

# Síntese de Controladores para Reduções de Esforços Mecânicos em Turbinas Eólicas

Autor: Vinicius de Oliveira Martins - Orientador: Jeferson Vieira Flores

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica

viniciusomartins@outlook.com; jeferson.flores@ufrgs.br

## Resumo

A implementação da energia eólica no sistema elétrico de potência visa o aumento percentual das energias renováveis e sustentáveis na demanda total, para que a tecnologia torne-se mais atrativa e competitiva é necessário reduzir seu custo médio de produção e operação. Uma das formas de fazer isso é aumentar o tamanho da estrutura, ou seja, pás e torre, resultando num aumento nas cargas mecânicas estáticas e dinâmicas. A solução para a minimização dos esforços mecânicos pode ser dada através da aplicação de métodos de controle como o IPC (do inglês, *Individual Pitch Control*) que, atuando individualmente no ângulo de cada pá, pode fazer com que a deflexão da torre seja minimizada para pequenas variações de uma dada condição de operação. Para a validação destes métodos de controle, são realizadas simulações numéricas a partir dos softwares MATLAB e FAST (do inglês, *Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence*). No FAST, são simuladas as características mecânicas da turbina, enquanto no MATLAB são implementadas as rotinas de controle.

## Introdução

### Turbinas Eólicas

- A energia do vento é uma fonte de energia limpa e renovável;
- Redução do custo total da energia elétrica gerada dá origem a turbinas eólicas cada vez maiores;
- Estudos mostram que é mais eficiente economicamente a construção de parques eólicos com um número pequeno de turbinas de grandes proporções;
- Quanto maiores as pás do rotor, mais fortes são os efeitos da não-homogeneidade do vento;
  - Carga mecânica assimétrica em cada uma das pás.
- Esta carga associada é um sinal periódico com período variante no tempo e dependente da velocidade nominal do vento;
- Redução dos esforços mecânicos aos quais a turbina está sujeita através do controle do ângulo das pás.
  - Coletivo (Collective Pitch Control - CPC);
  - Individual (Individual Pitch Control - IPC).

### FAST

- Software distribuído pela NREL (do inglês: *National Renewable Energy Laboratory*)
- Responsável por integrar as dinâmicas da parte elétrica e mecânica do sistema através dos seus módulos de simulação.
- Possibilita ferramentas para:
  - Linearização do modelo para ponto de operação especificado;
  - Especificação do modelo não-linear adotado nas simulações com o *Simulink*;
  - Previsão da dinâmica do sistema para distúrbios.
- Os blocos que compõem o FAST estão dispostos no diagrama da figura 1.

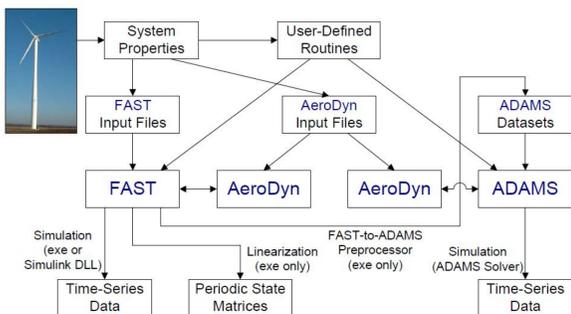


Figura 1: Blocos que compõem o FAST.

### MATLAB

- Possibilita o uso do Simulink (ferramenta de desenvolvimento por diagrama de blocos);
- Modelos não-lineares podem ser simulados com controladores baseados em sistemas linearizados;
- A figura 2 mostra o bloco do compatível com o MATLAB responsável pela interpretação das informações gravadas nos modos de operação.

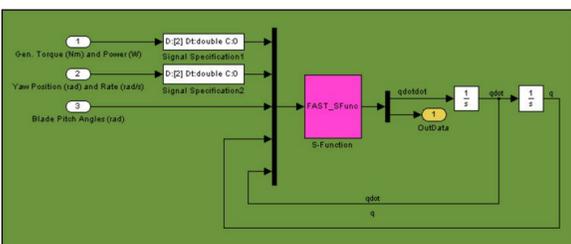


Figura 2: Simulink: Bloco não-linear do sistema.

### Controle

- Os modelos linearizados são dados em espaço de estados e são controlados através de métodos de controle clássicos ou modernos.
- Clássico
  - São definidas as funções de transferência de uma saída para uma entrada para que a teoria de controle clássica possa ser aplicada.
- Moderno
  - O modelo em espaço de estados é utilizado para definir a matriz de ganho para realimentação de estados;
  - Permite o uso de observadores de estados para realimentar estados não mensuráveis;

→ Introdução de critério de desempenho como tempo de acomodação e minimização da energia do sinal de controle/estados.

### Objetivos

- Estudar o comportamento da WT (do inglês, *Wind Turbine*) para os graus de liberdade relativos às deflexões da torre e das pás;
- Estabelecer método de simulação e documentá-lo;
- Elaborar controladores básicos e avançados que atendam ao objetivo da pesquisa;

### Simulação

- O vento é especificado, no *wind file*, com sua velocidade, direção, distúrbios e cortantes;
- O sistema inicia a operação com a velocidade do vento em  $14m/s$ , que é alterada em  $t = 40s$  para  $18m/s$ ;
- São considerados apenas o primeiro modo de vibração das pás e da torre.

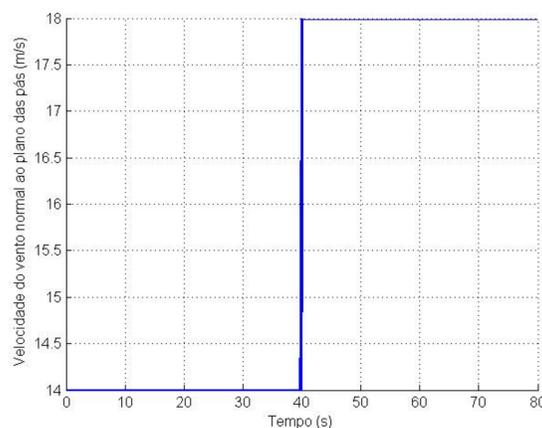


Figura 3: Perfil do vento.

### Malha aberta

- Simulação realizada para ângulo das pás em  $11^\circ$ ;
- A velocidade do rotor sofre alteração a quando a velocidade do vento é alterada;
- A deflexão da torre também aumenta com o degrau aditivo na velocidade do vento;

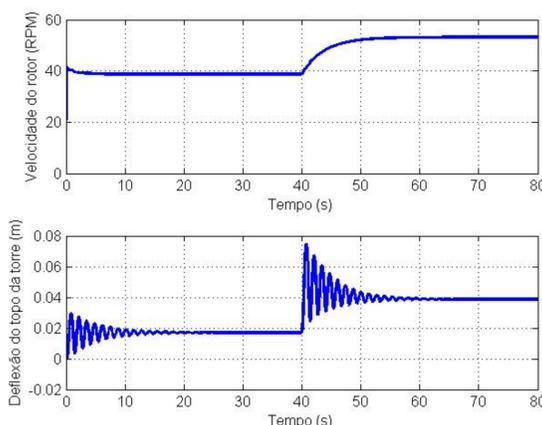


Figura 4: Simulação em malha aberta.

### Malha fechada - Controle de Velocidade do Rotor

- Dinâmica das 3 pás é a mesma para a velocidade do rotor;
- Ponto de operação (dado pela linearização):
  - Velocidade do vento:  $18 \frac{m}{s}$ ;
  - Ângulo das pás:  $11^\circ$ ;
- Controladores PI e CPC.

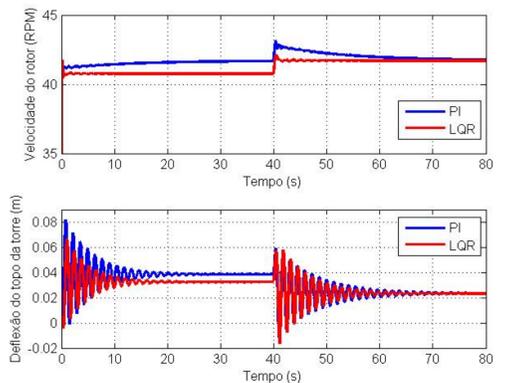


Figura 5: Controle de velocidade do rotor.

### Controle de Esforços Mecânicos

- Condição para componente cíclica: Desequilíbrio entre a velocidade do vento ao longo do plano das pás, podendo ser horizontal ou vertical;
- Análogo ao desequilíbrio de cargas em um sistema trifásico;
- Desequilíbrio horizontal pode ser resolvido com controle do ângulo de guinada (em inglês, *Yaw Angle*);
- Desequilíbrio vertical pode ser minimizado com ação individual no ângulo das pás.

A figura 6 mostra o efeito de um cortante vertical adicionado ao sistema em malha aberta e regime permanente.

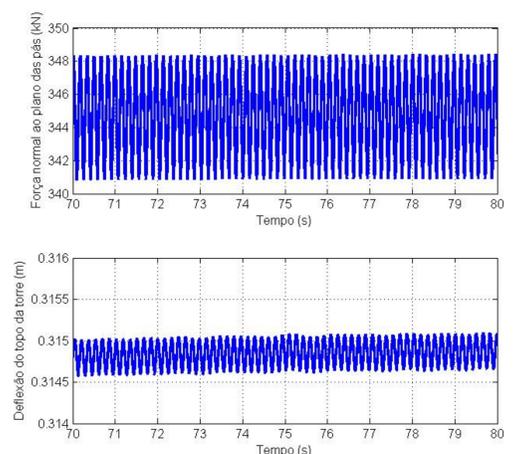


Figura 6: Operação em malha aberta e regime permanente para um vento com componente cortante vertical.

- O desequilíbrio provoca oscilações com frequência múltipla da velocidade do rotor;
- Torna-se necessário a utilização da MBC (do inglês: *Multi-Blade Coordinate Transformation*) para sinais associados ao sistema de coordenadas do rotor, ou seja, sistema de coordenadas rotativo.

### Documentação

A documentação realizada durante o processo de pesquisa tem o intuito de prover suporte aos possíveis usuários dessas simulações. Contendo os seguintes itens:

- Manual de instalação do FAST v7;
- Testes de certificação compatíveis com a versão 7 do simulador;
- Problemas resolvidos na integração entre FAST e MATLAB.

### Conclusões

- Com o aumento do ângulo das pás no controle coletivo de velocidade, os esforços mecânicos diminuem pois a interação vento-pá é menor;
- A adição de cortantes no vento é mais significativa com o aumento do tamanho das WT's;
- A oscilação em regime permanente aumenta os custos de operação.

### Trabalhos Futuros

- Identificar frequências com amplitudes relevantes para o sistema com vento com cortante vertical;
- Passar os sinais dos esforços nas pás para o referencial fixo, através do MBC;
- Compensar as vibrações com controladores ressonantes;
- Verificar o efeito dos cortantes para diferentes WT's.