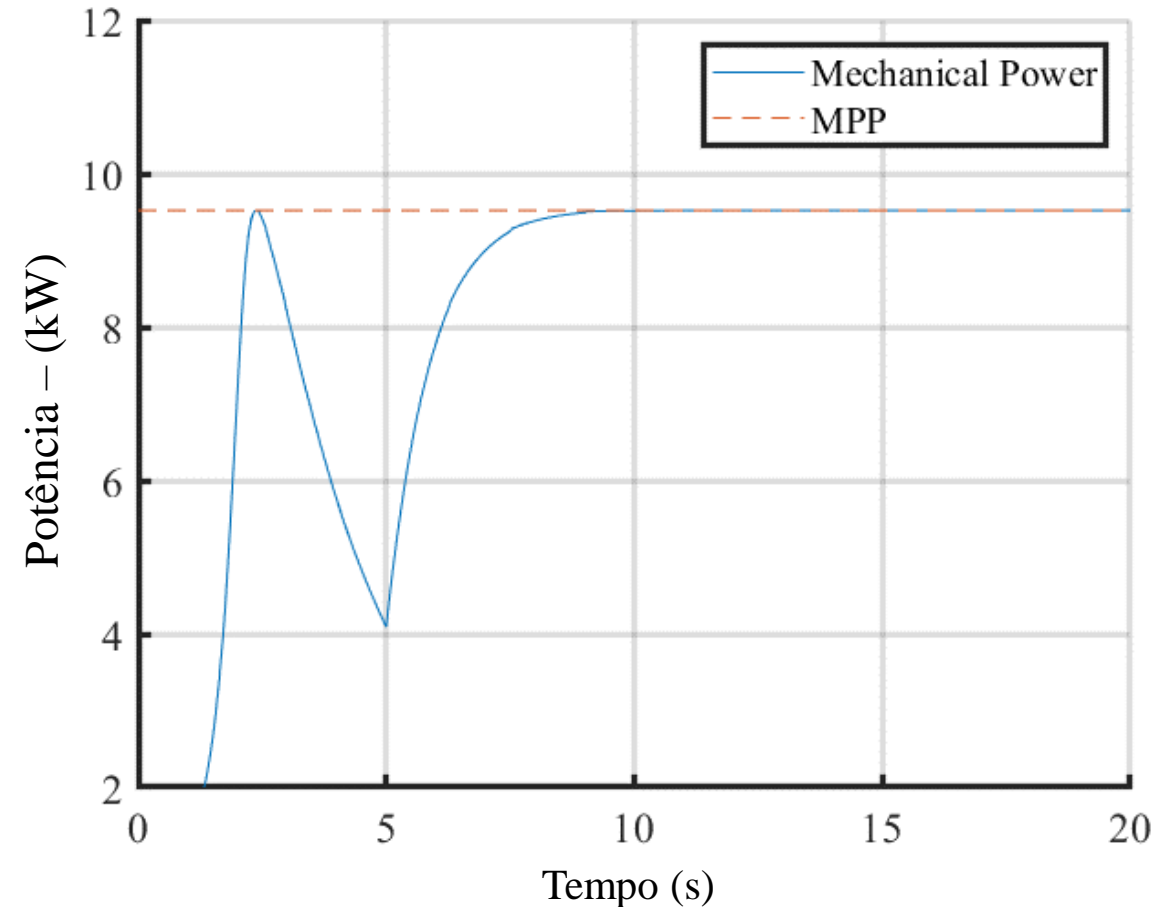
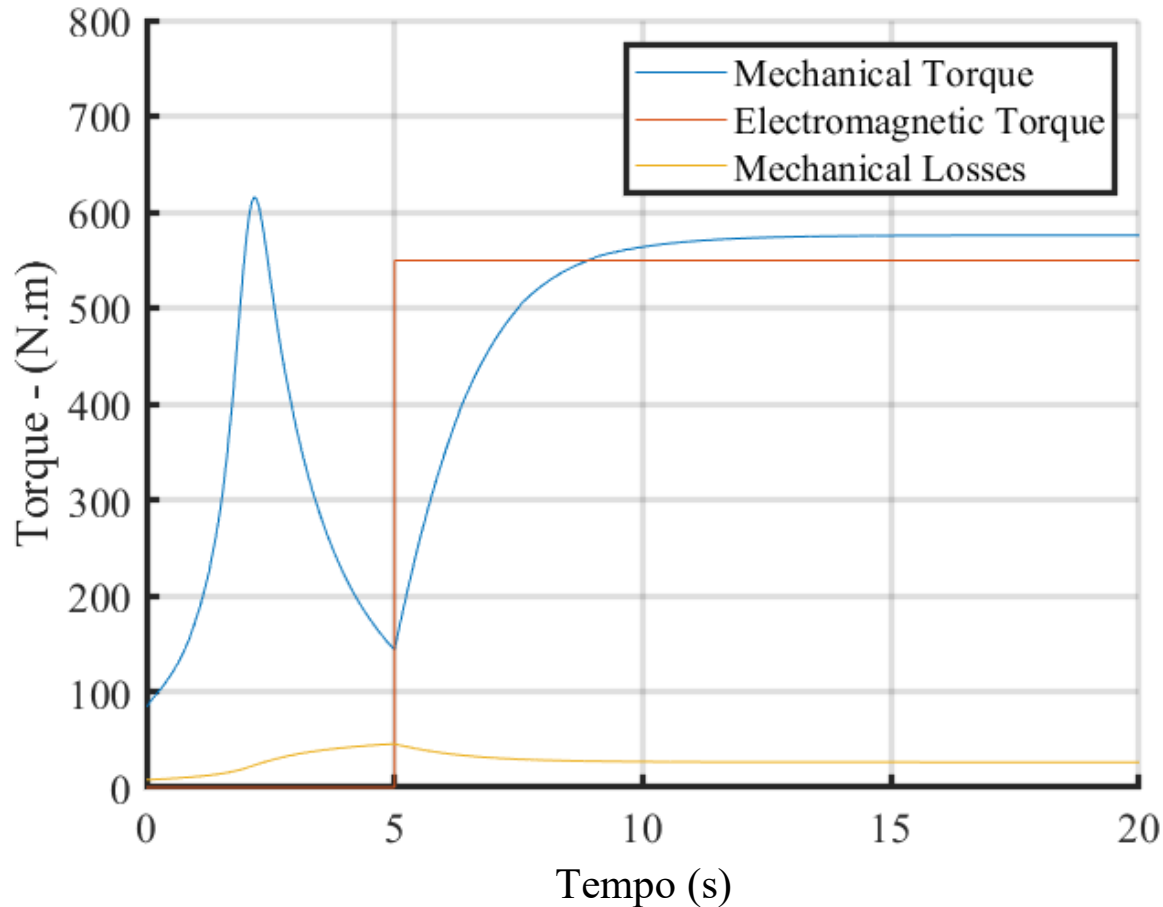


No tempo 5 s um torque eletromagnético foi aplicado, representando uma **grande carga**.

Esse torque é **maior do que o de MPP**. Por isso MPP **não é alcançado**.

Desempenho da turbina com gerador elétrico

- **Situação 3 – Torque eletromagnético + Perdas mecânicas = Torque mecânico no MPP**



No tempo 5 s um torque eletromagnético foi aplicado considerando as perdas. Essa soma representa o mesmo torque daquele **de MPP**. Logo MPP **é alcançado**.

Desempenho da turbina com gerador elétrico

O que foi observado?

É necessário controlar o fluxo de potência elétrica para que se produza um torque eletromagnético de modo que a turbina opere no MPP. Independente da velocidade do vento.

Para esse propósito um conversor de potência foi projetado com controle com “*tracking maximum power point*” (MPPT). As estratégias usadas foram:

- Controle Ótimo de Potência;
- Controle Ótimo de Torque;
- Controle Ótimo de TSR;
- Perturbe & Observe.

Fase 3 – Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência

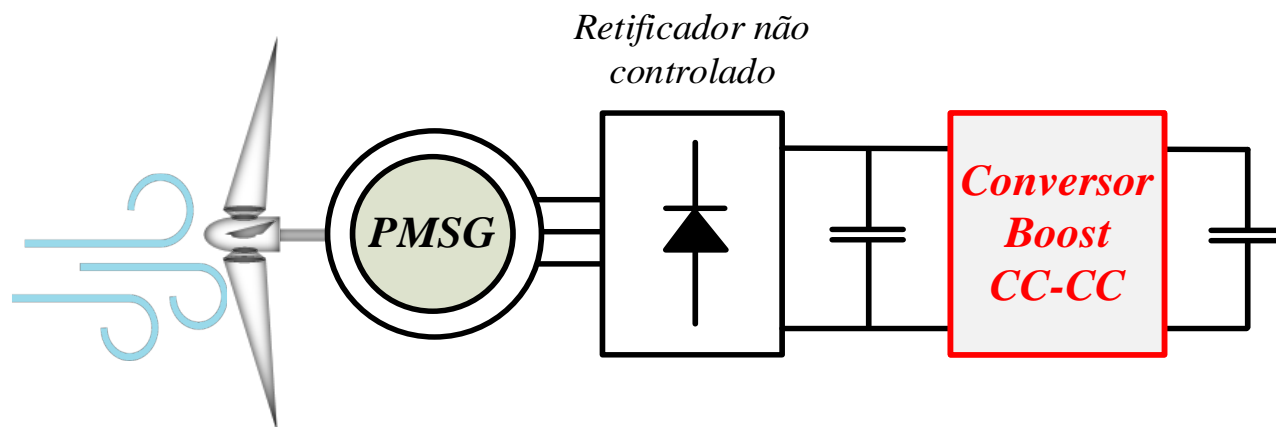
Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência ³⁴

Como o modelo foi verificado?

A literatura sobre esse conversor é consolidada. Foram comparadas as curvas características de tensão e corrente disponíveis em livros e artigos.

Principais parâmetros do conversor Boost

Indutância	1.5 mH
Resistência série equivalente da indutância	0.5 ohms
Capacitor de entrada	500 μF
Frequência de chaveamento	10 kHz



➤ Tipo do conversor de potência

- Boost clássico com retificador trifásico não controlado na entrada;
- Equações utilizadas para trabalhar em modo de condução contínua.

➤ Razões

- Topologia simples e consolidada;
- Boa combinação com sistemas elétricos autônomos/isolados com banco de baterias;
- Dependendo da constante de tempo mecânica, o estresse no torque podem ser filtrados.

➤ Técnicas de MPPT

- Controle Ótimo de Potência;
- Controle Ótimo de Torque;
- Controle Ótimo de TSR;
- Perturbe & Observe.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência ³⁵

➤ As técnicas de controle implementadas trabalham basicamente com:

- Controle de corrente;
- Controle da velocidade do rotor.

➤ A referência de controle é dada por:

- Relação da velocidade de ponta no MPP

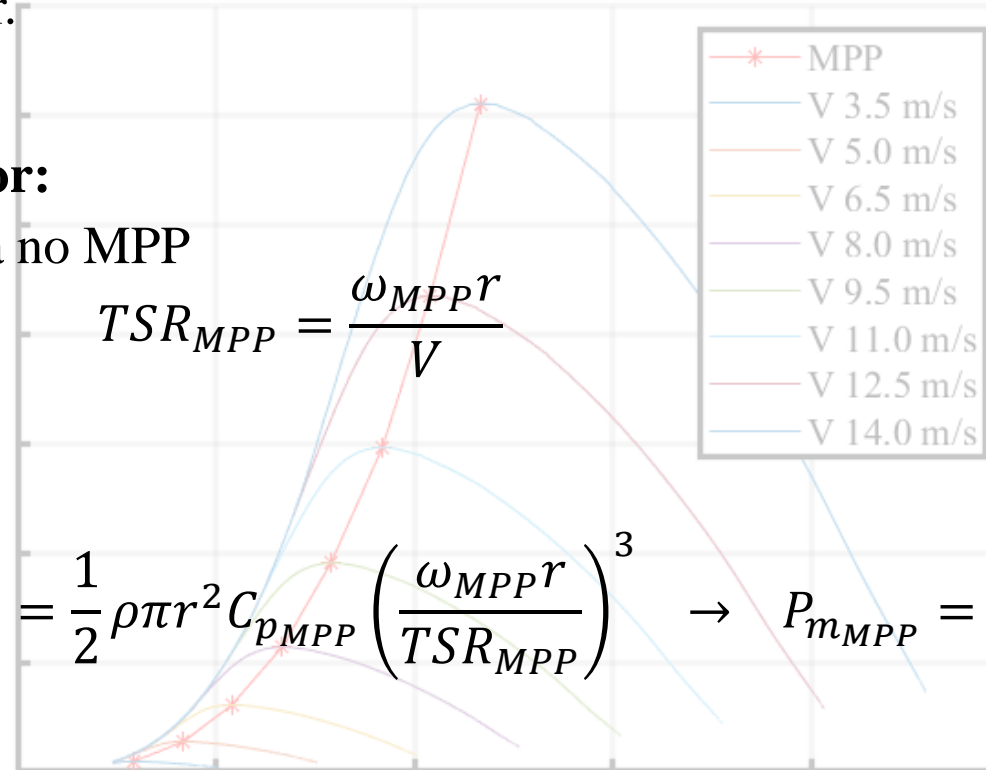
$$TSR_{MPP} = \frac{\omega_{MPP} r}{V}$$

- Potência mecânica no MPP

$$P_{m_{MPP}} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_{p_{MPP}} V^3 \rightarrow P_{m_{MPP}} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_{p_{MPP}} \left(\frac{\omega_{MPP} r}{TSR_{MPP}} \right)^3 \rightarrow P_{m_{MPP}} = \frac{1}{2} \rho \pi r^5 \underbrace{\left(\frac{C_{p_{MPP}}}{TSR_{MPP}^3} \right)}_{\text{Constante}} \omega_{MPP}^3$$

- Torque mecânico no MPP

$$T_{m_{MPP}} = \frac{P_{m_{MPP}}}{\omega_{MPP}}$$



Variáveis conhecidas da curva característica da turbina no MPP

Constante

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência ³⁶

➤ A referência de controle é dada por :

$$P_{m_{MPP}} = \frac{1}{2} \rho \pi r^5 \left(\frac{C_{p_{MPP}}}{TSR_{MPP}^3} \right) \omega_{MPP}^3 \rightarrow P_{m_{MPP}} = K_{MPP} \omega_{MPP}^3 \rightarrow \text{Constante}$$

Tendo o conhecimento dessa constante para cada velocidade do vento é possível gerar a referência de máxima potência a partir da velocidade do rotor.

➤ **Informações usadas:**

- Velocidade do rotor:

$$P_{m_{MPP}} = K_{MPP} \omega_{MPP}^3$$

- Corrente no conversor:

$$P_{m_{MPP}} - P_{electrical\ losses} = V_{in_{boost}} I_{in_{boost}}$$

Essas informações dependem de quais sensores são utilizados.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência ³⁷

➤ Controlador de corrente no conversor

- **Tipo:** controlador PI.
- **Razão:** é simples de implementar e apresenta erro nulo em regime permanente, características suficientes para este projeto.
- **Projeto:** os ganhos do controlador foram projetados para que se obtivesse uma resposta dinâmica rápida, garantindo que seja estável e “não apresente sobressinal”. Para isso, os métodos usados foram:
 - Método do Lugar das Raízes
 - Método da Resposta em Frequência

Em outras palavras, o controlador PI foi projetado para cancelar a resposta dinâmica lenta do sistema e operar com uma resposta mais rápida escolhida pelo projetista.

Para aumentar a dinâmica dessa resposta, algumas limitações foram consideradas: efeito da interface DSP¹, atraso computacional do DSP e máxima corrente suportada pelo gerador.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência³⁸

➤ Controle da velocidade do rotor

- O mesmo projeto e procedimentos do caso anterior foram usados aqui. No entanto, desta vez, a dinâmica mecânica da turbina e elétrica do gerador foram consideradas.
- O controlador de corrente é pelo menos 10 vezes mais rápido do que o controlador de velocidade. Dessa forma, é possível garantir que um controlador não interfira na dinâmica do outro.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência³⁹

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de Potência

- **Requer:**

Parâmetros da turbina: resistência do trem de potência, constante K_{MPP} para cada velocidade de vento;

Parâmetros do gerador: resistência do estator R ;

Sensor de velocidade do rotor (pode ser estimado);

Sensores de corrente e tensão.

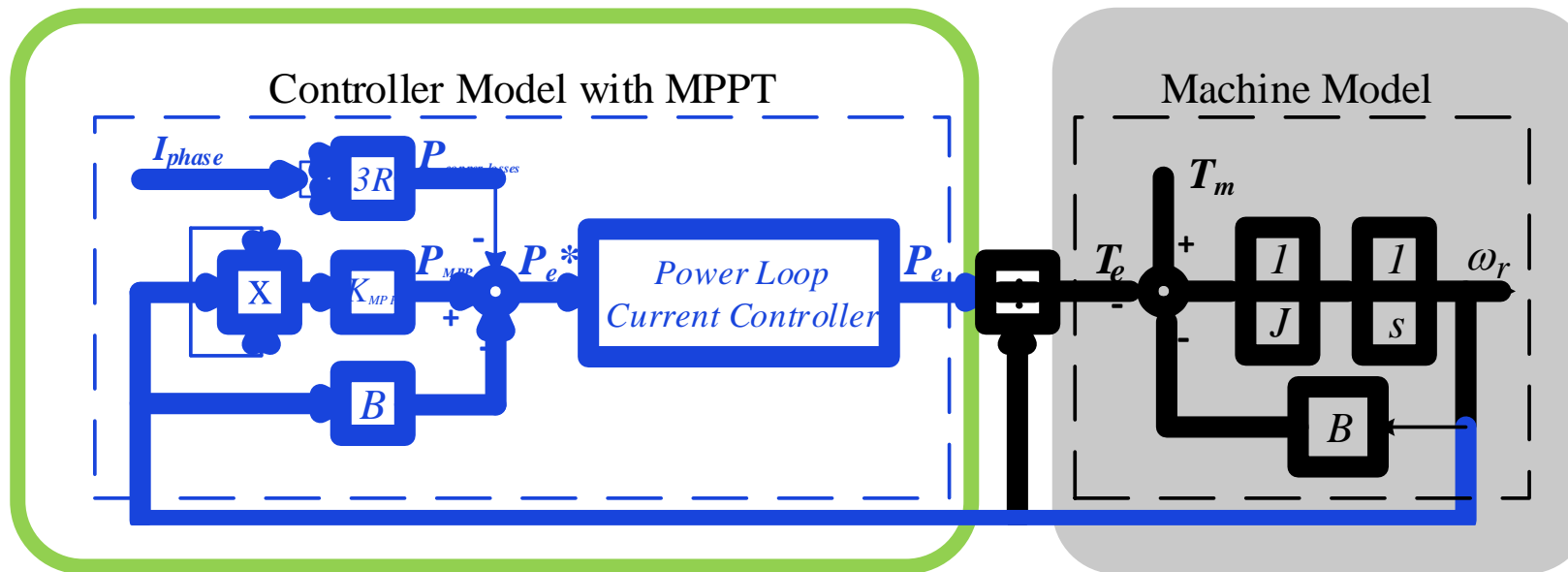
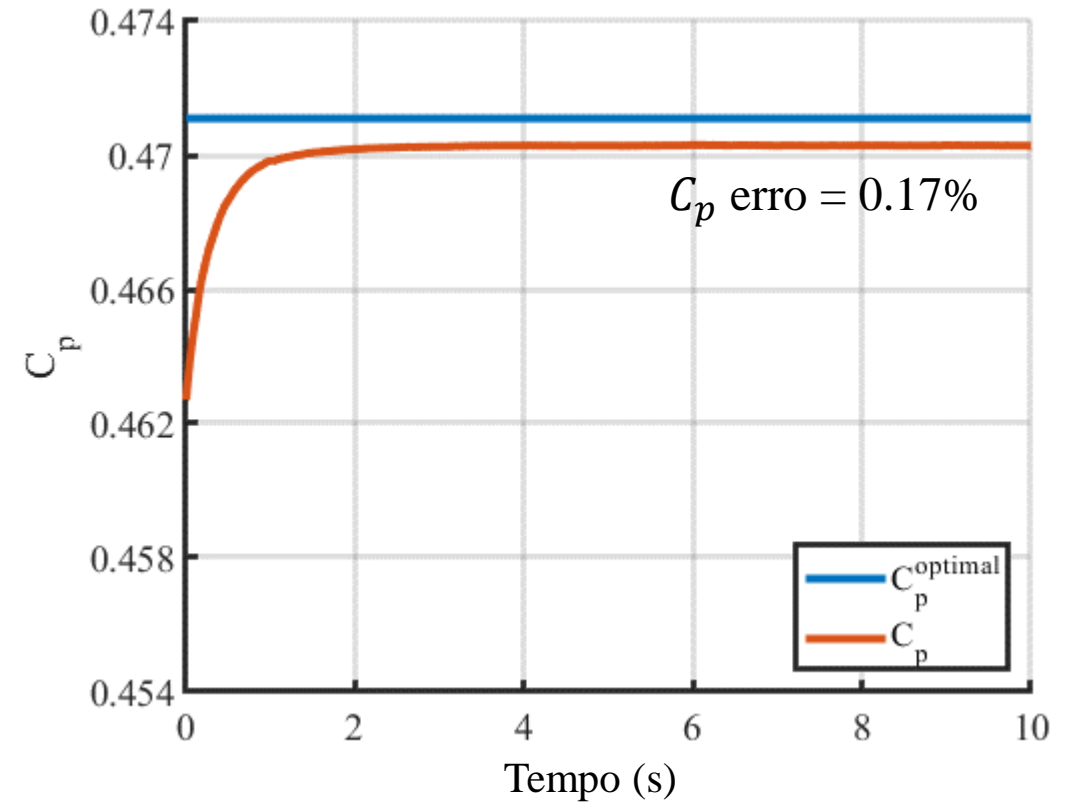
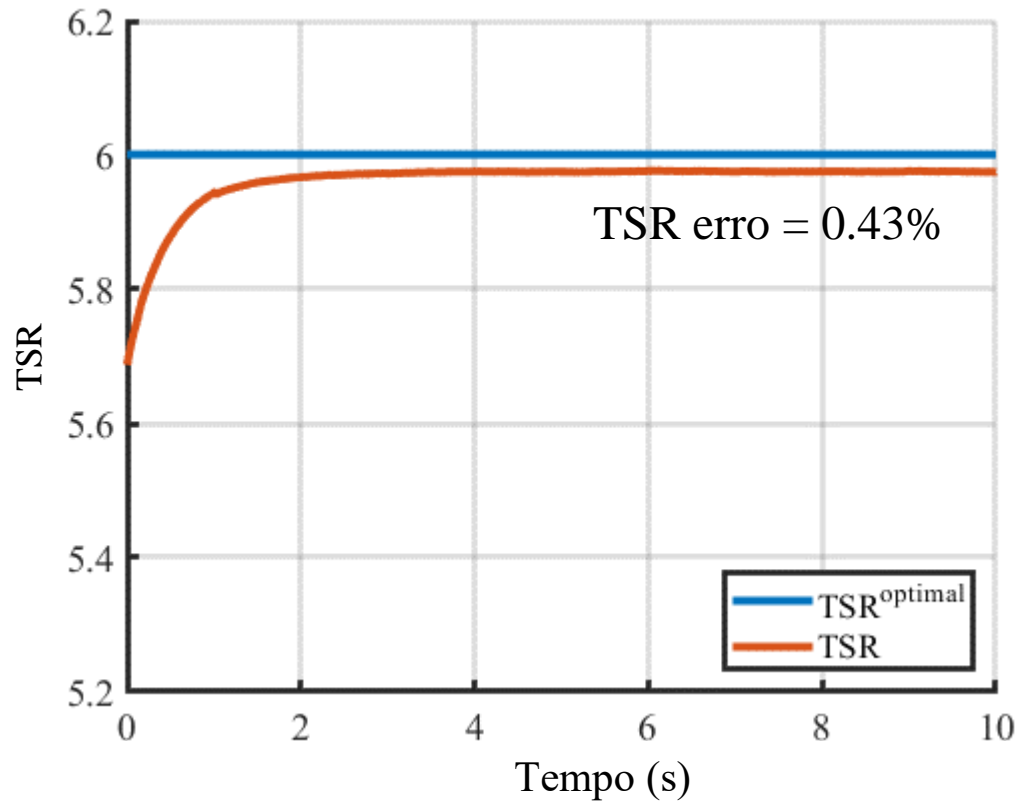


Diagrama simplificado para ilustrar o sistema com controle ótimo de potência.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴⁰

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de Potência



Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴¹

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de Torque

- **Requer:**

Parâmetros da turbina: resistência do trem de potência, constante K_{MPP} para cada velocidade de vento;

Sensor de velocidade do rotor (pode ser estimado);

Sensores de corrente e tensão.

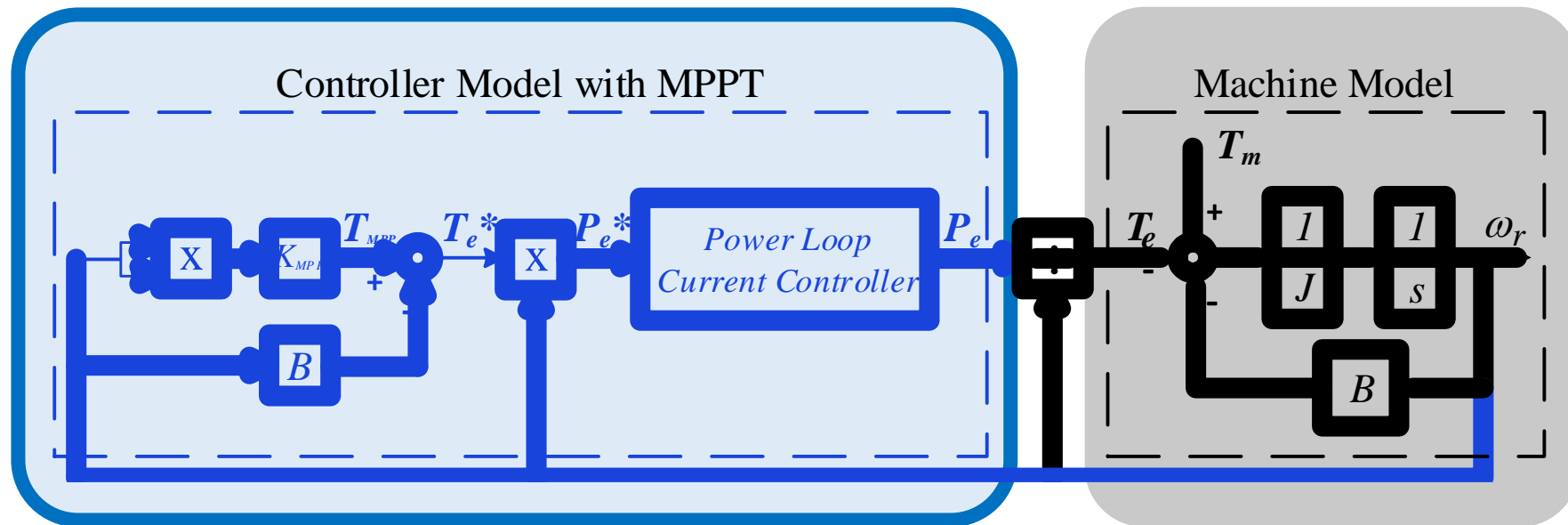
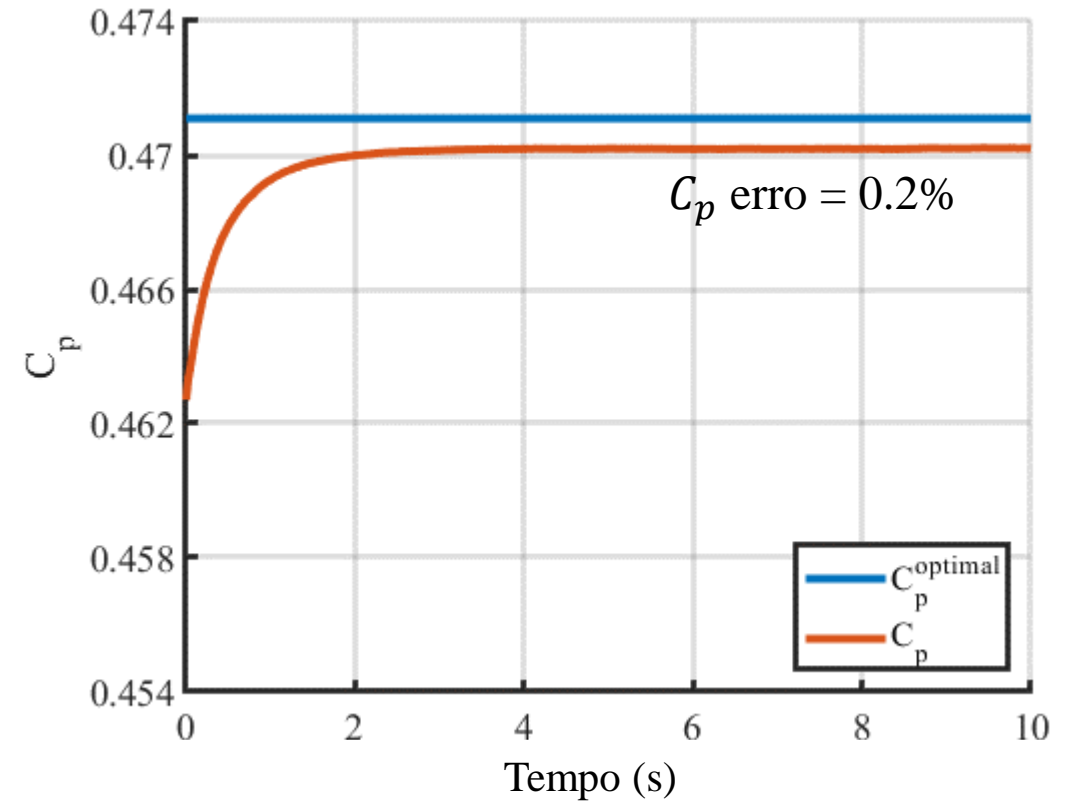
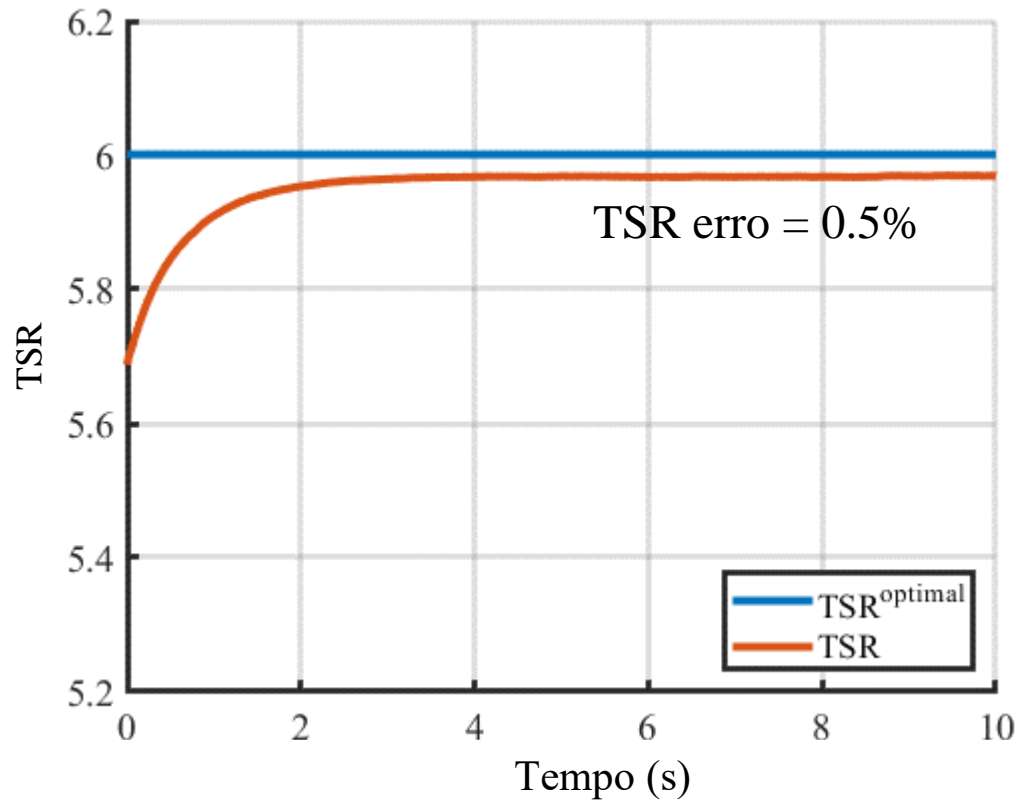


Diagrama simplificado para ilustrar o sistema com controle ótimo de torque.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴²

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de Torque



Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴³

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de TSR

• Requer:

Parâmetros da turbina: resistência do trem de potência, raio e constante TSR_{MPP} ;

Sensor de velocidade do rotor (pode ser estimado);

Sensor de velocidade do vento;

Sensores de corrente e tensão.

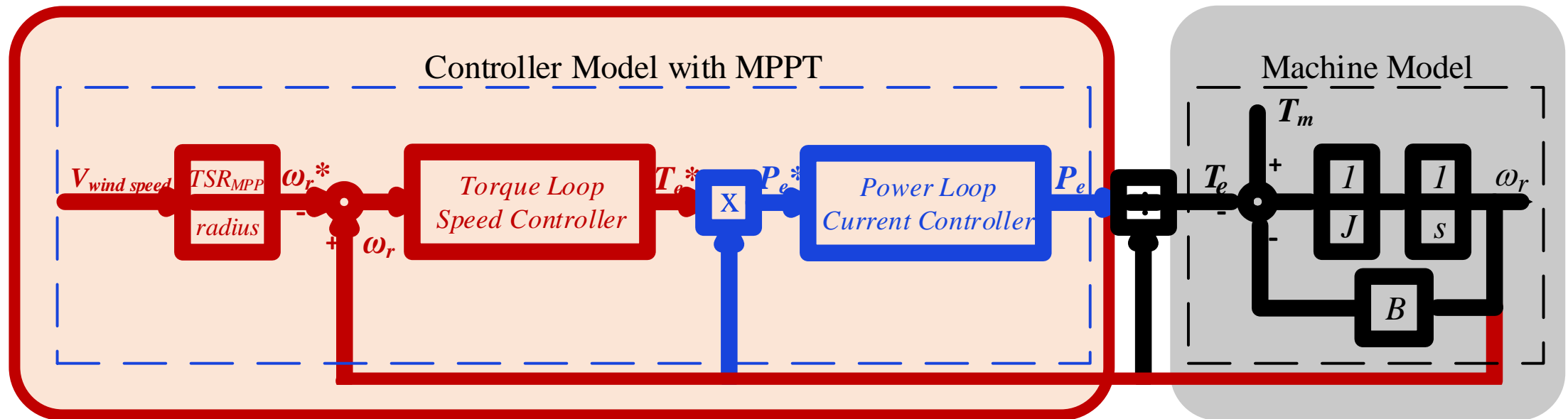
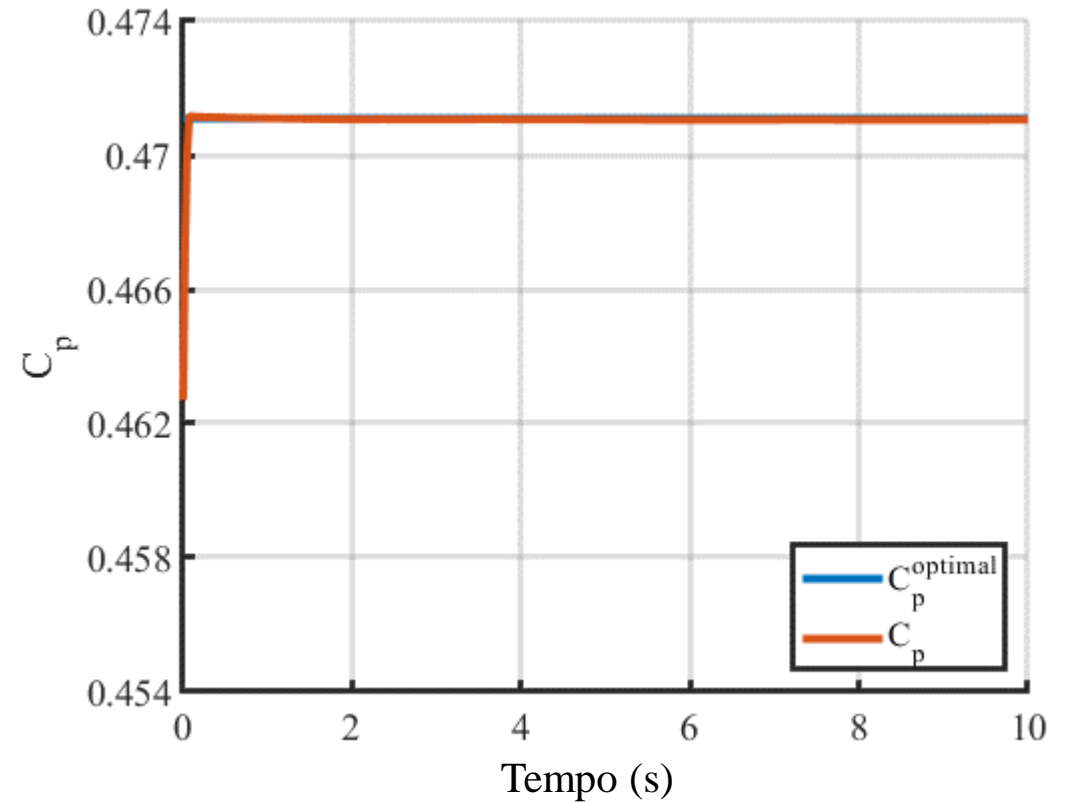
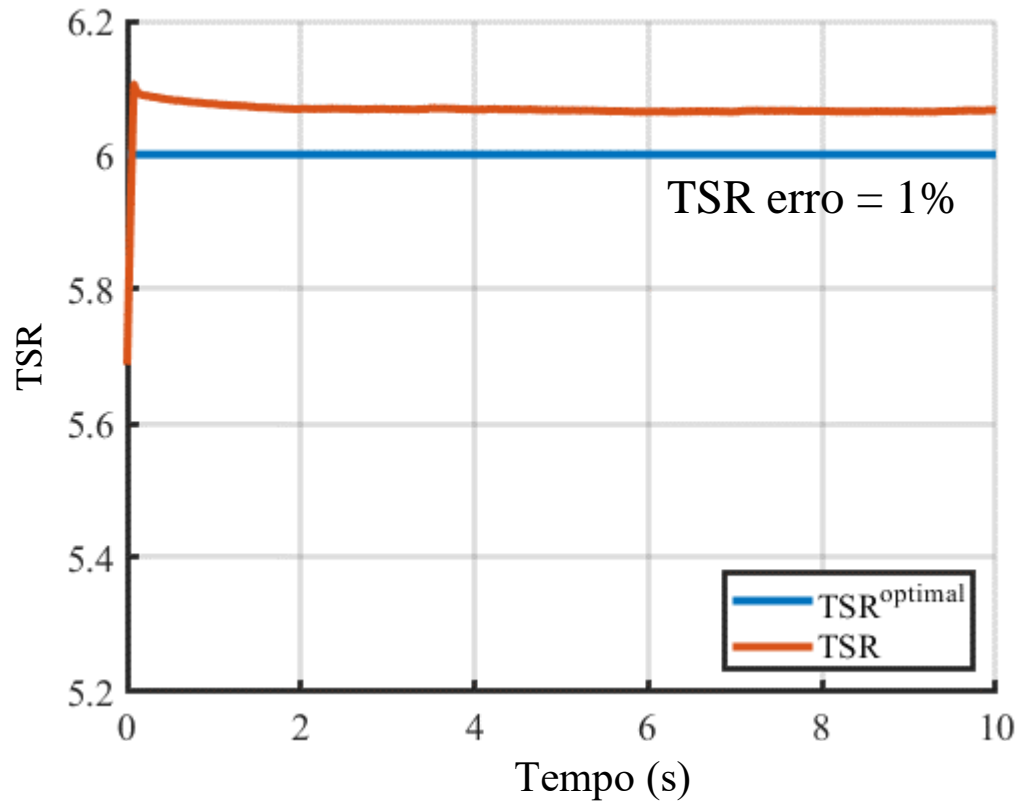


Diagrama simplificado para ilustrar o sistema com controle ótimo de TSR.

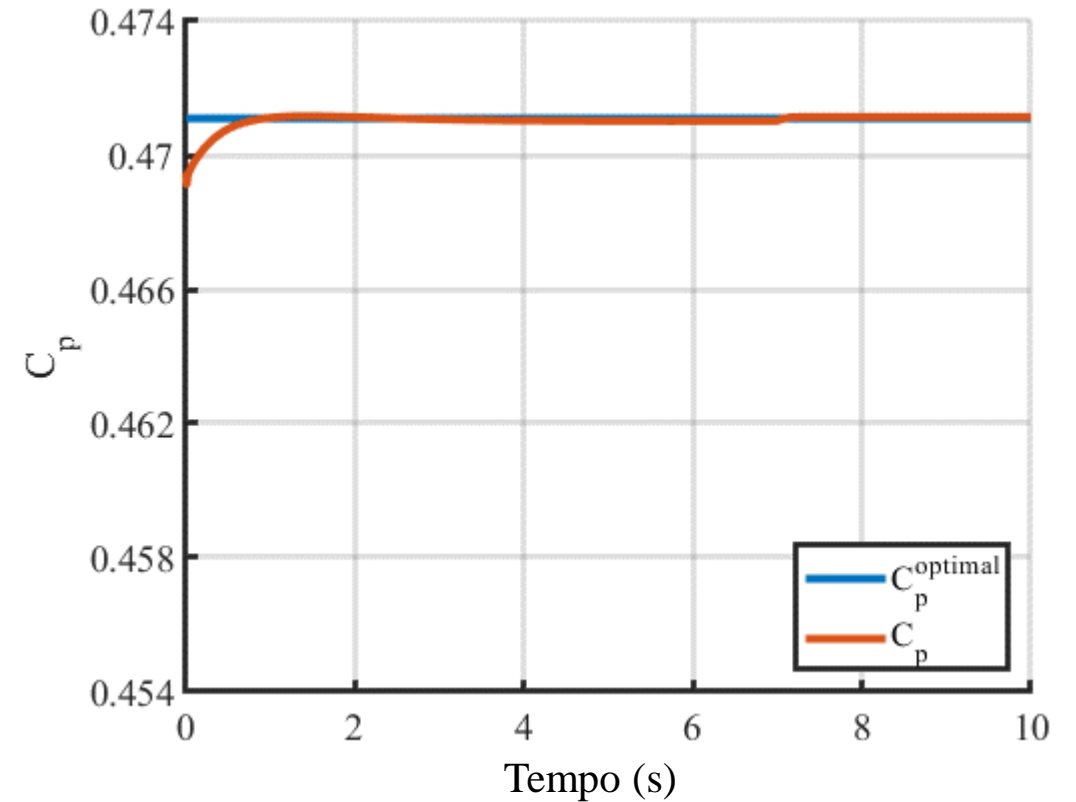
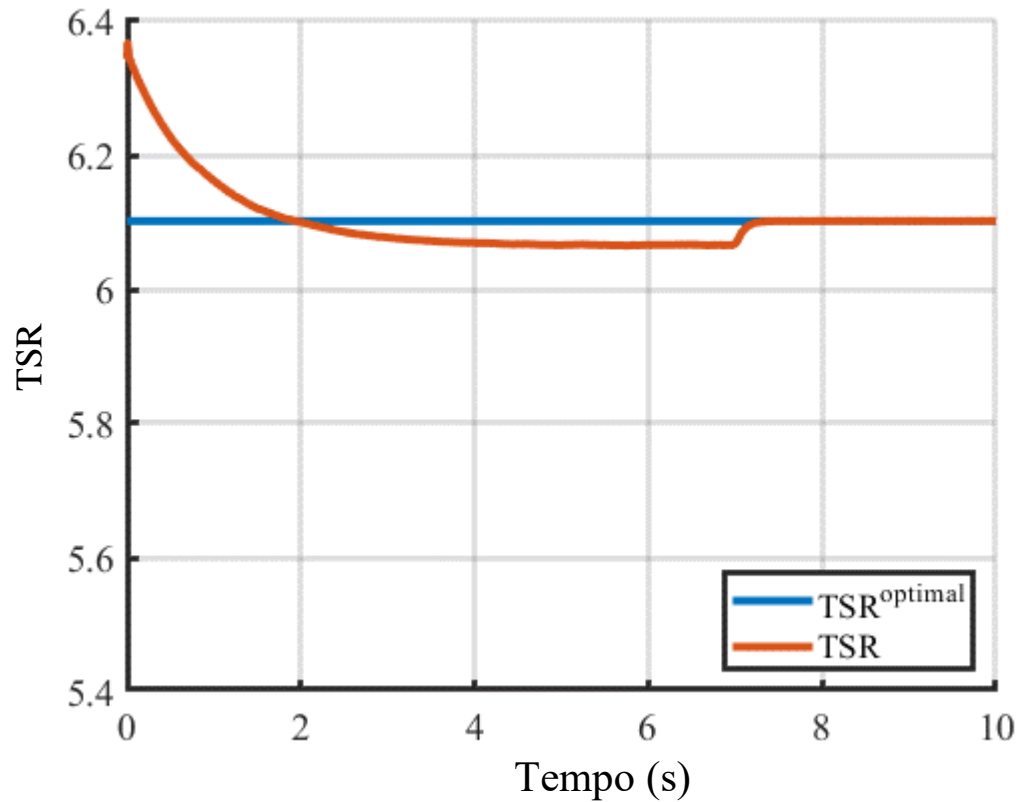
Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴⁴

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de TSR



Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴⁵

➤ MPPT usando o método de Controle Ótimo de TSR



Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴⁶

➤ MPPT usando o método de Controle Perturbe & Observe

- **Requer:**
Sensores de corrente e tensão.

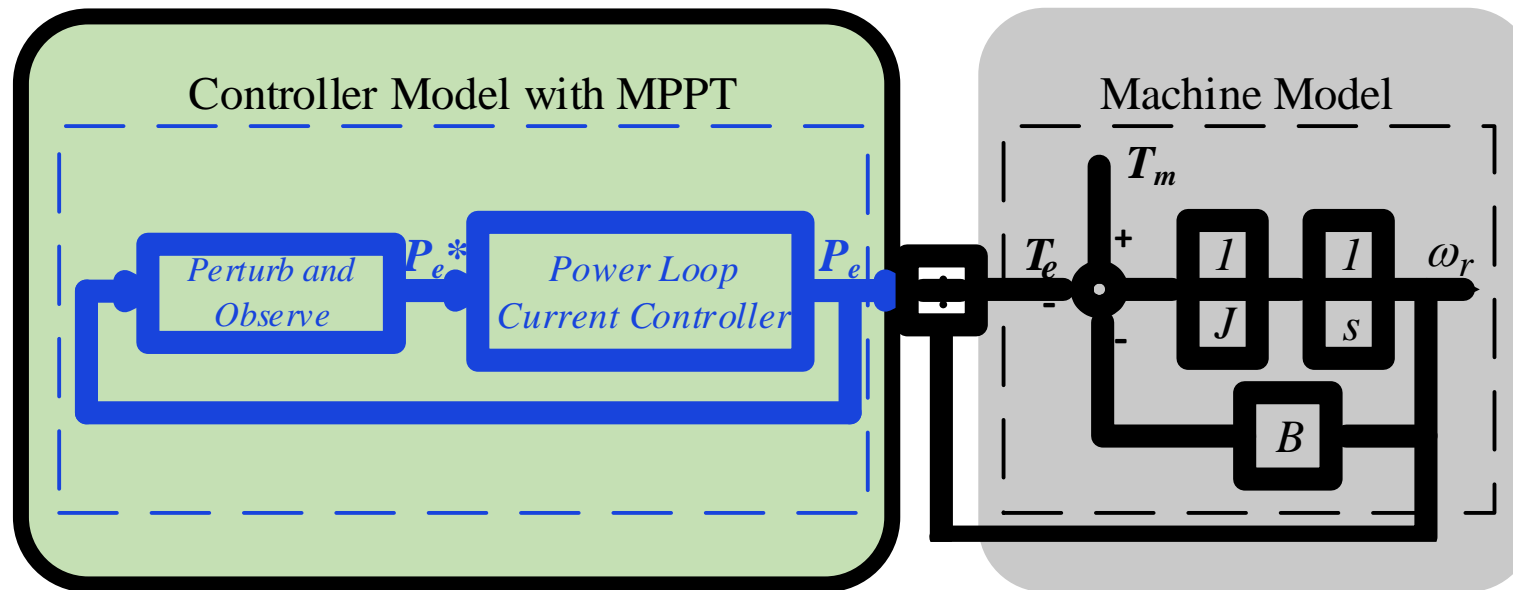
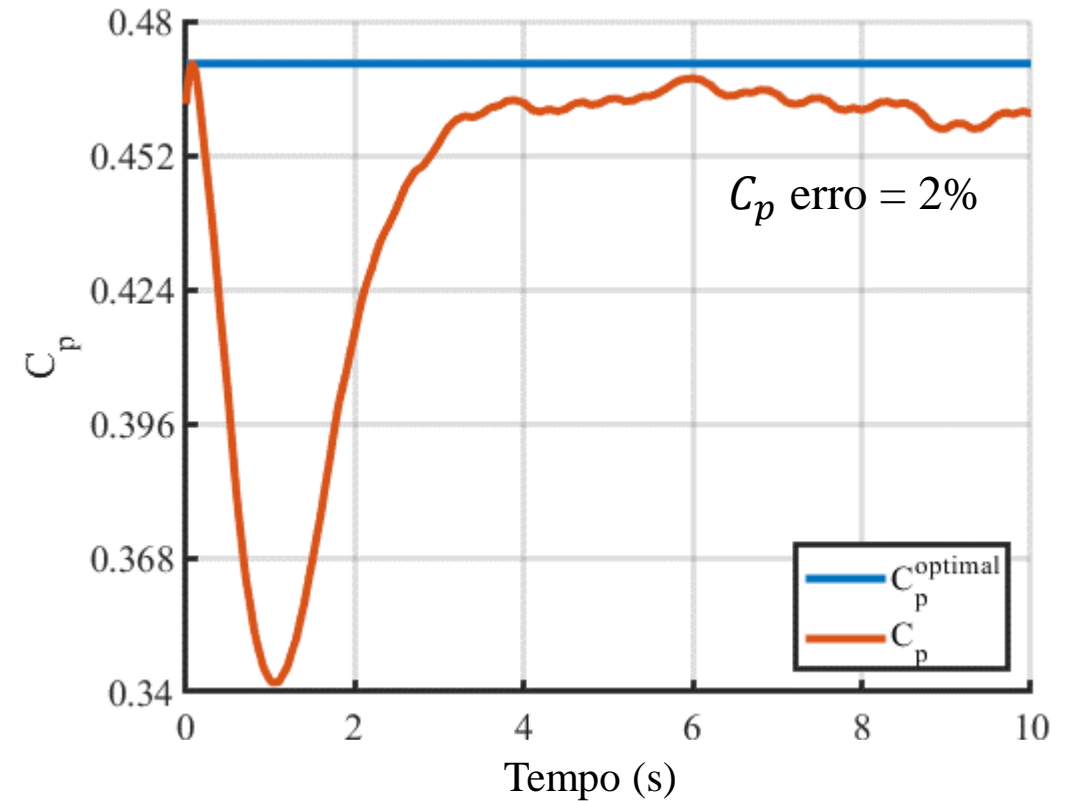
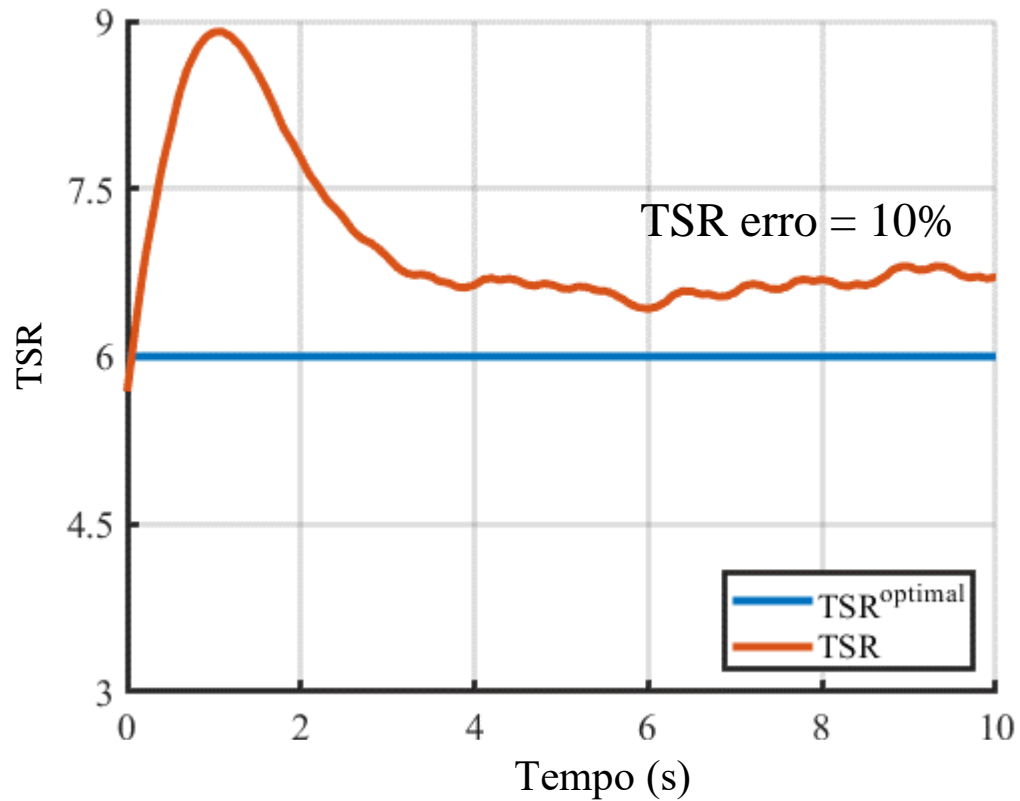


Diagrama simplificado para ilustrar o sistema com controle perturbe e observe.

Desempenho da turbina com gerador elétrico e conversor de potência⁴⁷

➤ MPPT usando o método de Controle Perturbe & Observe



Conclusões parciais

Conclusões parciais

➤ No projeto da lâmina

A escolha de altos valores de TSR produz ângulos negativos de torção. Esse tipo de geometria é desfavorável para a partida da turbina. O tempo necessário para iniciar será maior. O projetista deve levar em consideração o raio da turbina, a faixa de RPM do gerador e possíveis caixas de engrenagens.

➤ Na análise de desempenho

O método BEM implementado neste trabalho é, aparentemente, consistente com o desempenho de turbinas de médio e de pequeno porte. Porém, seria interessante estudar um maior número de turbinas para avaliar a precisão desse método.

Conclusões parciais

- Em relação à turbina, é possível projetar a lâmina para que o máximo C_p ocorra na velocidade de vento de maior ocorrência e na velocidade do rotor em que o gerador têm maior eficiência.
 - Os artigos sobre projeto otimizado de turbinas geralmente estudam a velocidade de vento de maior ocorrência e o tempo de partida da turbina. Considerar a curva de eficiência do gerador parece ser uma boa ideia para otimizar o sistema completo.
-
- Dependendo do conversor de potência utilizado, pode-se não alcançar o ponto de melhor eficiência. Isso ocorre porque alguns conversores conseguem controlar as tensões e corrente no gerador de maneira que as perdas são reduzidas. Portanto, essa curva de eficiência é melhor analisada em conjunto: gerador e conversor.
-
- Como o conversor influencia na eficiência do gerador, é mais coerente escolher um conversor que produz menores perdas no gerador. Em seguida, pode-se buscar o ponto de maior desempenho do conjunto.

Conclusões parciais

➤ A escolha do MPPT depende dos sensores utilizados

Controle	Sensores de corrente e tensão	Sensor de velocidade do rotor	Parâmetros da turbina e do gerador	Sensor de velocidade do vento	Alcança $C_{p_{optimal}}$	Alcança $TSR_{optimal}$	$C_{p_{optimal}}$ erro
TSR	O	O	O	O	O	O	0.00%
Potência	O	O	O	X	X	X	0.17%
Torque	O	O	O	X	X	X	0.20%
P & O	O	X	X	X	X	X	2.00%

- O melhor controle é o de TSR, mas é aquele que usa mais sensores. Por isso o investimento deste método é alto em relação aos demais.
- Os métodos de Potência e de Torque usam a mesma quantidade de sensores, mas o de Potência apresenta maior eficiência. Esses métodos também precisam dos parâmetros da turbina e do gerador. Quando o método de TSR não pode ser usado, o de Potência é o mais indicado quando se utiliza o conversor Boost.
- O método Perturbe & Observe é aquele que usa o menor número de sensores. Ele deve ser usado quando se deseja reduzir os custos do sistema. Apesar do erro médio mostrado ser consideravelmente maior do que os demais métodos, o Perturbe & Observe pode ser melhorado com algoritmos de otimização.

Referências

- ✓ J. F. a. M. J. G. Manwell, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, 2nd ed., 2th Edition ed., Chippingham, Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- ✓ T. Burton, D. Sharpe and N. a. B. E. Jenkins, Wind Energy Handbook, 1th Edition ed., Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- ✓ D. A. Spera, Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, New York: ASME Press, 2009.
- ✓ V. Okulov and J. Sørensen, "Refined Betz limit for rotors with a finite number of blades," Wind Energy, pp. 415-26, 2008.
- ✓ J. Vaz and W. DH, "Performance analysis of wind turbines at low tip-speed ration using the Betz-Goldstein model," Energy Conversion and Management, no. 126, pp. 662-672, 2016.
- ✓ R. Wilson, Aerodynamic behavior of wind turbines, New York, USA: Spera DA. Wind turbine technology. ASM Press, 2009.
- ✓ D. Wood, V. Okulov and D. Bhattacharjee, "Direct calculation of wind turbine tip loss," Renew Energy, pp. 95:269-76, 2016.
- ✓ H. Oliveira et al, Comparative study of different correction methods to analyze wind turbine performance, 15th IEEE COBEP/ 5th IEEE SPEC, Santos/Brazil 2019.

Thanks for your attention!!!

Corresponding author

Hércules A. Oliveira
hercules.oli@hotmail.com



SCHULICH
School of Engineering



The essence of research is to not take knowledge on trust.