

Projeto de controle baseado em dados para a regulação de velocidade do rotor em turbinas eólicas

Maurício O. Lourencena* Jeferson Vieira Flores*
Lucíola Campestrini*

* Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), RS.
(e-mails: {mauricio.ohse, jeferson.flores, luciola}@ufrgs.br)

Abstract: This article presents the application of the Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) method in rotor speed regulation of wind turbines through collective pitch control. From data collected on the simulated turbine, a Proportional Integral (PI) controller is designed such that the closed-loop system exhibits a behavior as close as possible to a given reference model. Fundamental aspects for the application of the VRFT method will be analyzed, such as the choices of reference model and operating point for data collection. Simulations in the FAST software considering a 5MW turbine illustrate the method when tracking rotor speed references and rejecting disturbances in the wind speed.

Resumo: Esse artigo apresenta a aplicação do método *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT) na regulação da velocidade do rotor de turbinas eólicas através do ajuste coletivo do ângulo das pás. A partir de dados coletados em ensaio simulado da turbina, um controlador Proporcional Integral (PI) é projetado tal que o sistema em malha fechada apresente um comportamento o mais próximo possível do definido por um modelo de referência. Serão analisados aspectos fundamentais para a aplicação do método VRFT como as escolhas do modelo de referência e do ponto de operação para a coleta de dados. Simulações no software FAST considerando uma turbina de 5MW ilustram o comportamento do método no seguimento de referências de velocidade do rotor e na rejeição de distúrbios na velocidade do vento.

Keywords: VRFT; Wind Turbine; Data-Driven Control; PID Control; FAST.

Palavras-chaves: VRFT; Turbina Eólica; Controle Baseado em Dados; Controle PID; FAST.

1. INTRODUÇÃO

Turbinas eólicas visam extrair energia cinética do vento que incide sobre suas pás. Dependendo da velocidade do vento incidente, há distintas regiões de operação com seus respectivos objetivos de controle. Quando a velocidade do vento é suficiente para que a turbina produza a sua potência nominal, o ângulo das pás (ângulo de *pitch*) é ajustado visando regular a velocidade de rotação do rotor tal que o torque elétrico gerado seja mantido constante (Inthamossou et al. (2014)). Isso geralmente é feito pela imposição de um mesmo valor de ângulo para todas as pás, na estratégia de *Collective Pitch Control* – CPC. Para esse objetivo de controle, usualmente é utilizado um controlador proporcional-integral (PI) (Houtzager (2011); Castro et al. (2017)).

A grande maioria dos métodos de controle encontrados na literatura são baseados no modelo matemático da turbina eólica. Por se tratar de um sistema não linear dependente da intensidade de vento incidente, é comum a utilização

de modelos aproximados de baixa ordem (Hansen et al. (2005)), aproximações obtidas numericamente a partir de softwares de simulação como o FAST (Jonkman and Buhl (2005)) ou modelos identificados a partir de métodos como o *Predictor-Based Subspace Identification* (Houtzager (2011)).

Métodos de controle baseado em dados surgem como alternativa aos métodos baseados em modelos para o projeto de controladores. A partir de dados obtidos em ensaios na planta, esses métodos projetam um controlador que minimiza um dado critério de desempenho. Quando o objetivo é o seguimento de referências, o método *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT) considera um critério \mathcal{H}_2 associado à diferença entre o desempenho do sistema controlado e do definido por um dado modelo de referência. Esse método é de simples implementação pois necessita a coleta de apenas um conjunto de dados na planta e tem solução baseada em mínimos quadrados (Bazanella et al. (2012)). Suas primeiras aplicações foram no contexto de processos industriais e plantas químicas (Campestrini et al. (2016)), porém pesquisas recentes mostram que esse método apresenta bons resultados quando aplicado em outras áreas, como no controle de guindastes (Roman et al. (2019)) e de conversores de potência (Remes et al. (2021)).

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), PQ 305031/2021-0.

Neste trabalho, é apresentada a aplicação do método VRFT no projeto de controladores PI visando a regulação de velocidade do rotor de turbinas eólicas via CPC. A partir de uma turbina de 5MW comumente utilizada como padrão na literatura (Jonkman et al. (2009)) e de simulações numéricas no software FAST, são apresentadas diretrizes gerais para guiar o projetista na escolha do modelo de referência e do ponto de coleta de dados. Também é apresentada uma comparação entre o controlador PI escalonado usualmente utilizado na literatura e os controladores projetados por VRFT quando sujeitos a variações no sinal de referência e no vento incidente nas pás.

2. TURBINA EÓLICA

Turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia elétrica através de um rotor com pás acoplado a um gerador. No rotor há servomotores que permitem o ajuste do ângulo das pás em relação ao vento incidente, alterando assim a energia cinética do vento que é captada. Uma visão geral da turbina é apresentada na Figura 1.

Dependendo da velocidade do vento incidente, a operação das turbinas é dividida em cinco regiões de operação (Bianchi and Battista (2007)): nas regiões 0 e 4, a turbina é desligada uma vez que a energia disponível não compensa o custo de operação ou a velocidade do vento é tão alta que pode danificar a turbina, respectivamente; nas regiões 1 e 2, a velocidade do vento não é suficiente para que a potência gerada atinja a potência nominal da turbina, de forma que o objetivo é extrair a máxima potência disponível através da manutenção do ângulo das pás fixo em 0° ; finalmente, na região 3 a velocidade do vento é maior ou igual à necessária para que a turbina atinja sua potência nominal. Nessa região, deseja-se que a velocidade de rotação do rotor seja constante visando uma geração de energia igual à capacidade nominal da turbina. Através de um sistema de controle em malha fechada, é possível ajustar o ângulo das pás para que a velocidade de rotação do rotor seja regulada no valor desejado.

A turbina eólica pode ser vista como o agregado de vários subsistemas que adicionam diferentes graus de complexidade e que devem ser levados em conta na sua modelagem matemática. Um exemplo dessa complexidade é a expressão da energia capturada pela turbina eólica, geralmente apresentada na literatura como (Inthamossou et al., 2014):

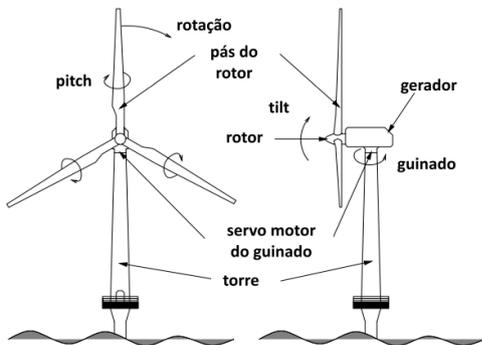


Figura 1. Ilustração da turbina eólica, adaptado de Houtzager (2011).

$$P(V, \beta, \Omega_r) = \frac{\pi d R^2}{2} C_P(\lambda, \beta) V^3. \quad (1)$$

Note que esta relação depende do cubo da velocidade do vento V e do coeficiente não linear de potência C_P , que caracteriza a eficiência da conversão do rotor em função do ângulo das pás β e da chamada *tip-speed-ratio* $\lambda = \Omega_r R / V$. Outras variáveis que influenciam (1) são a velocidade de rotação do rotor Ω_r , o raio R do rotor e a densidade d do ar. O detalhamento de cada um desses subsistemas bem como a sua respectiva modelagem matemática podem ser encontrados em (Inthamossou et al., 2014).

3. CONTROLE BASEADO EM DADOS

Conforme ilustrado na seção anterior, o modelo matemático que descreve a turbina eólica envolve uma série de dinâmicas complexas e não lineares. Por outro lado, os métodos de controle baseado em dados como o VRFT apresentam uma alternativa para o projeto do controlador sem que seja realizada a modelagem matemática e as simplificações usualmente empregadas na obtenção de modelos lineares para o sistema.

3.1 Formulação do Problema

Considere um sistema monovariável, linear e invariante no tempo representado em tempo discreto por

$$y(k) = G(z)u(k) + v(k), \quad (2)$$

onde z é o operador avanço de tempo $zx(k) = x(k+1)$, $y(k)$ é a saída do sistema, $u(k)$ é o sinal de entrada e $v(k)$ é um sinal que inclui as características não descritas por $G(z)$. Suponha que este sistema é controlado em malha fechada por

$$u(k) = C(z, \rho)(r(k) - y(k)), \quad (3)$$

onde $r(k)$ é o sinal de referência. Assume-se que o controlador $C(z, \rho)$ é parametrizado por

$$C(z, \rho) = \rho^T \bar{C}(z), \quad (4)$$

onde $\rho \in \mathbb{R}^p$ é um vetor de parâmetros a serem determinados e $\bar{C}(z)$ é um vetor de funções de transferência definidas *a priori*. Por exemplo, um controlador PI em tempo discreto pode ser parametrizado nessa forma através de

$$C(z, \rho) = [K_p \ K_i] \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ \frac{1}{T_a(z-1)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde $\rho^T = [K_p \ K_i]$, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e T_a é o período de amostragem. A classe do controlador é o conjunto de todos os controladores que podem ser representados por (4), i.e., $\mathcal{C} = \{C(z, \rho) : \rho \in \mathbb{R}^p\}$. Utilizando as relações (2) e (3), o sistema em malha fechada pode ser descrito por

$$y(k, \rho) = T(z, \rho)r(k) + S(z, \rho)v(k), \quad (6)$$

$$T(z, \rho) = \frac{C(z, \rho)G(z)}{1 + C(z, \rho)G(z)}, \quad (7)$$

$$S(z, \rho) = 1 - T(z, \rho), \quad (8)$$

onde $S(z, \rho)$ é a função de sensibilidade e $T(z, \rho)$ é a função de transferência em malha fechada da referência na saída (sensibilidade complementar).

3.2 Problema de Controle por Modelo de Referência

Considere que a saída desejada para o sistema em malha fechada é dada por

$$y_d(k) = T_d(z)r(k), \quad (9)$$

onde $T_d(z)$ é uma função de transferência desejada escolhida pelo projetista. A definição de $T_d(z)$ depende da aplicação e deve levar em conta requisitos de desempenho em malha fechada como tempo de acomodação, sobressinal e magnitude em uma dada frequência de interesse.

Dado um vetor de parâmetros ρ , uma possível métrica para a avaliação do desempenho do sistema em malha fechada em relação a y_d é pela minimização da função objetivo

$$J_y(\rho) = \|(T(z,\rho) - T_d(z))r(k)\|^2, \quad (10)$$

a qual não considera o efeito de $v(k)$. É possível definir o *controlador ideal* como o controlador que resulta em $J_y(\rho) = 0$. Baseado em (6) e (10), segue que este controlador é definido por

$$C_d(z) = \frac{T_d(z)}{[1 - T_d(z)]G(z)}. \quad (11)$$

Note que, quando se conhece $G(z)$, pode-se determinar a função de transferência do controlador ideal como função da planta e do modelo de referência escolhido. Métodos de projeto baseado em dados como o VRFT supõe que $G(z)$ é desconhecida, realizando a identificação de um controlador que minimiza (10) a partir de ensaios na planta (Remes et al. (2021)).

3.3 Solução por VRFT

Entre os métodos de controle baseado em dados, o VRFT se destaca por necessitar apenas de um conjunto de dados de entrada e saída da planta e por apresentar uma solução simples através do método dos mínimos quadrados.

Dado um conjunto de dados $\{u(k), y(k), k = 1, \dots, N\}$ obtido a partir de um experimento em malha aberta ou fechada na planta (2) e um modelo de referência desejado $T_d(z)$, é possível definir um sinal de referência virtual $\bar{r}(k)$ tal que $T_d(z)\bar{r}(k) = y(k)$. Além disso, é possível definir o erro virtual como $\bar{e}(k) = \bar{r}(k) - y(k) = (T_d^{-1}(z) - 1)y(k)$, conforme ilustrado no diagrama da Figura 2, onde as linhas tracejadas representam os sinais virtuais e as linhas cheias representam os sinais coletados no experimento. Mesmo que não se conheça $G(z)$, o controlador que leva o sistema em malha fechada à $T_d(z)$ é aquele que gera o sinal de controle $u(k)$ coletado quando sua entrada é $\bar{e}(k)$. Assim, o método VRFT resolve o seguinte problema de otimização:

$$\rho^{VR} = \arg \min J^{VR}(\rho), \quad (12)$$

onde

$$J^{VR}(\rho) = \|L(z) [u(k) - C(z,\rho)(T_d^{-1} - 1)y(k)]\|^2. \quad (13)$$

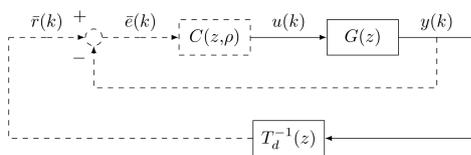


Figura 2. Diagrama do experimento com sinais virtuais do método VRFT, adaptado de (Remes et al. (2021)).

Nessa formulação, $L(z)$ é um filtro utilizado para aproximar o mínimo de $J^{VR}(\rho)$ ao mínimo de $J_y(\rho)$ (Bazanella et al., 2012). Se o controlador ideal $C_d(z)$ pertence à classe de controladores \mathcal{C} escolhida e os dados coletados são livres de ruído, $J^{VR}(\rho)$ possui o mesmo mínimo de $J_y(\rho)$, não importando a escolha de $L(z)$. Quando isso não é verificado, os sinais $u(k)$ e $y(k)$ são filtrados por $L(z)$, projetado de tal forma que o mínimo de $J^{VR}(\rho)$ seja o mais próximo possível do mínimo de $J_y(\rho)$. O filtro usualmente empregado satisfaz a relação

$$|L(e^{j\omega})|^2 = |T_d(e^{j\omega})|^2 |1 - T_d(e^{j\omega})|^2 \frac{\phi_r(e^{j\omega})}{\phi_u(e^{j\omega})}, \forall \omega \in [-\pi, \pi], \quad (14)$$

onde $\phi_r(e^{j\omega})$ e $\phi_u(e^{j\omega})$ são o espectro de potência dos sinais $r(k)$ e $u(k)$, respectivamente.

Quando o controlador a ser projetado é linear nos parâmetros, como o controlador apresentado em (5), a solução para o problema de otimização (12) pode ser obtida pelo método dos mínimos quadrados como

$$\hat{\rho} = \left[\sum_{k=1}^N \varphi(k)\varphi(k)^T \right]^{-1} \sum_{k=1}^N \varphi(k)u_L(k), \quad (15)$$

onde $u_L(k) = L(z)u(k)$ e o vetor regressor $\varphi(k)$ é definido como

$$\varphi(k) = L(z)\bar{C}(z)(T_d(z)^{-1} - 1)y(k). \quad (16)$$

4. APLICAÇÃO DO VRFT EM TURBINAS EÓLICAS

Nesta seção, a aplicação do método VRFT é analisada no contexto particular do controle de velocidade do rotor em turbinas eólicas. Em todos os casos são projetados controladores PI linearmente parametrizados conforme apresentado em (5).

Esses controladores têm seu desempenho comparado em dois cenários simulados no FAST: aplicação de um salto de referência de 0,8 RPM no entorno da velocidade de rotação nominal Ω_{r0} e um distúrbio na forma de rajada de vento padronizada conforme a norma IEC61400-1 (2005). É apresentada uma análise quantitativa de desempenho a partir da versão de tempo discreto dos critérios erro integral absoluto (*Integral Absolute Error* - IAE), dado por

$$IAE = \sum_{k=1}^N |r(k) - y(k)|, \quad (17)$$

e a integral quadrática da derivada do sinal de controle (*Integral of Square Time Derivative of the Control Input* - ISTC ou *Total Variation* - TV), dado por

$$ISTC = \frac{1}{T_a} \sum_{k=1}^{N-1} (u(k+1) - u(k))^2. \quad (18)$$

As simulações apresentadas são baseadas no modelo de uma turbina eólica de 5MW comumente utilizada como referência na avaliação de malhas de controle (Jonkman et al. (2009)). Esse modelo possui suas especificações descritas via FAST v7 e resumidas na Tabela 1. O FAST permite a integração com o Matlab/Simulink, possibilitando que os laços de controle sejam implementados em Simulink e que o comportamento dinâmico da turbina seja simulado no FAST. Isso permite que aspectos aerodinâmicos, mecânicos e estruturais sejam levados em conta na simulação.

Tabela 1. Características da Turbina para simulação (Jonkman et al. (2009)).

Descrição	Símbolo	Valor
Potência Nominal	P_0	5 MW
Velocidade de rotação nominal	Ω_{r0}	12,1 RPM
Limites de ângulo das pás	$[\beta_{min}; \beta_{max}]$	$[0^\circ; 90^\circ]$
Taxa máxima de variação de β	-	$8^\circ/s$
Número de pás	-	3
Vento incidente (Região 3)	V	11,4 a 25 m/s
Período de amostragem	T_a	50ms

4.1 Coleta de dados

Segundo (Bazanella et al., 2012), o sinal de excitação para a coleta de dados deve ser suficientemente rico para identificação do controlador, ou seja, seu espectro deve apresentar no mínimo p componentes diferentes de zero, sendo p a dimensão do vetor ρ . Sinais usualmente encontrados na literatura são somatórios de senóides de frequências distintas, ondas quadradas e *pseudorandom binary sequences* (PRBS).

Para a turbina eólica, propõe-se que a excitação seja do tipo onda quadrada de pequena amplitude no entorno de um dado valor nominal de operação. A amplitude do sinal deve ser tal que o sistema tenha comportamento aproximadamente linear durante a coleta de dados. Assim, o sinal de excitação considerado é dado por

$$u(k) = \beta_0 - \bar{\beta}square(T_0, k), \quad (19)$$

onde β_0 é o ângulo das pás tal que a velocidade de rotação do rotor seja Ω_{r0} , $\bar{\beta}$ é a amplitude de variação da entrada e *square*(T_0, k) denota uma onda quadrada de valor 0 e 1 com período T_0 . O período T_0 é escolhido de forma que a saída atinja acomodação em meio período. O sinal negativo em (19) foi assim escolhido pelo fato que uma diminuição do ângulo das pás provoca um aumento da velocidade do rotor.

Para esta turbina, a velocidade do vento na região 3 de operação pode variar entre 11,4 e 25m/s. Na Figura 3 são apresentados os resultados de três simulações em malha aberta nas velocidades de 14, 18 e 22 m/s. Essas velocidades foram escolhidas por representarem valores próximos ao limite inferior, valor médio e limite superior da faixa de variação do vento, respectivamente. As simulações de coleta de dados foram realizadas com $\bar{\beta} = 0.2^\circ$ e valores de β_0 e T_0 apresentados na Tabela 2.

Observe que a resposta em malha aberta do sistema possui uma característica dominante de primeira ordem, com tempo de acomodação (t_s) e ganho estático (k_{dc}) que variam com o ponto de operação escolhido, conforme

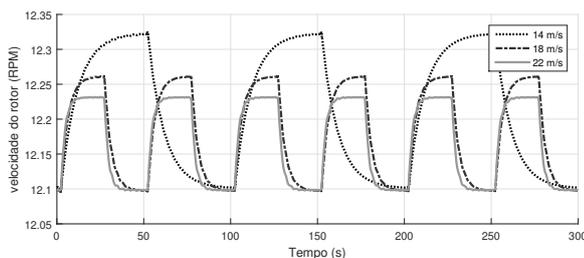


Figura 3. Dados em malha aberta para os ventos com velocidade de 14, 18 e 22 m/s.

Tabela 2. Características do sistema em cada ponto de operação.

Vento (m/s)	β_0 ($^\circ$)	t_s (s)	k_{dc} (RPM/ $^\circ$)	T_0 (s)
14	8,67	36	-1,10	100
18	14,92	20	-0,80	50
22	19,85	14	-0,65	50

apresentado na Tabela 2. Visando determinar qual é a melhor condição de velocidade do vento para a coleta de dados, na Seção 4.3 será avaliado o desempenho dos controladores projetados via VRFT em cada um dos casos da Tabela 2.

4.2 Escolha de $T_d(z)$

Uma parte fundamental do método VRFT é a escolha do modelo de referência desejado $T_d(z)$. A literatura de turbinas eólicas, o comportamento do sistema em malha fechada é usualmente aproximado por um sistema de segunda ordem e o controlador é projetado baseado em requisitos como tempo de acomodação e sobressinal (Jonkman et al. (2009)). Assim, na sequência será considerada uma $T_d(z)$ com essas mesmas características.

Em sistemas de tempo contínuo com dominância de um par de polos complexos conjugados, a dinâmica do sistema é caracterizada pela frequência natural de oscilação ω_n e pelo coeficiente de amortecimento ξ desses polos. Por outro lado, os requisitos temporais de desempenho são usualmente expressos em relação aos valores desejados de tempo de acomodação (t_{sd}) e máximo sobressinal (M_{pd}). Dados esses valores desejados, é possível determinar os valores correspondentes de ξ e ω_n através de (Ogata, 2010):

$$\xi = \sqrt{\frac{[\ln(0.01M_{pd})]^2}{\pi^2 + [\ln(0.01M_{pd})]^2}}; \quad \omega_n \approx \frac{4}{t_{sd}\xi}. \quad (20)$$

A partir das relações entre sistemas de tempo contínuo e discreto, segue que $T_d(z)$ deverá ter polos dados por

$$p_{1,2} = e^{T_a(-\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{\xi^2-1})}$$

para contemplar os valores de M_{pd} e t_{sd} . Outro requisito fundamental é a garantia de seguimento de referências constantes em regime permanente, obtido pela imposição de $T_d(1) = 1$. Combinando todos esses requisitos, é proposta a seguinte função de transferência desejada:

$$T_d(z) = \frac{1 - p_1 - p_2 + p_1p_2}{z^2 - (p_1 + p_2)z + p_1p_2}. \quad (21)$$

4.3 Comparação entre pontos de operação

Para comparação, foi projetado um controlador PI escalonado seguindo a abordagem apresentada em Jonkman et al. (2009) e tendo como requisitos de desempenho $t_{sd} = 10s$ e $M_{pd} = 5\%$. Esse controlador foi discretizado utilizando o método Euler *forward* com o T_a apresentado na Tabela 1. Nas tabelas e gráficos, esse controlador será denotado por C_b .

Para a avaliação do efeito do ponto de coleta de dados, foram projetados controladores pelo método VRFT a partir dos dados coletados nas velocidades de 14, 18 e 22m/s (denominados de C_{14} , C_{18} e C_{22} , respectivamente). A $T_d(z)$ utilizada foi obtida a partir dos mesmos requisitos

Tabela 3. IAE para diferentes pontos de coleta de dados e operação.

	C_b	C_{14}	C_{18}	C_{22}
IAE_d	1084	556	411	373
IAE_{14}	14,30	6,50	10,06	13,09
IAE_{18}	14,33	5,58	5,88	7,28
IAE_{22}	20,23	6,47	5,02	5,42

de desempenho utilizados no projeto do controlador C_b . A função de transferência de cada um dos controladores utilizados é apresentada na Tabela A.1 do Apêndice A. Por sua vez, a Tabela 3 apresenta o critério IAE resultante de quatro cenários de simulação: distúrbio de rajada de vento variando de 14 até 22 m/s (IAE_d); degrau de referência de 0,8 RPM na velocidade do rotor com a turbina operando em cada uma das velocidades de vento (IAE_{14} , IAE_{18} e IAE_{22} , respectivamente).

Observe que o índice IAE resultante dos controladores projetados via VRFT é menor que o obtido com o controlador padrão de Jonkman et al. (2009) em todos os casos. Considerando a rejeição do distúrbio, o índice IAE_d apresenta uma redução mais significativa entre os controladores C_{14} e C_{18} do que entre os controladores C_{18} e C_{22} . Isso indica um melhor desempenho dos controladores projetados com dados coletados em maiores velocidades de vento. Considerando apenas o seguimento de referências, o ponto de operação mais crítico é em baixas velocidades de vento (14m/s), onde a dinâmica do sistema em malha aberta é mais lenta. Nesse caso, observa-se um aumento quase linear do IAE entre os controladores considerados. Já para a operação em velocidades maiores, o ponto de coleta de dados apresenta pouca influência nesse índice de desempenho.

Visando um bom compromisso entre o desempenho para variações de referência e para distúrbios, nas próximas análises são considerados controladores projetados a partir de dados coletados na velocidade de vento intermediária de 18m/s.

4.4 Comparação entre requisitos de desempenho

Nessa seção, serão avaliados os seguintes controladores: C_b e C_{18} previamente projetados; controladores projetados pelo método de Jonkman et al. (2009) com diferentes requisitos de desempenho (C_{b1} e C_{b2}); controladores projetados via VRFT para diferentes requisitos de tempo de acomodação e sobressinal (C_1 a C_8). Na Tabela 4 são apresentados os resultados para cada um desses controladores.

O primeiro ponto a ser destacado é que, para os mesmo requisitos de projeto, os controladores projetados via VRFT (C_{18} , C_5 e C_6) apresentam IAE significativamente menor que os projetados via abordagem de Jonkman et al. (2009) (C_b , C_{b1} e C_{b2} , respectivamente). De C_1 a C_4 , observa-se que o índice IAE_{18} sofre pouca variação com o tempo de acomodação desejado. Por outro lado, a resposta ao distúrbio pode ser melhorada significativamente com a escolha adequada de t_{sd} . Da mesma forma, os resultados para os controladores C_5 a C_8 mostram que a resposta ao distúrbio pode ser melhorada com o aumento do requisito de máximo sobressinal desejado para o sistema em malha fechada. Por fim, o $ISTC_d$ é semelhante em todos os con-

Tabela 4. Desempenho para a variação dos requisitos de projeto

	t_{sd} (s)	M_{pd} (%)	IAE_d	IAE_{18}	$ISTC_d$
C_b	10	5	1084	14,33	0,089
C_{b1}	5	15	218	7,59	0,184
C_{b2}	5	30	114	9,64	0,221
C_{18}	10	5	411	5,88	0,180
C_1	8	5	319	4,75	0,185
C_2	5	5	204	3,17	0,188
C_3	3	5	145	2,30	0,187
C_4	1	5	125	2,62	1,449
C_5	5	15	118	2,61	0,195
C_6	5	30	57	3,08	0,202
C_7	5	35	36	4,45	0,205
C_8	5	45	25	8,75	0,206

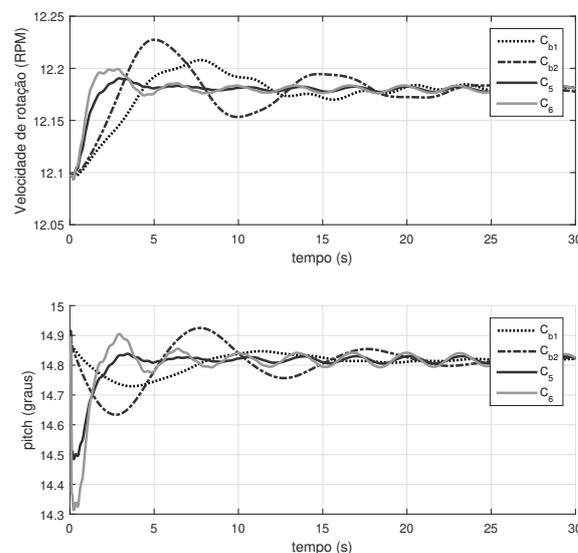


Figura 4. Comparação entre controladores em malha fechada ao salto na referência.

troladores exceto em C_b e C_4 , que apresentam menor e maior valor, respectivamente.

Na Figura 4 é mostrada a simulação de resposta a salto na referência com o sistema operando em malha fechada, de onde é calculado IAE_{18} , para os controladores C_{b1} , C_{b2} , C_5 e C_6 . Note que o tempo de acomodação do ensaio de C_5 e C_6 é de aproximadamente 5 segundos, conforme requisito de projeto, ao contrário dos controladores C_{b1} e C_{b2} , que apresentam um tempo de acomodação de aproximadamente 22 e 15 segundos, respectivamente. Além disso, observa-se uma oscilação sustentada na resposta ao salto diretamente relacionada à frequência de rotação nas pás.

Na Figura 5 é ilustrada a simulação do sistema em malha fechada para o ensaio ao distúrbio, de onde calcula-se IAE_d . Observa-se que os controladores C_{b2} e C_5 apresentam desempenho similar, com desvio máximo de 0,53RPM na velocidade do rotor. Quanto aos demais controladores, esses desvios são da ordem de 1RPM para C_{b1} e 0,28RPM para C_6 . Note que o controlador C_6 projetado via VRFT apresenta um bom compromisso entre os dois critérios de desempenho.

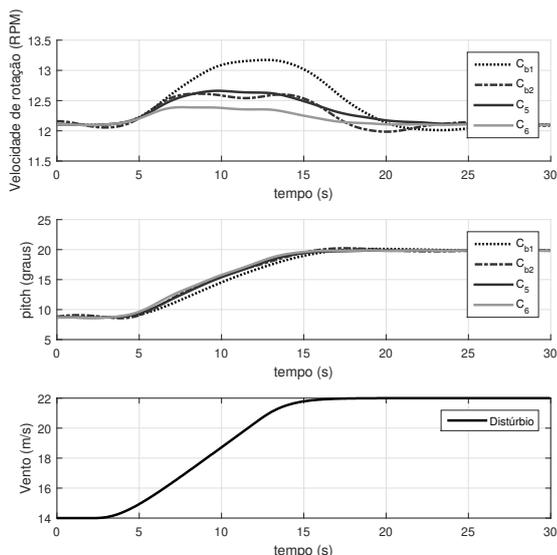


Figura 5. Comparação entre controladores em malha fechada a rajada de vento

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a aplicação do método VRFT na sintonia de controladores PI para a regulação de velocidade do rotor de turbinas eólicas. Pontos fundamentais foram discutidos, como coleta de dados e escolha da função de transferência desejada para o sistema em malha fechada. A partir de simulações no software FAST para uma turbina padrão de 5MW, foi mostrado que os controladores projetados pelo VRFT apresentam um melhor desempenho, tanto para variações de referências na velocidade do rotor quanto na rejeição de distúrbios do tipo rajada de vento, quando comparados ao método de projeto usualmente empregado na literatura, mesmo utilizando uma estrutura de controlador mais simples. Trabalhos futuros podem explorar a utilização do *Virtual Disturbance Feedback Tuning* (VDFT) (Eckhard et al., 2018) visando otimizar diretamente a resposta ao distúrbio, e o projeto de controlador com parâmetros variantes (LPV) baseados em dados (Lasch et al. (2021)).

REFERÊNCIAS

Bazanella, A.S., Campestrini, L., and Eckhard, D. (2012). *Data-Driven Controller Design: The H2 Approach*. Springer.

Bianchi, F.D. and Battista, H.D. (2007). *Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer, Argentina.

Campestrini, L., Eckhard, D., and Chia, Andrea e Boeira, E. (2016). Unbiased MIMO VRFT with application to process control. *Journal of Process Control*, 39, 35–49.

Castro, R., Salton, A., Flores, J., Kinnaert, M., and Coutinho, D. (2017). Variable frequency resonant controller for load reduction in wind turbines. *Control Engineering Practice*, 66, 76–88.

Eckhard, D., Campestrini, L., and Christ Boeira, E. (2018). Virtual disturbance feedback tuning. *IFAC Journal of Systems and Control*, 3, 23–29.

Hansen, M., Hansen, A.D., Larsen, T.J., Øye, S., Sørensen, P., and Fuglsang, P. (2005). Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine. *Denmark Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1500(EN)*.

Houtzager, I. (2011). *Towards Data-Driven Control for Modern Wind Turbines*. Ph.D. thesis, Universidade de Tecnologia de Delft.

IEC61400-1 (2005). Wind turbines - part 1: Design requirements. *International Electrotechnical Commission, Switzerland*.

Inthamossou, F.A., Bianchi, F.D., Battista, H.D., and Mantz, R.J. (2014). LPV wind turbine control with anti-windup features covering the complete wind speed range. *IEEE transaction on energy conversion*, 29, 259–266.

Jonkman, J., Butterfield, S., and Musial, W. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report.

Jonkman, J.M. and Buhl, Jr, M.L. (2005). Fast user’s guide. URL <https://www.osti.gov/biblio/15020796>.

Lasch, R., Campestrini, L., and Lima, P.R.D. (2021). Projeto e análise de controladores LPV pelo método VRFT. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, XV, 845–850.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 5 edition.

Remes, C.L., Gomes, R.B., Flores, J.V., Líbano, F.B., and Campestrini, L. (2021). Virtual reference feedback tuning applied to dc–dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68, 544–552.

Roman, R.C., Precup, R.E., Bojan-Drăgăș, C.A., and Szedlak-Stinean, A.I. (2019). Combined model-free adaptive control with fuzzy component by virtual reference feedback tuning for tower crane systems. *Procedia Computer Science*, 162, 267–274.

Apêndice A. CONTROLADORES PROJETADOS

Tabela A.1. Controladores considerados nas simulações.

	Função de transferência
C_b	$\frac{-0,0188(z-0,9785)}{z-1} f(\beta)$
C_{b1}	$\frac{-0,03581(z-0,925)}{z-1} f(\beta)$
C_{b2}	$\frac{-0,03581(z-0,8438)}{z-1} f(\beta)$
C_{14}	$\frac{-0,0356(z-0,991)}{z-1}$
C_{18}	$\frac{-0,0185(z-0,9745)}{z-1}$
C_{22}	$\frac{-0,0106(z-0,948)}{z-1}$
C_5	$\frac{-0,083941(z-0,9803)}{z-1}$
C_6	$\frac{-0,11335(z-0,9697)}{z-1}$
$f(\beta)$	$(1 + \frac{\beta}{0,101})^{-1}$