

# Projeto de Compensadores para Controle de Velocidade de Cruzeiro

Guilherme Martins Specht  
Bacharelado em Engenharia de Computação  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
guilherme.specht@edu.pucrs.br

April 11, 2025

## Abstract

Este trabalho apresenta o projeto de um compensador dinâmico para o controle da velocidade de cruzeiro em veículos automotores. A partir de um modelo de planta de segunda ordem, foi realizada a análise da resposta em malha aberta e o subsequente projeto de um compensador composto por ganho, avanço e atraso. O objetivo é atender aos requisitos de margem de fase, frequência de cruzamento e erro em regime permanente. As validações foram feitas por meio de simulações no MATLAB/Simulink.

## 1 Introdução

O controle de velocidade de cruzeiro é uma funcionalidade comum em veículos modernos. Este projeto visa projetar um controlador que atenda aos requisitos de desempenho desejados. A Figura 1 ilustra a arquitetura geral do sistema. A planta é modelada por uma função de transferência fornecida pelo script `main.m`:

$$G(s) = \frac{a}{s^2 + bs + c} \quad (1)$$

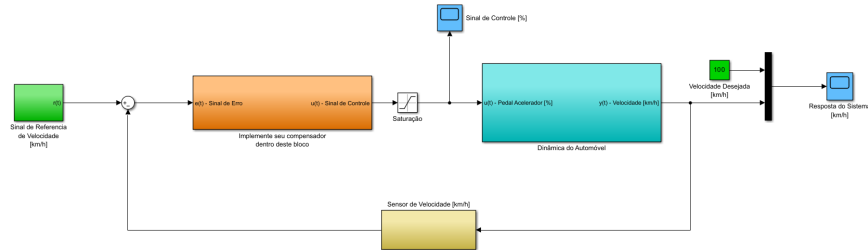


Figure 1: Sistema de controle de velocidade de cruzeiro

## 2 Análise da Planta

Primeiramente foi realizada a análise do Diagrama de Bode da planta para assim ser possível atingir os requisitos solicitados pela especificação.

### 2.1 Diagrama de Bode da Planta

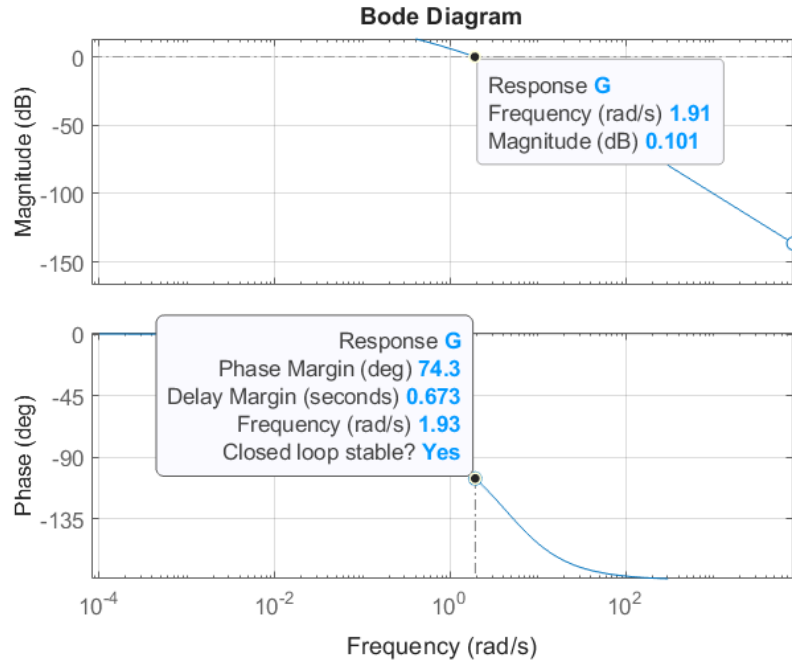


Figure 2: Diagrama de Bode da planta

Na análise do Diagrama de Bode da planta verifica-se que a frequência de cruzamento 0dB é de 1.93 rad/s, margem de ganho infinita, margem de fase de 74.3° e Kp de 10 (ou 20dB).

## 3 Projeto do Compensador $C(s)$

### 3.1 Requisitos de Projeto

- Margem de fase:  $60^\circ \leq \phi_m \leq 70^\circ$
- Frequência de cruzamento:  $9 \leq \omega_{0dB} \leq 11$  rad/s
- Erro em regime permanente:  $e_p \leq 10^{-4}$

### 3.2 Compensador com Ganho

$$C(s) = K0 \quad (2)$$

Ainda na análise do Diagrama de Bode da planta pode-se notar que a magnitude para atingir o requisito da frequência de cruzamento 0dB atingir entre 9 e 11 rad/s é de -20.9 dB para 10 rad/s.

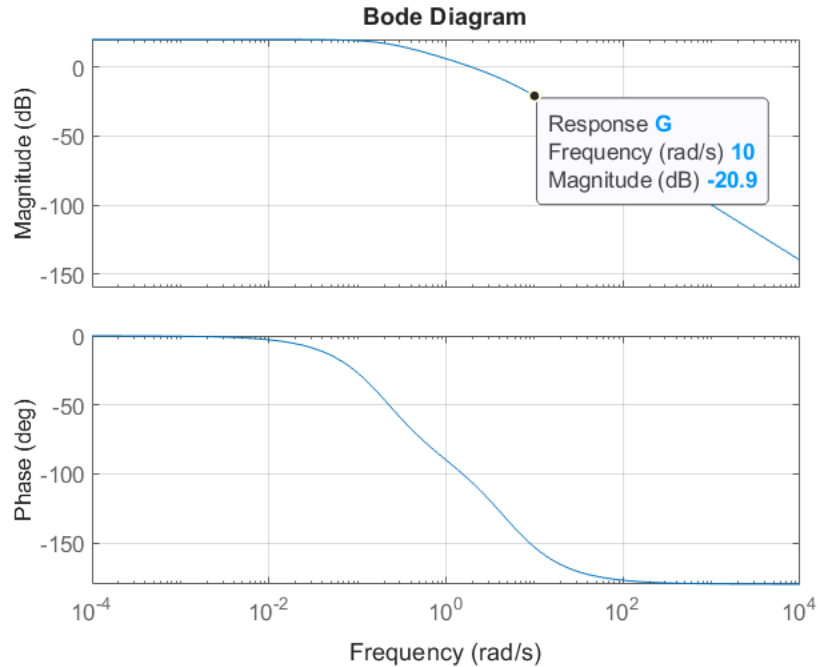


Figure 3:  $\omega_{0dB}$  em 10 rad/s no diagrama da planta

Sendo assim podemos definir um ganho  $K_0$  para elevar o diagrama de bode para a frequência de cruzamento 0 db para 10 rad/s. Através da equação:

$$K_0 = 10^{\frac{20.9}{20}} = 10^{1.045} = 11.0917 \quad (3)$$

Resultando assim no Diagrama de Bode com o primeiro requisito completo.

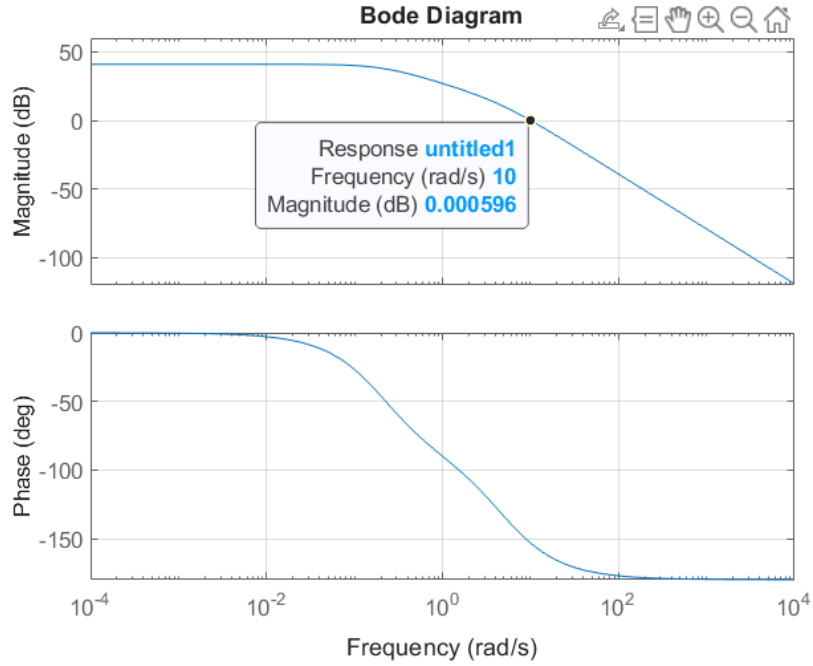


Figure 4: 10 rad/s na frequência de cruzamento 0 dB

### 3.3 Compensador com Ganho + Avanço

$$C_b(s) = K_0 \cdot \left( K_b \cdot \frac{s + z_b}{s + p_b} \right) \quad (4)$$

Será utilizado o compensador de avanço para cumprir o requisito de manter a margem de fase entre 60° e 70° incluindo os valores das extremidades. Para isso precisamos definir uma margem de fase alvo que para a segurança do projeto será de 70°. Posteriormente é analisado margem de fase atual que é de 26,8° e reduzimos esse valor da margem de fase alvo para descobriremos nosso  $\Theta_M$ .

$$\Theta_M = 70^\circ - 26,8^\circ = 43,2^\circ \quad (5)$$

Agora descobriremos o valor de  $\beta$  através de sua equação.

$$\beta = \frac{1 + \sin(\Theta_M)}{1 - \sin(\Theta_M)} = 5.3401 \quad (6)$$

Depois iremos descobrir o valor do polos e zeros do compensador de avanço, através das equações abaixo.

$$p_b = \omega_{0_{alvo}} \cdot \sqrt{\beta} = 23.1086 \quad (7)$$

$$(8)$$

$$z_b = \frac{p_b}{\beta} = 4.3274 \quad (9)$$

Definimos também o ganho do compensador de avanço:

$$K_b = \sqrt{\beta} = 2.3109 \quad (10)$$

Resultando assim no nosso compensador de avanço:

$$C_b(s) = 11.0917 \cdot \left( 2.3109 \cdot \frac{s + 4.3274}{s + 23.1086} \right) \quad (11)$$

Para finalmente atingirmos nosso requisito de margem de fase.

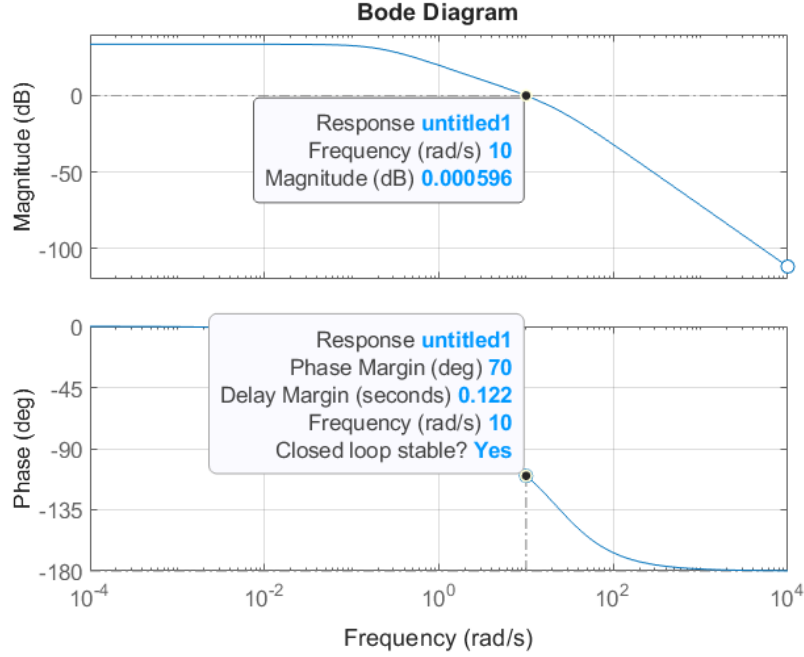


Figure 5: Margem de fase atendendo aos requisitos

### 3.4 Compensador Completo (Ganho + Avanço + Atraso)

$$C_a(s) = K_0 \cdot \left( \frac{s + z_a}{s + p_a} \right) \cdot \left( K_b \cdot \frac{s + p_b}{s + z_b} \right) \quad (12)$$

Agora nosso objetivo é atingir um erro de posição menor ou igual a um décimo de milésimo, ou seja um K<sub>p</sub> de 9999 com o compensador de atraso e para isso precisamos primeiro definir o valor de  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{K_{p_{alvo}}}{K_{p_{novo}}} = 2.3106e + 03 \quad (13)$$

Assim conseguimos definir o polo e o zero do compensador de atraso.

$$z_a = \frac{\omega_{0_{alvo}}}{10} = 1 \quad (14)$$

$$p_a = \frac{zero_a}{\alpha} = 4.3278e - 04 \quad (15)$$

Chegando assim no nosso compensador final atingindo todos os requisitos:

$$C_s = 11.0917 \cdot \left( \frac{s + 1}{s + 4.3278 \times 10^{-4}} \right) \cdot \left( 2.3109 \cdot \frac{s + 4.3274}{s + 23.1086} \right) \quad (16)$$

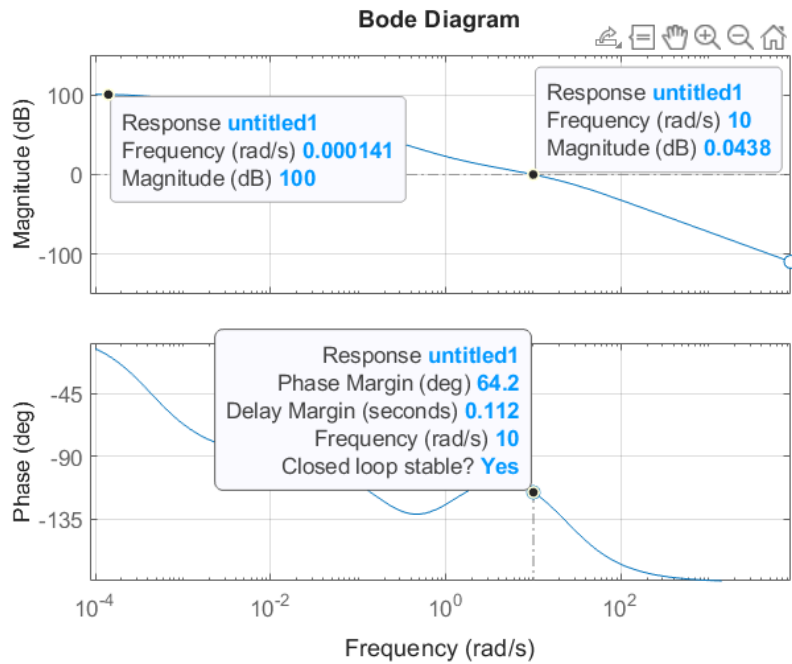


Figure 6: Compensador final

Note que ainda ocorre uma perda na margem de fase devido a isso ser uma característica do compensador de atraso.

## 4 Análise dos compensadores no Matlab/Simulink

- Resposta do sistema sem compensador: A simulação sem compensação forneceu a resposta básica do sistema, servindo como referência. Resposta lenta, alto tempo de acomodação e erro permanente visível. Estável, mas com baixo desempenho.

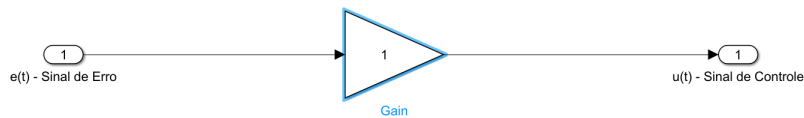


Figure 7: Diagrama de blocos sem compensador

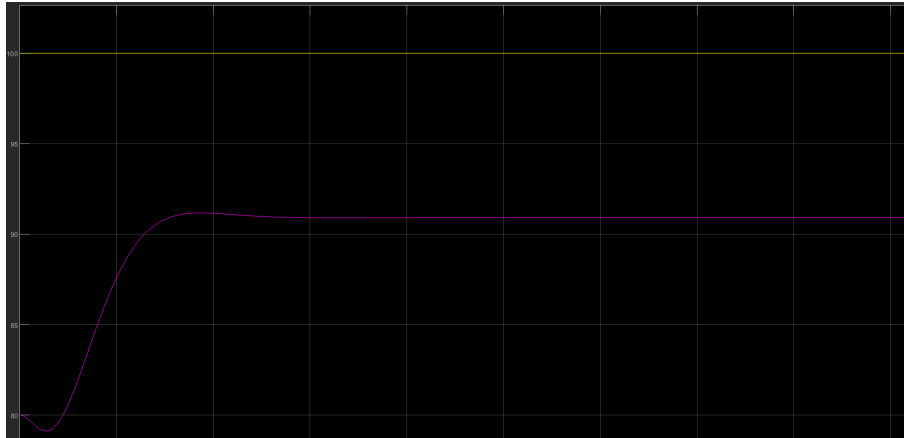


Figure 8: Resposta sem compensador

- Resposta do sistema ao compensador de ganho: Cruzamento ajustado para 10 rad/s, melhora na resposta, mas com erro de regime ainda presente.

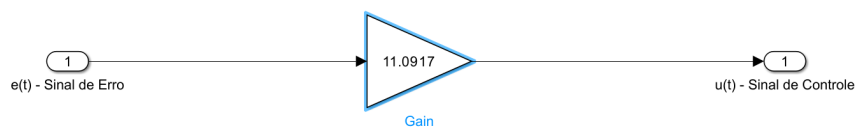


Figure 9: Diagrama de blocos com compensador

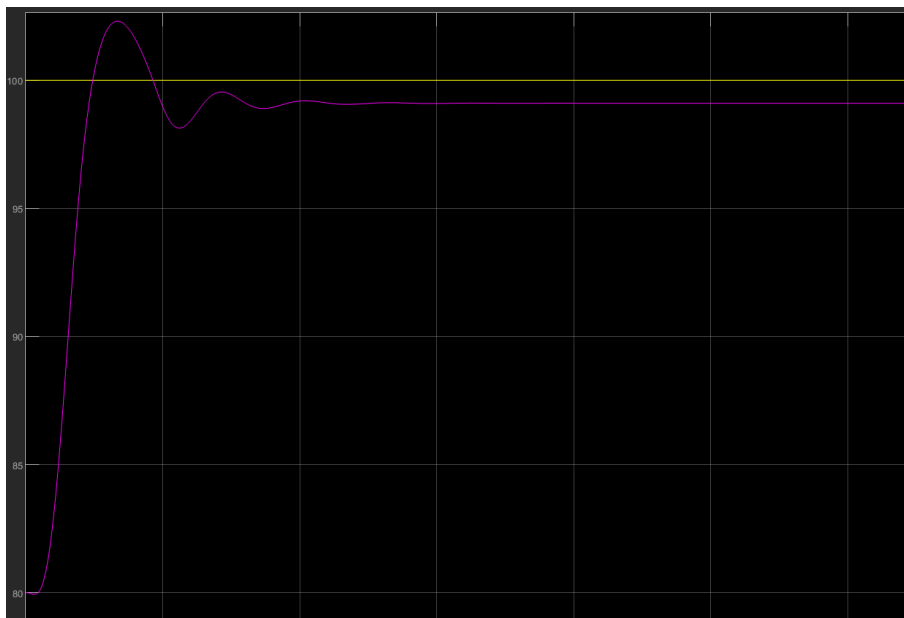


Figure 10: Resposta com compensador K0

- Resposta ao sistema ao compensador de ganho e avanço: Melhora significativa na estabilidade relativa e resposta transitória. Tempo de acomodação reduzido.

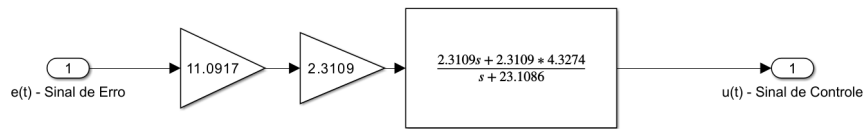


Figure 11: Diagrama de blocos com compensador de ganho e avanço

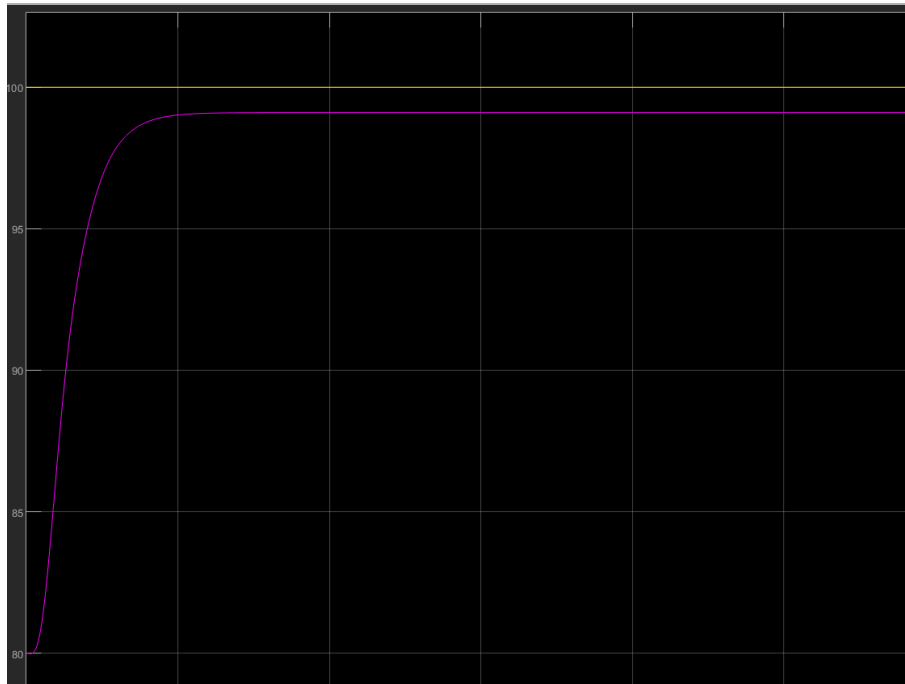


Figure 12: Resposta ao compensador de ganho e avanço

- Resposta ao sistema ao compensador de ganho e atraso: Redução do erro em regime permanente com leve prejuízo na margem de fase.

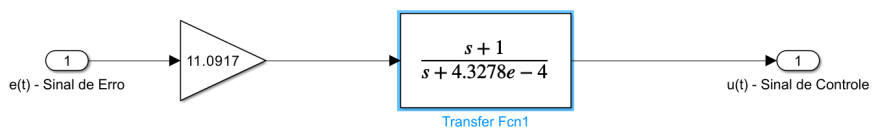


Figure 13: Diagrama de blocos com compensador de ganho e atraso



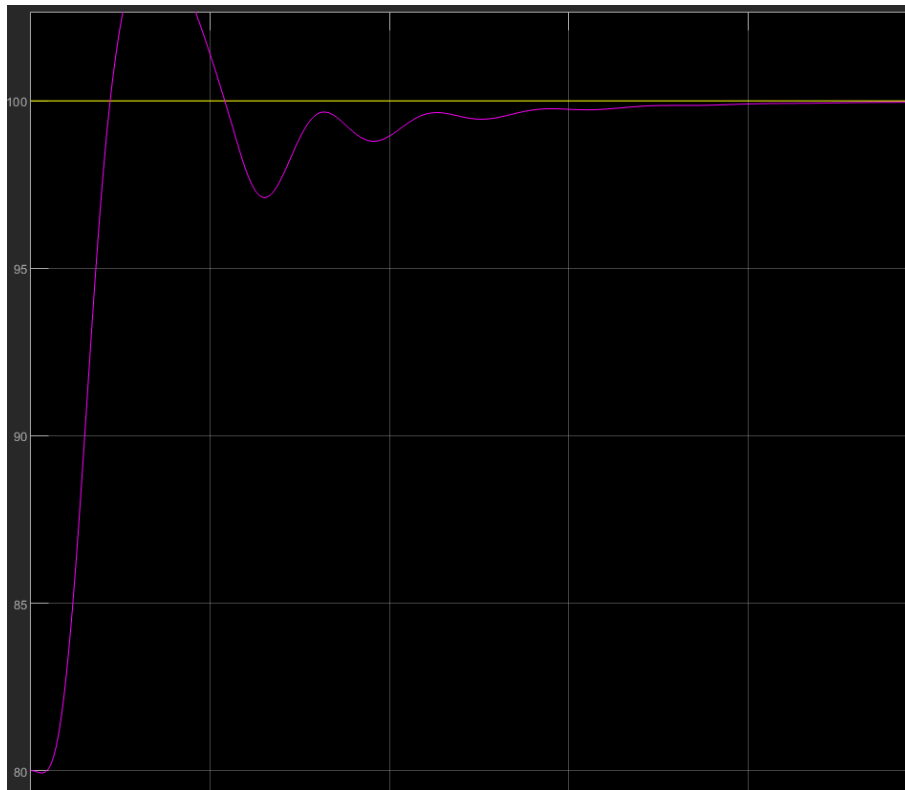


Figure 14: Resposta ao compensador de ganho e atraso

- Resposta ao sistema ao compensador de ganho, avanço e atraso: Todos os requisitos atendidos. Resposta dinâmica eficiente, com estabilidade, desempenho e precisão.

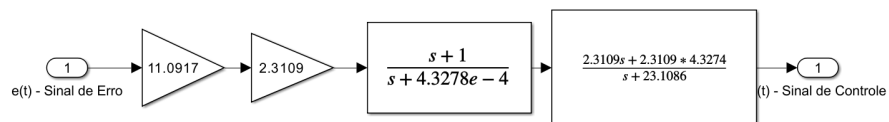


Figure 15: Diagrama de blocos com compensador de ganho, avanço e atraso

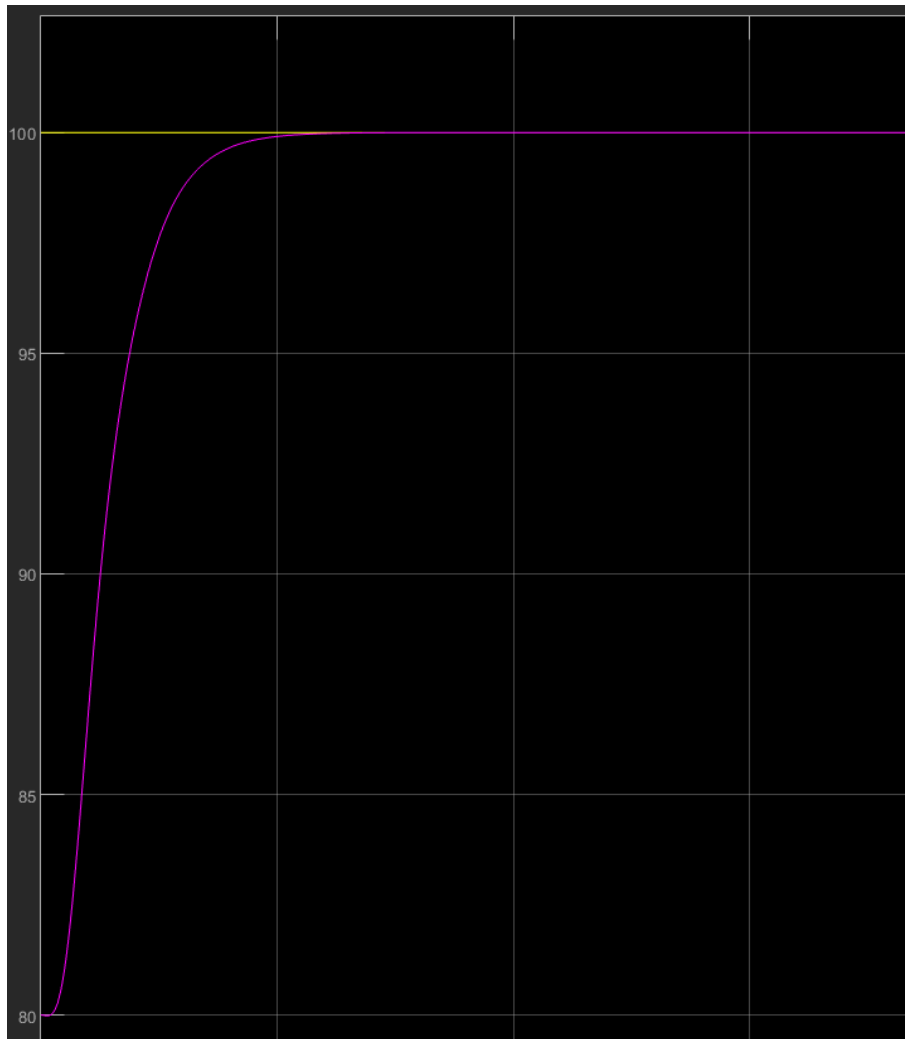


Figure 16: Resposta ao compensador de ganho, avanço e atraso

## 5 Conclusão

O projeto demonstrou a eficácia da metodologia de compensação por ganho, avanço e atraso. As simulações validaram os critérios de desempenho estabelecidos, evidenciando a importância de ajustes cuidadosos nos parâmetros do controlador para atender às exigências de estabilidade, desempenho dinâmico e precisão em regime permanente.