



# Universidade: presente!

UFRGS  
PROPEQS



## XXXI SIC

21.25. OUTUBRO • CAMPUS DO VALE

# Síntese de Controladores Escalonados em Turbinas Eólicas

Autor: Maurício Ohse Lourencena - Orientador: Jeferson Vieira Flores

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

mauricioohsexd@hotmail.com; jeferson.flores@ufrgs.br

### Resumo

A energia eólica vem ganhando espaço na matriz energética brasileira devido a sua sustentabilidade e eficiência. Historicamente, utilizam-se técnicas clássicas de controle para a operação das turbinas eólicas, controlando-se a velocidade e adaptando o ângulo das pás para manter a velocidade de rotação do rotor constante. O objetivo de pesquisa, portanto, fora o controle de turbinas eólicas. O projeto de controladores clássicos (PI) baseia-se na linearização do sistema em torno de um ponto de intensidade de vento. Como turbinas são sistemas não lineares que operam em diversas intensidades de vento, o controle clássico não garante a melhor performance para todo o alcance de operação. Assim, desenvolveu-se um controlador PI escalonado. O controlador escalonado leva em consideração múltiplos pontos de operação, a partir de um modelo linear variante no tempo.

## 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.
- Dependendo da velocidade do vento a velocidade do rotor da turbina varia.
- Para a ótima extração de potência a esta velocidade deve ser regulada a um valor constante.

### 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.
- O software possui interface com *MATLAB*, permitindo a utilização dessa ferramenta no auxílio das simulações por diagramas de blocos.

### Objetivos

- Regulação de velocidade do rotor da turbina via controle coletivo do ângulo das pás (Collective Pitch Control - CPC).
- Projeto de controladores para diferentes pontos de operação (velocidade do vento)
- Utilização de técnicas de escalonamento de controladores.
- Comparação entre controladores com e sem escalonamento.

### Regiões de operação

- Com o estudo das turbinas eólica, identificou-se que as mesmas possuem 5 diferentes regiões de operação (figura 2), determinadas pela velocidade de rotação do rotor.
- A região 1 é a região de *cut-in*, isto é, antes da turbina gerar energia.
- A região 1½ é a região de *start-up*, uma transição entre a região 1 e 2.
- A região 2 é a região em que se otimiza a potência elétrica fornecida. Aqui, o torque elétrico é proporcional ao quadrado da velocidade do rotor para manter uma TSR constante (situação ótima).
- Na região 3, a potência gerada é constante, onde a turbina supre a potência nominal e controla-se o ângulo das pás para manter a velocidade nominal.

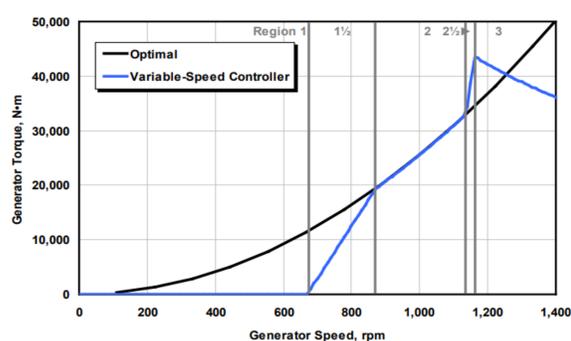


Figura 1: Regiões de operação da turbina de 5MW.

### Controle

- Nessa pesquisa, buscou-se a regulação da velocidade do rotor na região de operação nominal, isto é, na região 3. Assim, ajusta-se o ângulo das pás da turbina para diminuir a captação da energia do vento, com o objetivo de manter a velocidade de rotação constante em um valor nominal.
- O modelo da turbina na terceira região é não-linear, porém, para um dado ponto de operação, o sistema pode ser considerado linear para pequenas variações de vento, ângulo das pás e velocidade de rotação.
- Técnicas de controle clássico (estrutura Proporcional-Integral, PI) e controle escalonado foram aplicadas na regulação da velocidade em toda região 3
- Clássico
  - Obtém-se um modelo linear do sistema para uma velocidade de vento constante. Seleciona-se um vento intermediário na faixa de operação da turbina.
  - Utilizando o método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR), a partir do modelo linear obtém-se um controlador PI que possui desempenho especificado nesta condição.
- Escalonado
  - A partir da linearização do sistemas em pontos de operação distintos (velocidade de vento distinta), projeta-se o controlador seguindo método anterior para cada um dos pontos obtidos.
  - O controlador escalonado interpola os ganhos com base na variável de parametrização, neste caso, a velocidade do vento.
  - Seja  $\Theta_1 < \Theta(t) < \Theta_2$  a velocidade do vento para  $t \in [t_1, t_2]$ . Seja  $G_1(s)$  o modelo do sistema para  $\Theta(t) = \Theta_1$  e  $G_2(s)$  o modelo do sistema para  $\Theta(t) = \Theta_2$ , pode-se obter o controlador escalonado.
  - Supondo  $C_1(s)$  o controlador projetado para  $G_1(s)$  e  $C_2(s)$  o controlador projetado para  $G_2(s)$ , então a estratégia escalonada assume

$$C(s, t) = C_1(s) \cdot \alpha(t) + C_2(s) \cdot (1 - \alpha(t)) \quad (1)$$

Onde  $\alpha(t)$  é

$$\alpha(t) = \frac{\Theta(t) - \Theta_{t_2}}{\Theta_{t_1} - \Theta_{t_2}} \quad (2)$$

→ O mesmo procedimento é aplicado em todo o intervalo de operação, ou seja,  $\Theta(t) \in \bigcup_{i=1}^{K-1} [\Theta_i, \Theta_{i+1}]$

### Projeto dos Controladores

- Obteve-se as linearizações do sistema em três pontos de operação distintos, para as velocidades de vento de 14, 18 e 22m/s.
- A partir dessas linearizações, projetou-se um controlador PI a partir do método LGR para requisito de desempenho de:
  - *Overshoot* máximo de 20%
  - Tempo de acomodação máximo de 5 segundos
- As constantes obtidas estão dispostas na tabela 1.

	Velocidade do vento (m/s)		
	14	18	22
Kp	0,079	0,06	0,09
Ki	0,12	0,06	0,077

Tabela 1: Ganhos obtidos a partir das linearizações.

### Controlador sem Escalonamento

- Controlador PI na forma  $C_{PI}(s) = K_i/s + K_p$ ;
- Para obter o melhor desempenho no alcance de operação, utiliza-se os ganhos obtidos na linearização central com vento de 18m/s, onde obteve-se  $K_i = 0,06$  e  $K_p = 0,06$

### Controlador com Escalonamento

- A partir dos 3 controladores PI obtidos na tabela 1 com o método de LGR, obtém-se o controlador escalonado utilizando as equações 1 e 2 nos intervalos de vento [14, 18] e [18, 22].
- O ganho dinâmico do controlador escalonado depende da intensidade de vento.

### Simulação

- A figura 2 representa a resposta em malha aberta do sistema sob efeito da variação do vento. Utilizou-se ângulos das pás fixo em 8,7°. Como não há controle dos ângulos das pás, conforme aumenta-se a intensidade do vento, aumenta-se a velocidade do rotor.

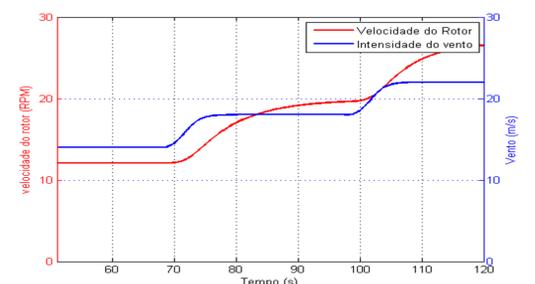


Figura 2: Perfil do vento e velocidade do rotor.

- Nas figuras 3 e 4 mostra-se, respectivamente, a velocidade de rotação e o sinal de controle do sistema comparando o controlador com e sem escalonamento para o perfil de vento da figura 2.

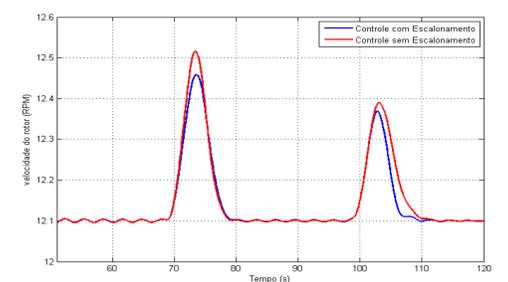


Figura 3: Comparação controle de velocidade do rotor com PI simples e PI escalonado.

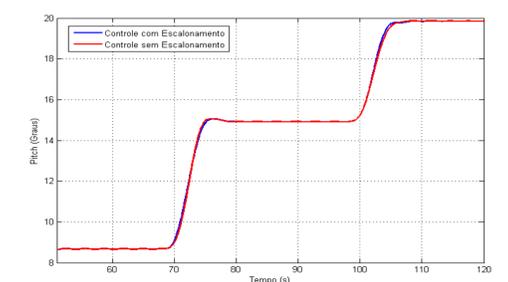


Figura 4: Sinais de controle PI simples e PI escalonado.

- Ambos controladores regularam a velocidade do rotor para o valor nominal de 12,1RPM
- O controlador escalonado possui *overshoot* 10% menor e mesmo tempo de acomodação que o controlador sem escalonamento para o perfil de vento selecionado;
- O sinal de controle de ambos controladores possui pouca diferença.

### Conclusão

- O desempenho do controlador escalonado fora próximo do desempenho do controlador sem escalonamento.
- O modelo da turbina se altera pouco no intervalo de vento estudado.
- Portanto, para a turbina e o intervalo de operação em questão, não se justifica a utilização do controle escalonado.

### Trabalhos Futuros

- Adição de um laço de *anti-windup* para melhoria do desempenho nas transições das regiões de operação.
- Controle da turbina em outras regiões de operação.
- O uso de controle individual das pás para redução de efeitos assimétricos do vento.