

Síntese de Controladores para Redução de Esforços Mecânicos em Turbinas Eólicas

Autor: Gabriel Pascottini Flores - Orientador: Jeferson Vieira Flores

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

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



paz no plural

Resumo

A carga mecânica associada à operação normal de uma turbina pode ser modelada como um sinal periódico, com período dependente da velocidade do vento. O Controlador Repetitivo é uma metodologia de controle desenvolvida para tratar de problemas de seguimento e/ou rejeição de sinais periódicos. Por outro lado, esta metodologia assume o conhecimento exato do período fundamental do sinal a ser seguido/rejeitado, sendo que o desempenho do sistema em malha fechada piora significativamente quando o período do sinal de interesse difere do período para qual o controlador foi sintonizado. Uma maneira de minimizar este efeito é utilizar os Controladores Repetitivos de Alta Ordem (*High Order Repetitive Control – HORC*). O *HORC* visa reduzir a perda de desempenho em sistemas onde o período do sinal de interesse é incerto, porém, com uma faixa de variação limitada. Um problema comum em sistemas deste tipo (sistema de ganho elevado) é a saturação do sinal de controle, o que causa problemas de estabilidade e desempenho do controlador. Para melhorar o desempenho do sistema para situações de saturação, propõe-se o uso de um laço de *Anti-Windup*, que tem como objetivo impedir a saturação do sinal de controle. Os resultados mostraram que as topologias que incluem o laço de *Anti-Windup* fazem com que o sinal de controle permaneça saturado por um tempo muito menor, melhorando, assim, o desempenho do sistema.

Introdução

- Desenvolvimento de um sistema de controle capaz de seguir com precisão uma dada referência periódica.
- Minimizar os efeitos de perda de desempenho por incertezas e/ou variações do período do sinal de interesse.
- Projetar um sistema que seja capaz de atuar mesmo sob as limitações físicas e de segurança do atuador → **Saturação**.
- Saturação no atuador: Causa problemas de estabilidade e perda de desempenho.
- Possível aplicação do sistema desenvolvido para controle ativo de vibração de turbinas eólicas, uma vez que os esforços mecânicos na turbina podem ser modelados como sinais periódicos dependentes da velocidade do vento que atinge a turbina.

Controlador Repetitivo e HORC

- Princípio do Modelo Interno (PMI) → Para garantir o perfeito seguimento e/ou rejeição de um sinal, o controlador deve gerar, dentro da malha de controle, as mesmas características da referência/perturbação que se deseja seguir/rejeitar.
- Controlador Repetitivo → Nesta metodologia de controle, o PMI é garantido por um elemento de atraso τ (correspondente ao período do sinal de interesse) em um laço de realimentação positiva.
- **Problemas:**
 - É sintonizado para uma frequência específica.
 - Desempenho cai muito para pequenas variações na frequência do sinal.
- *HORC* → Visa reduzir a drástica queda de desempenho para pequenas variações na frequência do sinal, adicionando múltiplos atrasos ponderados, com pesos W_i , na malha de realimentação, sendo o número de atrasos N igual a ordem do controlador.

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos simplificado do *HORC*.

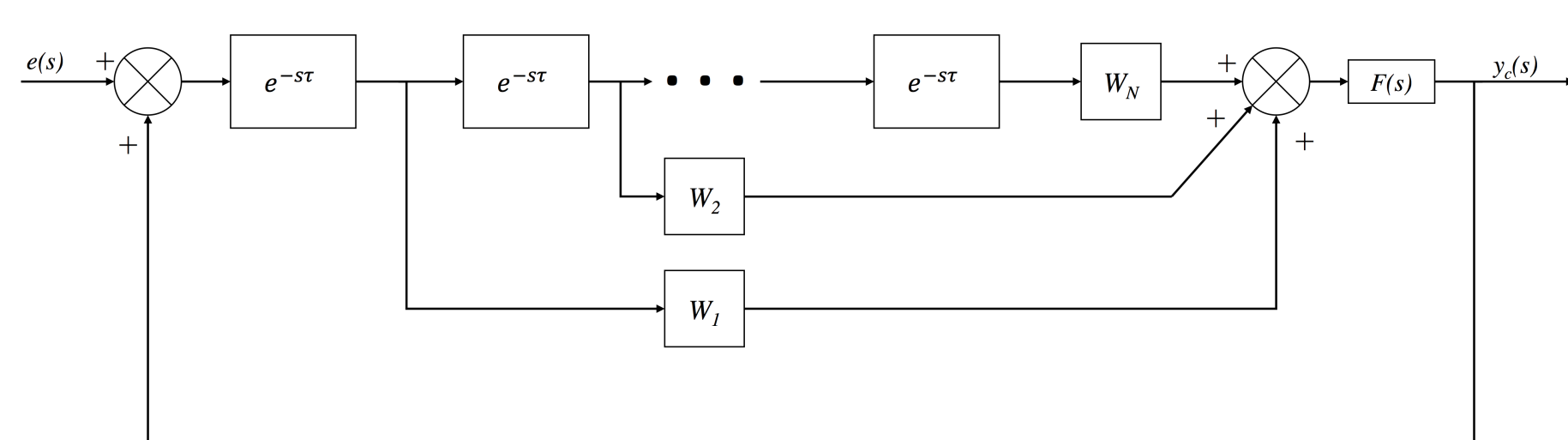


Figura 1: Diagrama de blocos do *HORC* proposto.

A função de transferência do *HORC* é dada por

$$\frac{y_c(s)}{e(s)} = G(s) = \frac{F(s) \sum_{i=1}^N W_i e^{-s i \tau}}{1 - F(s) \sum_{i=1}^N W_i e^{-s i \tau}} \quad \text{onde} \quad F(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

A descrição do *HORC* no espaço de estados é dada por [1]

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = -\omega_c x_c(t) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i x_c(t - i\tau) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i e(t - i\tau) \\ y_c(t) = x_c(t) \end{cases}$$

onde $x_c(t) \in \mathbb{R}$ é o estado do controlador.

Descrição do Sistema

Planta

Considerando saturação no sinal de controle, uma planta genérica pode ser descrita por

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B \text{sat}(u(t)) + B_d d(t) \\ y(t) = Cx(t) \\ e(t) = r(t) - y(t) \end{cases}$$

onde $x(t) \in \mathbb{R}$ é o estado da planta, $\text{sat}(u(t))$ é a função simétrica de saturação, com limites $\pm u_0$, e $d(t)$ é a perturbação.

Saturação do Sinal de Controle

É necessário corrigir a formulação do *HORC* para que ela leve em consideração a saturação no sinal de controle.

- *Anti-Windup* → Correção dos estados do controlador pela diferença do sinal com e sem saturação.

$$u_{aw}(t) = E_c(\text{sat}(u(t)) - u(t))$$

Adicionando o laço de *Anti-Windup* a formulação do *HORC* resulta em uma nova formulação dada por

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = -\omega_c x_c(t) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i x_c(t - i\tau) + \omega_c r(t) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i e(t - i\tau) + \omega_c u_{aw}(t) \\ y_c(t) = x_c(t) \end{cases}$$

Sistema Aumentado

É possível integrar os estados do controlador aos estados da planta, formando uma matriz expandida de estados, também chamado de sistema aumentado.

O novo sistema formado pelo *HORC* proposto e uma planta genérica é dado por

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t) = A_a \begin{bmatrix} x(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^N A_{da} \begin{bmatrix} x(t - i\tau) \\ x_c(t - i\tau) \end{bmatrix} + B_a \text{sat}(u(t)) - V E_c \psi(t) + B_q \begin{bmatrix} r(t) \\ d(t) \end{bmatrix} \\ y_a(t) = y(t) \end{cases}$$

onde A_a , A_{da} , B_a , V e B_q são matrizes que descrevem o sistema aumentado planta + controlador e $\psi(t)$ é a zona morta.

- Sinal de Controle → É dado pela realimentação do estado aumentado:

$$u(t) = K_p x(t) + K_c x_c(t) = K_a x_a(t)$$

Integrando o sinal de controle ao sistema formado pelo *HORC* e a planta, obtém-se o sistema aumentado em sua forma final, dado por

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t) = (A_a + B_a K_a) x_a(t) + \sum_{i=1}^N A_{da} x_a(t - i\tau) - (B_a + V E_c) \psi(t) + B_q q(t) \\ y_a(t) = y(t) \end{cases}$$

$$\text{onde } q(t) = \begin{bmatrix} r(t) \\ d(t) \end{bmatrix}$$

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do sistema completo.

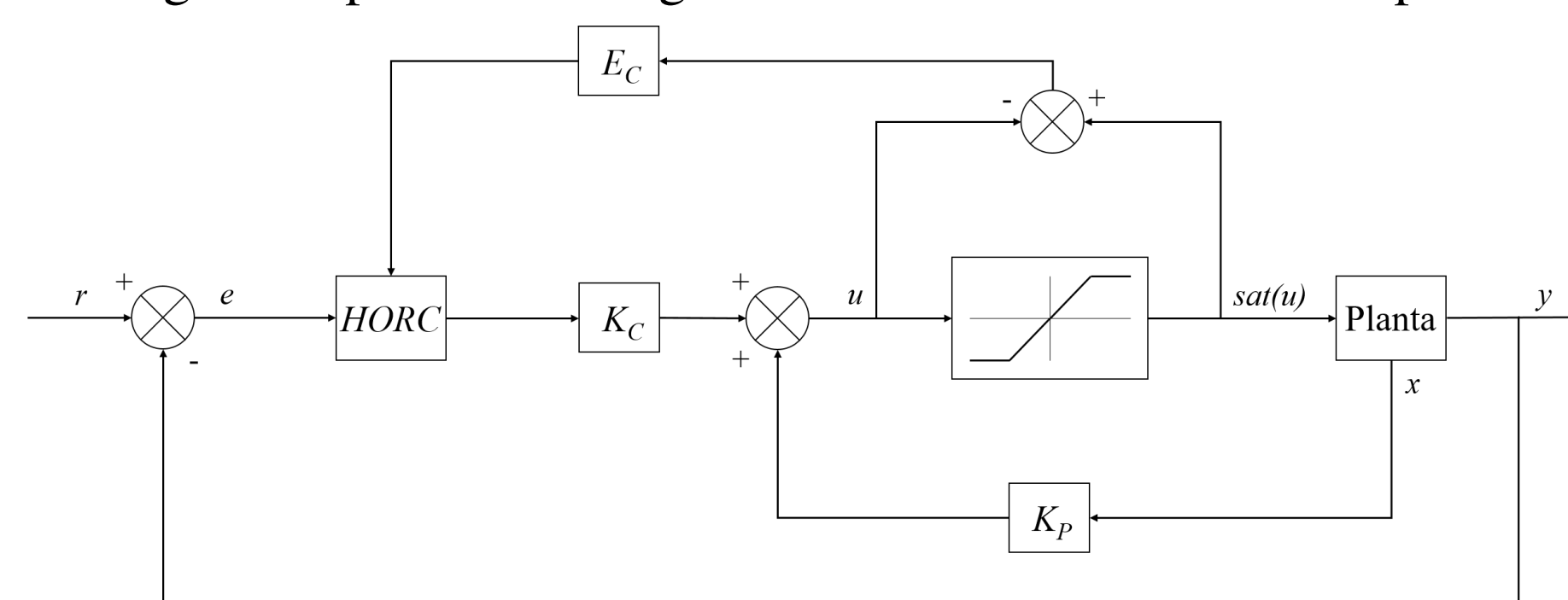


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema completo.

Projeto do Controlador

LMI

Para o projeto do controlador, as seguintes condições em forma de LMI (*Linear Matrix Inequalities*) [2] foram utilizadas:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{H}(W, Y, S) - B_a L - V M + X^T & B_q \\ * & -2L \\ * & * & -\lambda R \end{bmatrix} < 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} W & * \\ Y_{(j)} - X_{(j)} & u_{0(j)}^2 \end{bmatrix} \geq 0, j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \eta W & * \\ Y_{(j)} & u_{0(j)}^2 \end{bmatrix} \geq 0, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$S_i - W > 0, i = 1, \dots, n_\tau \quad (4)$$

com $\mathcal{H}(W, Y, S) = \text{Sim}\{AW + B_a Y\} + [(-1 + 3\eta)\lambda + n_\tau]W + \sum_{i=1}^{n_\tau} A_{di} S_i A_{di}^T$.

Problema de Otimização

O problema de otimização tem como objetivo a maximização das referências/perturbações admissíveis e das condições iniciais [2] e é dado por

$$\text{PO1: } \min(1 - \kappa)\gamma + \kappa\mu$$

$$\text{sujeito a } \begin{cases} \begin{bmatrix} \gamma & x_i^T \\ x_i & W \end{bmatrix} \geq 0, i = 1, \dots, f, \\ d_j^T R d_j \leq \mu, j = 1, \dots, s, \\ \text{Relações (1), (2), (3), (4).} \end{cases}$$

Resultados

Considerando uma planta genérica, representa no espaço de estados por

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad B_d = B \quad C = [10 \ 0]$$

Dado que $u_0 = 10$, $\tau = 10$ e $\omega_c = 10$, deseja-se encontrar valores de λ e η para que as condições LMI sejam factíveis e que o problema de otimização seja resolvido.

Para tal, utilizou-se o método do espaço de soluções, que consiste na resolução do problema varrendo diferentes valores de λ e η , tendo como variável de interesse a máxima amplitude de sinal que o sistema consegue seguir/rejeitar. A Figura 3 apresenta um exemplo de um espaço de soluções para $N = 2$ com *Anti-Windup*.

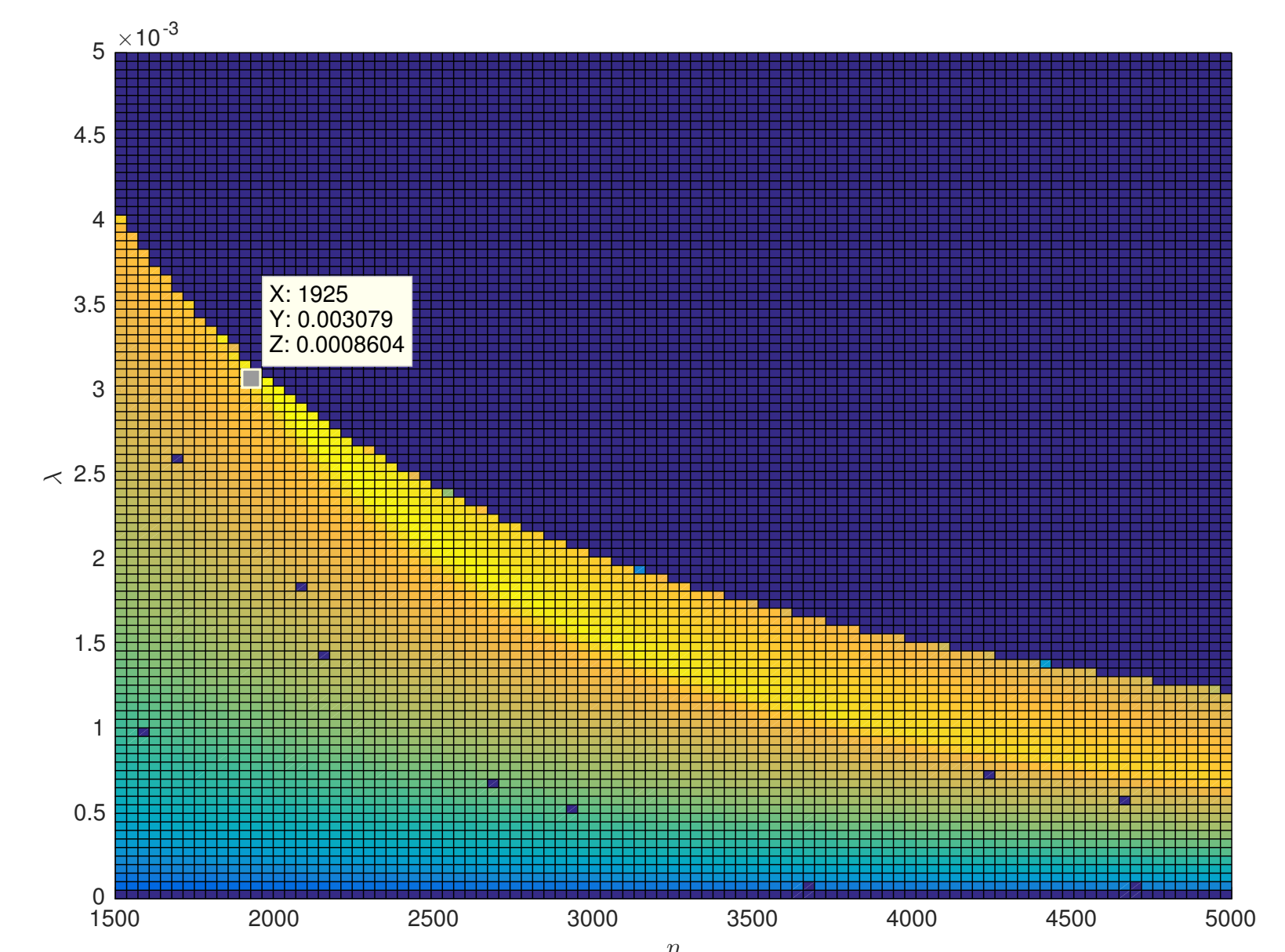


Figura 3: Espaço de soluções para $N = 2$ com *Anti-Windup*.

onde o eixo y representa o parâmetro λ , o eixo x representa o parâmetro η e o eixo z representa a variável de interesse, a máxima referência/perturbação que o sistema consegue seguir/rejeitar. Os resultados para as diferentes ordens e casos são apresentados na tabela abaixo.

	Sem A-W			Com A-W		
N	1	2	3	1	2	3
λ	4,0537	3,9197	-	0,0268	0,0031	0,0042
η	1	1	-	146,2121	1924,2	1296,6
r/d	0,0025	4,8373E-4	-	0,0078	8,8497E-4	1,1260E-4

O caso $N = 3$ sem *Anti-Windup* não apresentou nenhuma solução factível.

A Figura 4 apresenta o resultado de uma simulação para $N = 1$, utilizando os parâmetros λ e η tal qual fosse possível maximizar a referência/perturbação a ser seguida/rejeitada. O período da referência da simulação é τ .

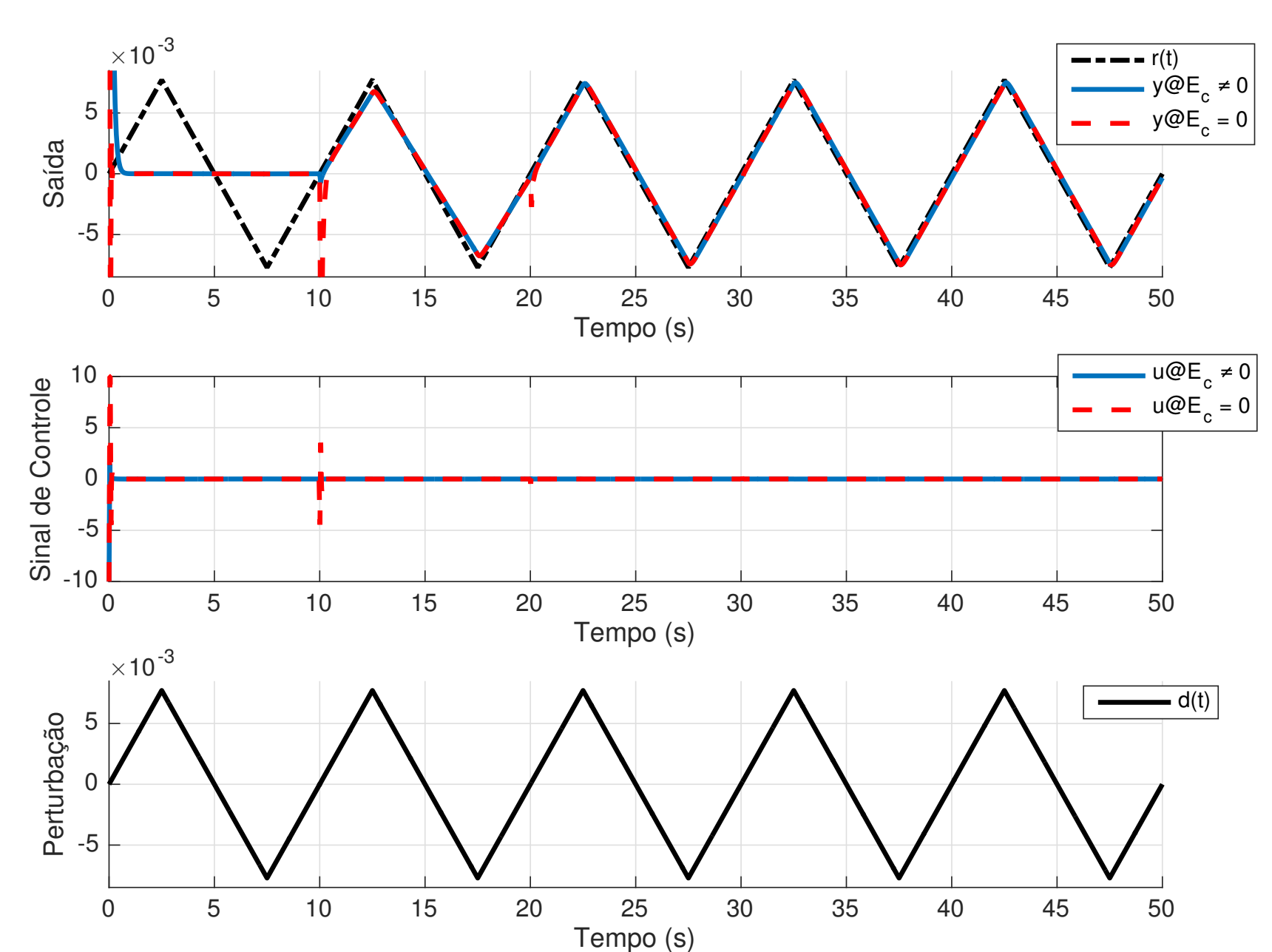


Figura 4: Simulação para $N = 1$.

Conclusões

Como pode ser visto na Figura 4, a topologia que inclui o laço de *Anti-Windup* apresenta melhor desempenho, uma vez que o sinal de controle praticamente não apresenta saturação. O desempenho de ambos os casos é satisfatório, uma vez que há praticamente perfeito seguimento da referência e total rejeição da perturbação.

As simulações foram executadas para $N = 1$ e com período de referência $\tau = 10$. Para trabalhos futuros, propõe-se que sejam investigados os desempenhos dos casos $N = 2$ e $N = 3$ e também que sejam verificadas as situações em que o período da referência e/ou perturbação de simulação seja diferente do período para o qual o controlador foi projetado, nesse caso, as situações em que $\tau \neq 10$.

Referências Bibliográficas (lista parcial)

- [1] Flores, J. V., Salton, A. T. e Castro, R. S., "Robust State Feedback Formulation for High Order Repetitive Controllers," *Asian Journal of Control*, Vol. 18, No. 5, pp. 1–10 (2016).
- [2] Flores, J. V., "Projeto de Controladores para o Seguimento de Referências Periódicas em Sistemas com Atuadores Saturantes," Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014).

Agradecimentos

Agradeço a PROPESQ e a UFRGS pela bolsa de iniciação científica.