

1 Atividade 6

1.1 Introdução ao Modelo com Controlador PID

Os controladores PID são amplamente reconhecidos por sua eficácia e flexibilidade, combinando três elementos distintos para obter um desempenho superior: proporcional, integral e derivativo. Ao contrário dos controladores proporcionais, que ajustam a resposta do sistema de maneira direta ao erro atual, os controladores PID aproveitam três abordagens diferentes, cada uma desempenhando uma função específica.

O componente proporcional funciona de modo semelhante ao controlador proporcional simples, ajustando a saída do sistema em relação direta ao erro, com o objetivo de reduzir a diferença entre o valor medido e o valor desejado. No entanto, quando o componente proporcional sozinho não consegue corrigir totalmente o erro acumulado, entra em ação o componente integral, que soma e integra o erro ao longo do tempo para eliminá-lo.

Além disso, o componente derivativo desempenha um papel crucial ao prever mudanças no erro, ajudando a evitar que essas variações causem impactos negativos na saída do sistema. Com a integração desses três elementos, os controladores PID conseguem oferecer um controle mais preciso e estável, ajustando continuamente a saída para manter o sistema no estado desejado. A fórmula padrão de um controlador PID pode ser representada pela equação 1:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T) dT + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

O método de Ziegler-Nichols, desenvolvido por John G. Ziegler e Nathaniel B. Nichols, é uma técnica consolidada para a sintonia de controladores PID. Este método é particularmente útil porque simplifica a configuração dos controladores ao fornecer fórmulas práticas para calcular os ganhos K_p , K_i , e K_d com base na resposta do sistema a uma entrada de teste. Esses parâmetros são ajustados para otimizar a resposta do sistema em termos de tempo de subida, sobreposição e tempo de assentamento.

Os valores dos ganhos são estabelecidos de acordo com a estabilidade observada do sistema e são tipicamente calculados a partir do ganho crítico K_c e do período crítico P_c , que são obtidos através de testes de malha aberta. A Tabela 1 resume os valores recomendados para cada tipo de ganho:

K_p	K_i	K_d
$0,6 \times K_c$	$\frac{2}{P_c}$	$0,125 \times P_c$

Table 1: Valores dos ganhos segundo o método de Ziegler-Nichols

1.2 Controlador PID

Com base nas análises conduzidas na Atividade 4, foi estabelecido um valor limite para o ganho crítico, K_c , de 14.93. Este parâmetro é crucial para o ajuste dos parâmetros do controlador PID utilizando o método de Ziegler-Nichols. Semelhante ao procedimento adotado na Atividade 5, simulou-se o comportamento do sistema com um sinal de entrada em forma de degrau, cuja amplitude é definida como $A = \frac{m}{4}$. Considerando que $m = 10$, a amplitude do degrau é $A = 2.5$. Este cenário permitiu a observação direta das respostas do sistema sob o efeito do ganho crítico.

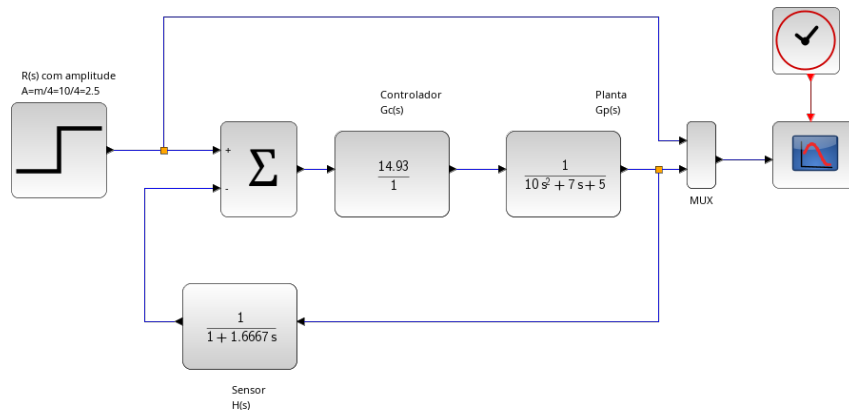


Figure 1: Diagrama mostrando o sistema no ponto crítico com $K_c = 14.93$

A simulação realizada no ganho crítico, $K_c = 14.93$, demonstra que o sistema atinge uma condição de oscilação não amortecida, o que é indicativo de uma fronteira entre a estabilidade e a instabilidade. Essa observação é fundamental, pois o ponto de oscilação não amortecida é usado pelo método de Ziegler-Nichols para calibrar os controladores PID, visando uma resposta rápida e minimamente oscilatória em regime permanente.

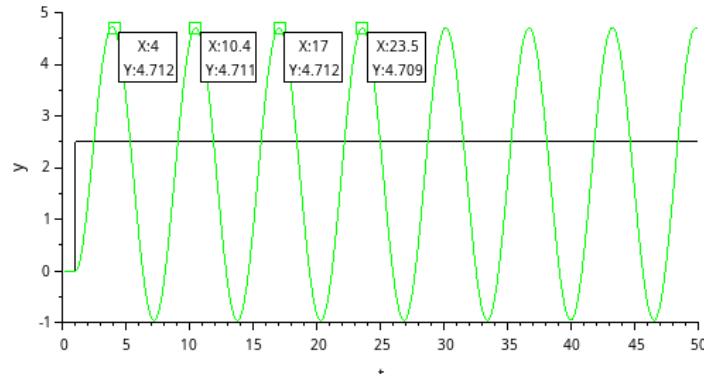


Figure 2: Resposta do sistema com o controlador PID ajustado para $K_c = 14.93$

Como observado no gráfico de resposta temporal, o sistema exibe oscilações contínuas com uma amplitude aproximadamente constante, confirmando a caracterização do ganho crítico. Esta condição é explorada para determinar o período crítico P_c , calculado pela medição do intervalo entre picos consecutivos. O valor de P_c é crucial para definir os parâmetros do controlador PID, pois influencia diretamente a dinâmica de correção implementada pelo controlador.

Os dados obtidos deste experimento são essenciais para a calibração dos parâmetros do controlador PID. Ajustar o controlador para operar próximo do ponto crítico, mas com garantias de estabilidade, permite aproveitar a máxima capacidade de resposta do sistema sem comprometer sua segurança operacional. Esta abordagem visa melhorar tanto a eficiência quanto a estabilidade do sistema, tornando o controle mais robusto frente a variações nas condições operacionais.

1.2.1 Determinação do Período Crítico

O período crítico P_c foi determinado a partir da análise do gráfico de resposta em regime oscilatório no ganho crítico. Identificamos os picos consecutivos e medimos o tempo entre eles para calcular o P_c . A partir dos pontos identificados no gráfico, com os tempos $t_1 = 9.98$ s e $t_2 = 16.894$ s, o período crítico foi calculado como:

$$P_c = t_2 - t_1 = 16.894 - 9.98 = 6.914 \text{ s}$$

Este valor é importante para o ajuste subsequente dos parâmetros do controlador PID utilizando o método de Ziegler-Nichols.

1.2.2 Determinação dos Parâmetros do Controlador PID

Após identificarmos o ganho crítico $K_c = 14.93$ através de análises detalhadas, empregamos o método de Ziegler-Nichols para ajustar os parâmetros do controlador PID. Este método é eficaz para sintonizar controladores em sistemas onde a resposta precisa ser otimizada em termos de estabilidade e rapidez.

1.2.3 Cálculo dos Parâmetros do Controlador PID

O método de Ziegler-Nichols, conhecido por sua eficiência na configuração inicial de controladores PID, utiliza o ganho crítico K_c e o período crítico P_c para estabelecer os parâmetros de controle, ajustando assim a resposta do sistema.

- **Ganho Proporcional K_p :**

$$K_p = 0.6 \times K_c = 0.6 \times 14.93 = 8.958$$

- **Ganho Integral K_i :**

$$K_i = \frac{2}{P_c} = \frac{2}{6.914} \approx 0.289$$

- **Ganho Derivativo K_d :**

$$K_d = 0.125 \times P_c = 0.125 \times 6.914 = 0.864$$

1.2.4 Implementação e Validação dos Parâmetros

Os parâmetros $K_p = 8.958$, $K_i = 0.289$, e $K_d = 0.864$ são implementados no controlador PID no ambiente de simulação Scilab. Esses valores são projetados para ajustar o sistema a fim de responder de forma ideal em diversas condições operacionais, melhorando tanto a estabilidade quanto a precisão do sistema.

A eficácia desses parâmetros será validada por meio de simulações adicionais, que irão confirmar se eles conseguem manter o desempenho desejado do sistema, assegurando que o controle PID seja eficiente e eficaz.

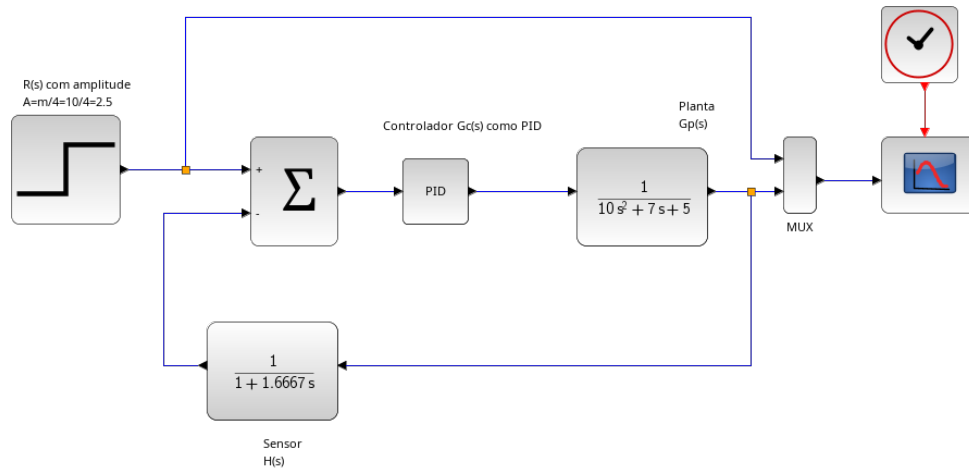


Figure 3: Resposta do sistema com os parâmetros do PID ajustados.

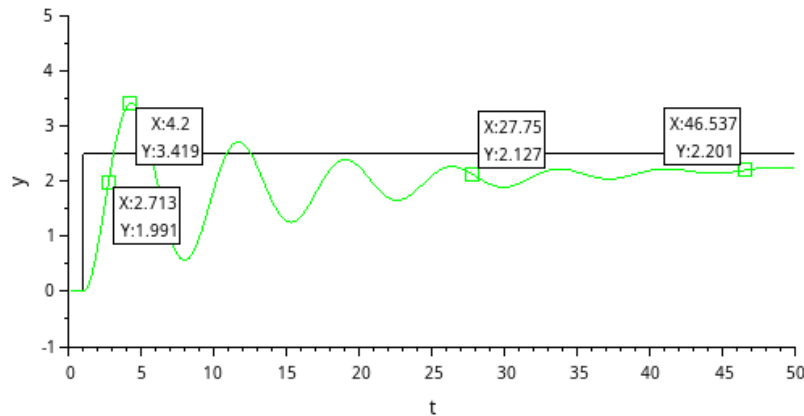


Figure 4: Resposta do sistema com os parâmetros do PID ajustados.

Após a validação inicial, pode ser necessário um refinamento manual dos parâmetros para otimizar ainda mais a resposta do sistema. Este processo de ajuste fino baseia-se na análise detalhada das respostas obtidas e na experiência prática, permitindo uma sintonia mais precisa que se adapta adequadamente às especificidades do sistema e às variações nas condições operacionais. Este ajuste é crucial para alcançar o melhor equilíbrio entre estabilidade e rapidez na resposta do controlador PID.

Subsequentemente, novas simulações serão realizadas para validar a eficácia dos parâmetros ajustados. Esta etapa é fundamental para verificar se os ajustes refinados mantêm a saída do sistema próxima ao valor desejado sob uma gama mais ampla de condições operacionais, garantindo a eficácia e a eficiência do controle.

1.3 Análise de Resposta com Controlador Proporcional e PID Ajustado

Esta seção compara a resposta do sistema utilizando um controlador proporcional e um controlador PID ajustado, especificamente configurados com os parâmetros $K_p = 8.958$, $K_i = 0.310$, e $K_d = 0.805$. A análise foca na eficácia de cada controlador em atingir e manter o valor de referência desejado, sob uma amplitude de degrau de $A = 2.5$. Este estudo visa elucidar as vantagens e limitações de cada abordagem de controle em termos de resposta dinâmica e estabilidade.

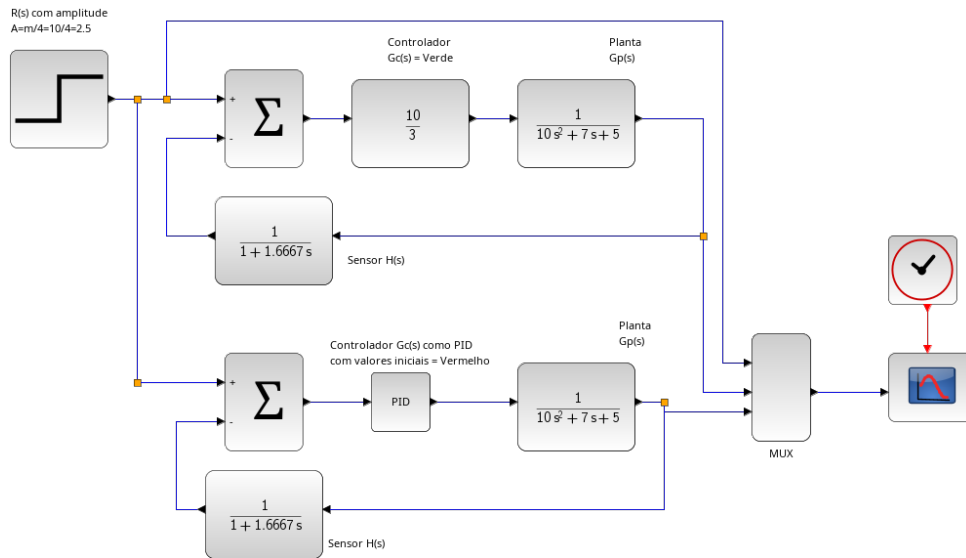


Figure 5: Diagrama ilustrativo do sistema de controle comparando a resposta com controlador proporcional e PID ajustado.

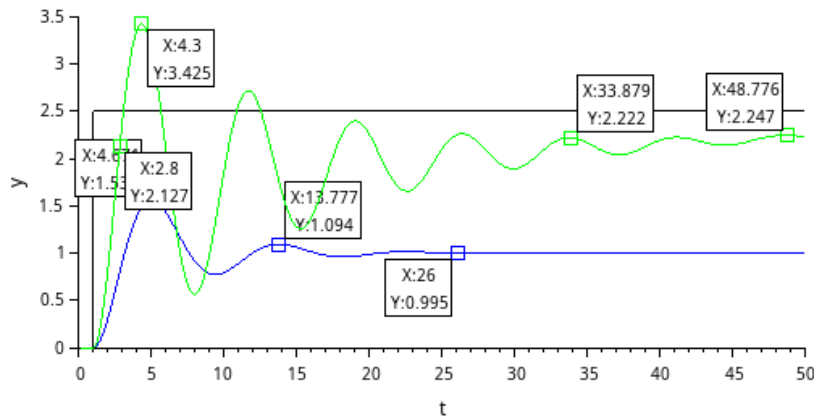


Figure 6: Resposta temporal do sistema com controlador proporcional e PID ajustado.

1.3.1 Controlador Proporcional (Cor Azul)

Comportamento: O controlador proporcional oferece uma resposta imediata, característica desejada em muitas aplicações industriais por sua simplicidade e eficácia em sistemas menos complexos. No entanto, como evidenciado na Figura 8, ele falha em eliminar o erro de estado estacionário, estabilizando abaixo do valor de referência desejado.

Estado Estacionário: A incapacidade de ajustar o erro estacionário torna o controlador proporcional menos adequado para aplicações que demandam precisão contínua e ajuste fino, pois não pode corrigir desvios permanentes sem intervenção externa.

1.3.2 Controlador PID Ajustado (Cor Verde)

Comportamento: A configuração ajustada do PID demonstra superioridade em alcançar e manter o valor desejado rapidamente, com uma oscilação inicial (overshoot) significativamente reduzida e rápida estabilização, como ilustrado na Figura 8. Essa resposta é crucial em processos que não podem tolerar grandes desvios temporários ou onde o controle preciso é crítico.

Estado Estacionário: O controlador PID, ajustado com parâmetros otimizados, mantém o valor de referência com alta precisão, ilustrando a importância da ação integral em corrigir erros acumulados e a ação derivativa em antecipar e mitigar futuras variações, resultando em uma resposta estável e precisa.

1.3.3 Conclusão

A análise comparativa entre o controlador proporcional e o PID ajustado destaca a simplicidade e a resposta imediata do primeiro, ideal para aplicações menos críticas, contra a precisão e a estabilidade superior do segundo. Com parâmetros ajustados ($K_p = 8.958$, $K_i = 0.310462589$, $K_d = 0.80525$), o controlador PID se adapta melhor às necessidades de aplicações que exigem controle dinâmico e alta fidelidade.

No entanto, é crucial reconhecer que os ajustes nos parâmetros K_p , K_i , e K_d do PID não são sem riscos e devem ser continuamente revisados. Alterações imprudentes em K_p podem levar a overshoots excessivos e instabilidade, enquanto K_i elevado pode causar oscilações indesejadas e resposta lenta, afetando negativamente a eficácia do sistema. Ajustes em K_d também requerem cautela, pois, embora possam melhorar a estabilidade, podem resultar em uma resposta demasiadamente amortecida.

Portanto, é recomendado que os ajustes nos parâmetros do PID sejam feitos com base em testes rigorosos e análise cuidadosa. A busca por um equilíbrio ótimo entre rapidez de resposta, estabilidade e precisão deve ser uma prática regular, adaptando o controlador às variações nas condições operacionais e às exigências específicas de cada aplicação. Esse processo contínuo de otimização ajuda a assegurar a performance aprimorada e a segurança do sistema controlado.

1.4 Teste de Ajuste de Parâmetros do K_p do Controlador PID

1.4.1 Contextualização e Análise do Ajuste de K_p

Para otimizar o desempenho do controlador PID, realizamos uma série de simulações alterando o valor de K_p para entender seu impacto na dinâmica do sistema. O objetivo foi encontrar um equilíbrio ideal entre a resposta rápida e a estabilidade do sistema, testando K_p em 80% e 150% do valor inicial de 8.958, além do próprio valor inicial.

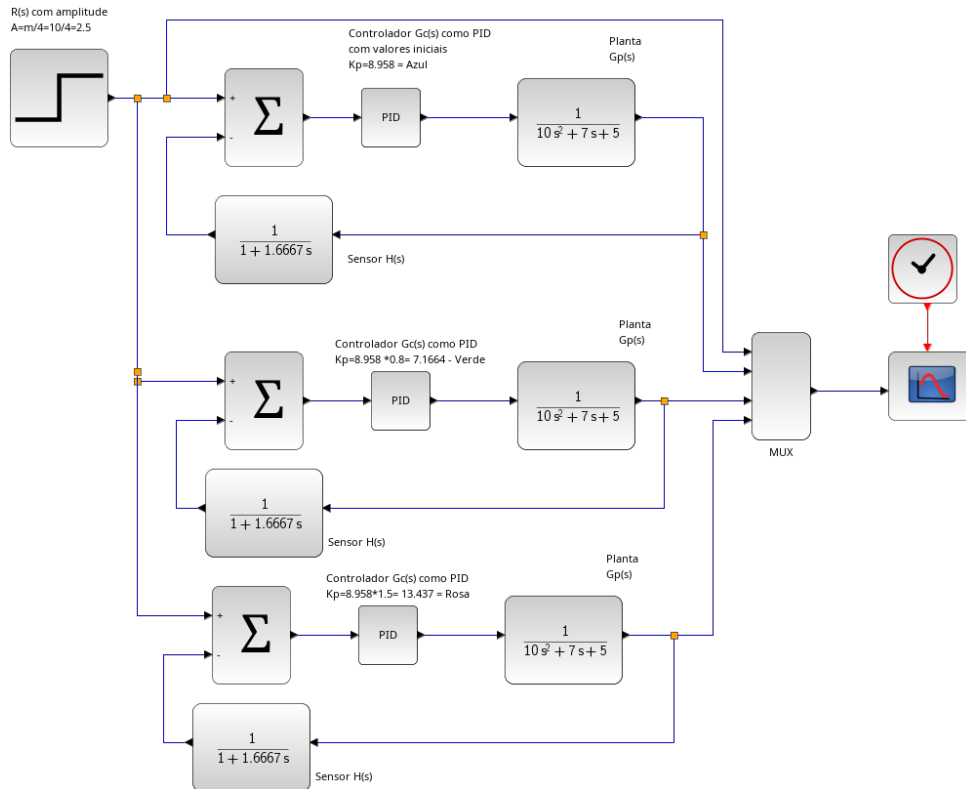


Figure 7: Diagrama de resposta do sistema com diferentes valores de K_p .

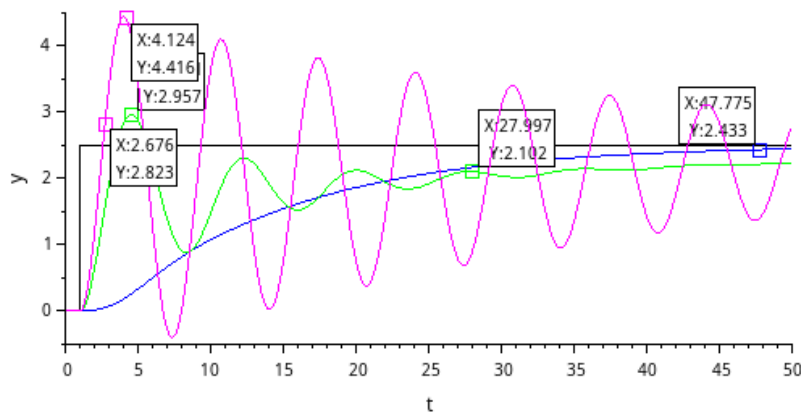


Figure 8: Resposta do sistema para o K_p ajustado em comparação com outros valores.

1.4.2 Discussão dos Resultados e Escolha de K_p

A análise das respostas mostrou que a redução de K_p para 7.1664 (80% do valor inicial) oferece uma melhoria significativa em termos de controle de overshoot e estabilidade do sistema. Este ajuste resulta em uma resposta onde o overshoot é notavelmente menor, o que é vantajoso para sistemas que requerem estabilidade rápida sem oscilações excessivas.

Vantagens:

- **Menor Overshoot:** Redução significativa no overshoot, proporcionando uma resposta mais suave e estável. Essa característica é particularmente benéfica para aplicações que não podem tolerar grandes desvios temporários de suas variáveis de processo.

- **Tempo de Acomodação Razoável:** O sistema atinge o estado estacionário mais rapidamente, o que é crucial para aplicações que demandam respostas rápidas e precisas. Isso é conseguido sem induzir instabilidade prolongada.

Desvantagens:

- **Comprometimento da Rapidez Inicial:** A resposta inicial é ligeiramente mais lenta, o que pode não ser ideal para todos os tipos de aplicações, especialmente aquelas que dependem de uma atuação rápida após uma mudança de condições.
- **Sensibilidade a Distúrbios:** A redução do K_p pode diminuir a capacidade do sistema de reagir eficientemente a perturbações súbitas ou variações significativas na entrada, podendo resultar em um desempenho subótimo sob condições de carga variável.

Foi analisado a possibilidade de redução adicional de K_p diminuir ainda mais K_p além de 80% poderia potencialmente levar a uma resposta demasiadamente lenta, comprometendo a capacidade do sistema de reagir a alterações rápidas. Essa mudança requer uma análise cuidadosa das prioridades do sistema: estabilidade versus rapidez de resposta.

1.4.3 Implementação e Avaliação Futura do Novo K_p

O novo K_p de 7.1664 será implementado no controlador PID para uso continuado. Este ajuste será acompanhado de monitoramento e avaliação contínuos para assegurar que ele atende às exigências do sistema em variadas condições operacionais.

A decisão de ajustar o K_p para 7.1664 reflete um compromisso bem fundamentado entre resposta rápida e controle de oscilações, adequado para muitas aplicações industriais e de automação. Avaliações futuras focarão em refinamentos adicionais e na otimização de K_i e K_d para maximizar a eficácia do sistema de controle.

1.5 Comparação entre Controlador Proporcional, PID com Dados Iniciais e PID Ajustado

Esta seção apresenta uma análise comparativa do desempenho de três configurações distintas de controladores: Proporcional, PID com valores iniciais e PID ajustado. A análise foca na resposta dos controladores em termos de estabilidade, tempo de resposta e precisão no estado estacionário. Ajustar o parâmetro K_p tem implicações significativas na dinâmica de controle, impactando diretamente a eficácia e eficiência do sistema.

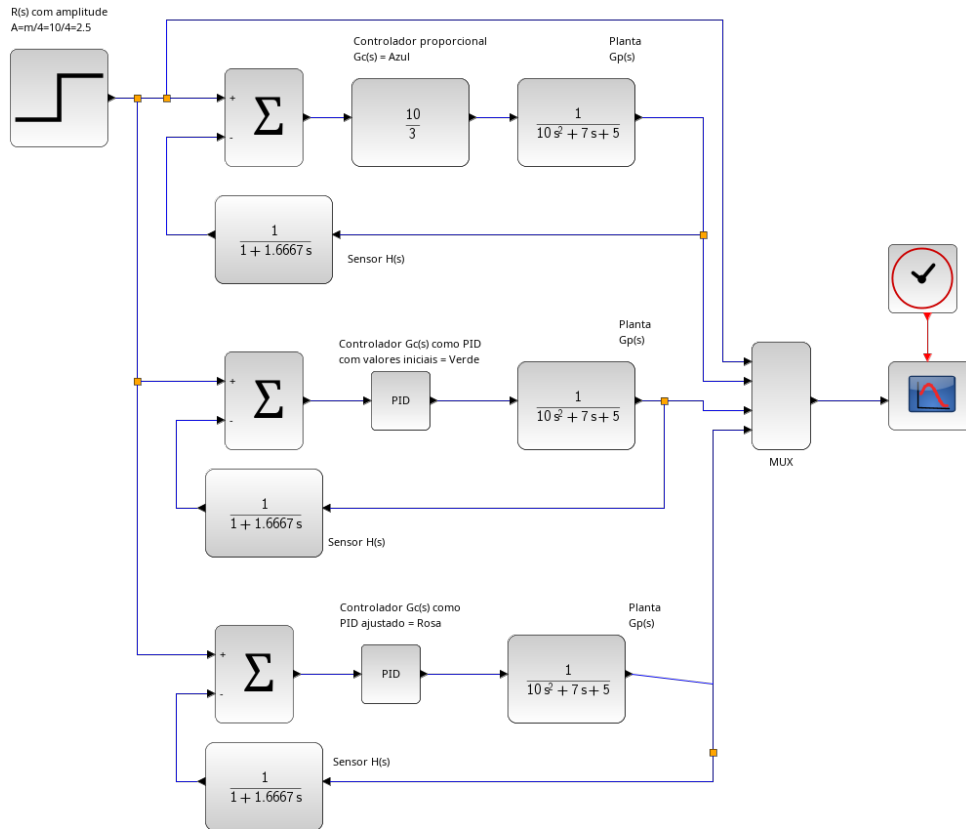


Figure 9: Diagrama de resposta do sistema com diferentes configurações de K_p .

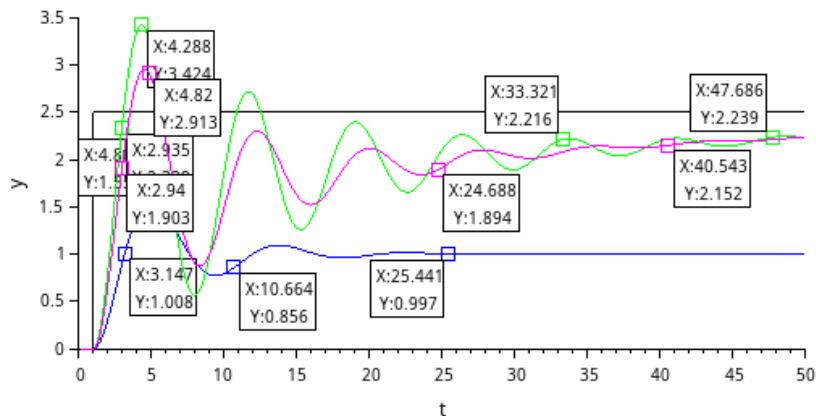


Figure 10: Comparação das respostas temporais dos controladores sob a mesma condição de teste.

1.5.1 Análise dos Controladores

1.5.2 Controlador Proporcional (Cor Azul)

Comportamento: O controlador proporcional, adequado para sistemas onde precisão extrema não é primordial, mostra uma resposta rápida inicial, mas falha em eliminar o erro de estado estacionário, uma limitação comum devido à ausência de ação integral. **Estado Estacionário:** A resposta estabiliza significativamente abaixo do valor de referência, evidenciando a limitação deste tipo de controlador em corrigir completamente o erro de estado estacionário, adequado para aplicações onde desvios menores são toleráveis.

1.5.3 PID com Valores Iniciais (Cor Verde)

Comportamento: Este controlador exibe um overshoot inicial significativo e oscilações antes de estabilizar, característica de uma resposta rápida seguida de uma correção intensa pela ação integral. **Estado Estacionário:** Atinge e mantém o valor desejado, com a componente integral ajustando o erro acumulado e garantindo que a saída final corresponda exatamente ao valor de referência.

1.5.4 PID Ajustado (Cor Rosa)

Comportamento: A redução de K_p para 7.1664 atenuou o overshoot e proporcionou uma abordagem mais suave na resposta ao degrau, indicando um melhor equilíbrio entre as ações proporcional e integral. **Estado Estacionário:** Alcança o estado estacionário com menos oscilações, refletindo uma melhoria na estabilidade geral do sistema. A ação integral continua a compensar qualquer erro residual, assegurando que a saída esteja alinhada ao valor do degrau.

1.6 Conclusão e Implicações para o Ajuste de K_p

A redução de K_p para 80% do valor inicial demonstrou melhorar a resposta do sistema ao reduzir o overshoot e aumentar a estabilidade sem comprometer excessivamente a resposta rápida. Essa modificação evidencia a necessidade de um equilíbrio cuidadoso na configuração de K_p , onde a eficiência operacional e a estabilidade precisam ser otimizadas em conjunto.

Considerações Adicionais:

- Uma redução adicional de K_p pode ser explorada para sistemas onde a estabilidade é mais crítica que a resposta rápida. No entanto, é essencial garantir que essa redução não comprometa a capacidade do sistema de responder a perturbações repentinas.
- O ajuste fino de K_p deve ser realizado com consideração das características específicas do sistema e das condições operacionais. A simulação controlada é recomendada para determinar o melhor conjunto de parâmetros, equilibrando estabilidade e precisão.

Embora a configuração atual de K_p tenha mostrado resultados promissores, é fundamental reconhecer que sempre existem oportunidades para refinar ainda mais os parâmetros do controlador PID. O processo de ajuste manual de K_p , K_i , e K_d deve ser contínuo e iterativo, adaptando-se às mudanças nas condições operacionais e às necessidades específicas de cada sistema. Ajustes manuais são essenciais para calibrar o controlador de modo a responder adequadamente sob diferentes cenários, permitindo uma melhoria contínua do desempenho do sistema.