



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

RELATÓRIO DE LABORATÓRIO DE SISTEMA DE CONTROLE I
PARTE III

ANA JÚLIA PEREIRA CORRÊA
DANIEL SILVEIRA GONZALEZ
JÚLIO MELO CAMPOS
REBECA DA SILVA CAMPOS
STEPHESON CLAYTON DO ROSÁRIO CUSTÓDIO
VENICIO CONDE CONCEIÇÃO

MANAUS, AM

2024

ANA JÚLIA PEREIRA CORRÊA
DANIEL SILVEIRA GONZALEZ
JÚLIO MELO CAMPOS
REBECA DA SILVA CAMPOS
STEPHESON CLAYTON DO ROSÁRIO CUSTÓDIO
VENICIO CONDE CONCEIÇÃO

RELATÓRIO DE LABORATÓRIO DE SISTEMA DE CONTROLE I

Bloco de relatórios apresentado para obtenção de nota parcial da disciplina Laboratório de Sistema de Controle I ministrado por Prof. Dr. Florindo Antonio de Carvalho Ayres Junior .

MANAUS, AM

2024

Resumo

Este relatório aborda a análise e implementação de técnicas de controle – incluindo LQR, PID e Controle Adaptativo – em um sistema com filtro passa-baixas utilizando a topologia Sallen-Key. O circuito é alimentado por uma fonte simétrica e emprega amplificadores operacionais para processar sinais, permitindo a filtragem de frequências indesejadas e redução de ruídos. O sistema foi configurado com diferentes valores de resistores para aquisição de novos dados, possibilitando a análise do comportamento dinâmico. Além disso, é investigada a integração entre circuitos analógicos e técnicas de controle modernas, avaliando como cada abordagem contribui para melhorar a resposta do sistema dinâmico.

Palavras-chave: Filtro passa-baixa, Sistema de Controle, LQR, PID, Controle Adaptativo, Amplificadores.

Lista de Figuras

1	Resposta em frequência de um filtro de 1 ^o ordem	8
2	Resposta em frequência de filtros Butterworth de diversas ordens	8
3	Um filtro passa-baixa de ganho unitário implementado com uma topologia Sallen-Key	10
4	Exemplo de Super diodo	13
5	Fonte de alimentação simétrica	14
6	Circuito da prática de controle	21
7	Circuito Separado da Alimentação Simétrica	22
8	Circuito Separado da captação do sinal de V1	22
9	Circuito Separado da captação do sinal de VC1	23
10	Circuito Separado do Sallen Key	23
11	Montagem do Experimento	24
12	Resposta da Simulação via arduino IDE sem controladores para 10K	25
13	Resposta da Simulação via arduino IDE sem controladores para 180K . . .	25
14	Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador LQR com resistor de 10k	26
15	Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador LQR com resistor de 180k	26
16	Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador PID + adaptativo com resistor de 10k	27
17	Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador PID + adaptativo com resistor de 180k	27

Sumário

1	Introdução	5
1.1	Objetivos	6
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Filtro Passa-Baixa	7
2.2	Método Sallen-Key	9
2.3	Espaço de Estados	11
2.4	Super Diodo	12
2.5	Fonte de Alimentação Simétrica	13
2.6	Equações de Diferenças	14
2.7	LQR (Linear Quadratic Regulator)	15
2.8	Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo)	16
2.9	Controle Adaptativo	18
3	Metodologia	20
3.1	Descrição da Prática	20
3.1.1	Materiais	20
3.1.2	Montagem	21
3.1.3	Experimento	24
4	Resultados	25
4.1	LQR (Linear Quadratic Regulator)	26
4.1.1	Prática	26
4.2	Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e Controle Adaptativo	27
4.2.1	Prática	27
4.2.1.1	Para resistores de 10K	27
4.2.1.2	Para resistores de 180K	27
5	Conclusão	29
6	Referências	31

1 Introdução

Este relatório apresenta os resultados experimentais obtidos na análise e implementação de técnicas de controle em um sistema com topologia Sallen-Key, explorando suas aplicações práticas e características dinâmicas. O objetivo principal deste trabalho é investigar a integração entre diferentes técnicas de controle – como LQR, PID e Controle Adaptativo – no contexto de filtros passa-baixas.

As técnicas de controle desempenham papéis fundamentais no aprimoramento de sistemas dinâmicos. Controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e eficiência, proporcionando controle robusto em aplicações industriais. Por outro lado, o controle LQR (Linear Quadratic Regulator) destaca-se pela otimização de desempenho através da minimização de um custo quadrático, garantindo estabilidade e resposta eficiente. Já os métodos de Controle Adaptativo são essenciais em cenários onde os parâmetros do sistema variam, permitindo ajustes automáticos para manter o desempenho desejado.

Nesta análise, os filtros passa-baixas com topologia Sallen-Key foram escolhidos devido à sua estabilidade e flexibilidade no projeto de sistemas de segunda ordem. Esses filtros são cruciais para o processamento de sinais, permitindo a passagem de componentes de baixa frequência, atenuando altas frequências e reduzindo ruídos. No contexto de controle, eles atuam como elementos fundamentais para suavizar sinais e preparar o sistema para responder adequadamente aos comandos do regulador.

Ao longo do trabalho, são investigados aspectos como a resposta em frequência do filtro, a influência da variação dos componentes na frequência de corte e no fator de qualidade, além da análise do comportamento em presença de ruídos. A integração dessas técnicas de controle é explorada para verificar como contribuem para melhorar o desempenho do sistema.

Os resultados obtidos são analisados para avaliar a eficácia da topologia Sallen-Key como plataforma para implementar sistemas controlados e sua importância na integração de circuitos analógicos e digitais em sistemas modernos de controle. Além disso, é realizada a identificação do modelo que melhor define a resposta dinâmica do sistema estudado, considerando os critérios de desempenho das diferentes abordagens de controle empregadas.

1.1 Objetivos

Este relatório tem como objetivo apresentar uma análise detalhada sobre a aplicação de técnicas de controle – incluindo LQR, PID e Controle Adaptativo – em um filtro passa-baixas com topologia Sallen-Key.

2 Fundamentação Teórica

Para compreender melhor o sistema implementado sobre filtro passa-baixa, é fundamental entender os elementos utilizados nele. Para isso, é necessário ter um entendimento sucinto sobre o método Sallen-Key, espaço de estados, amplificadores operacionais, fonte de alimentação simétrica, modelos de primeira ordem, modelos de segunda ordem e outros conceitos teóricos importantes que são abordados ao longo dessa seção.

2.1 Filtro Passa-Baixa

Um filtro passa-baixa é um tipo de circuito utilizado para permitir a passagem de sinais de baixa frequência e atenuar sinais de alta frequência. A característica de resposta de frequência desse filtro é determinada pelos componentes passivos, como resistores (R) e capacitores (C), ou indutores (L) e capacitores, que formam a base para a implementação desses sistemas.

Existem diversos tipos de filtros passa-baixa, mas o mais comum é o filtro RC de 1º ordem, no qual a frequência de corte é definida pela relação entre a resistência e capacitância. O comportamento do filtro é caracterizado pela seguinte fórmula de frequência de corte:

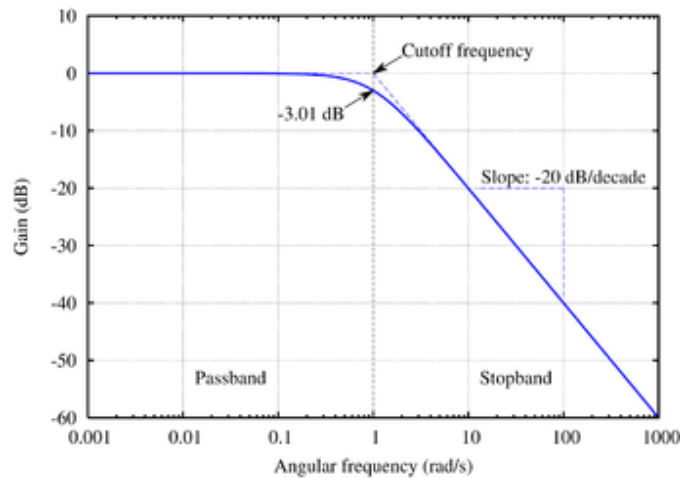
$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

Onde:

- F_c é a frequência de corte, que define a fronteira entre as frequências que passam e as que são atenuadas.
- R é o valor da resistência.
- C é o valor da capacitância.

Um gráfico que expressa o comportamento desse tipo de filtro passa-baixa de 1º ordem, mostrando sua resposta em frequência, é ilustrado abaixo:

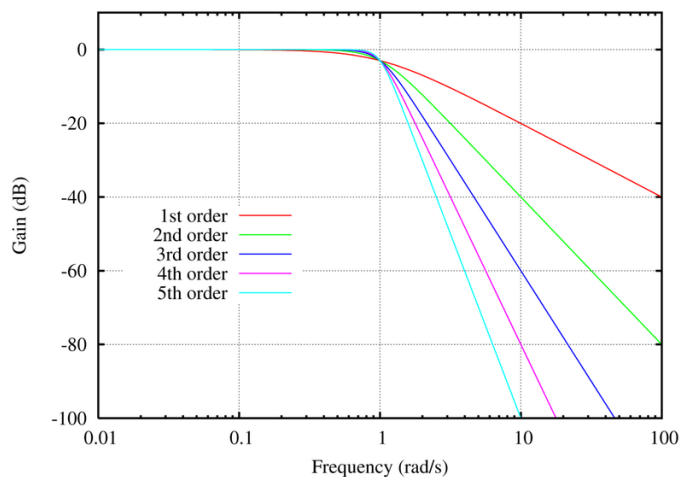
Figura 1: Resposta em frequência de um filtro de 1º ordem



Fonte: Wikipédia

Outro tipo de filtro passa-baixa são os filtros de 2º ordem, como o circuito RLC, que possuem maior atenuação às frequências mais altas. O gráfico deste tipo de filtro é semelhante ao gráfico do filtro de 1º ordem, com a diferença de que a variação na queda da amplitude com o aumento da frequência é mais acentuada.

Figura 2: Resposta em frequência de filtros Butterworth de diversas ordens



Fonte: Wikipédia

Apesar da implementação desse tipo de filtro ser feita geralmente em cima de componentes passivos, também é possível implementá-la através de componentes "ativos" de 1º ordem. Basicamente, componentes ativos, como amplificadores operacionais (amp-ops), são usados para melhorar as características do filtro em comparação com os filtros passi-

vos, que utilizam apenas resistores e capacitores. Por exemplo, um amplificador de áudio pode ser montado como um filtro passa-baixa com frequência de corte igual a 100kHz para reduzir o ganho nas frequências que o fariam oscilar. Como a banda audível vai até cerca de 20kHz, todas as frequências de interesse estão inclusas na banda passante, e o amplificador atua da mesma forma para os sinais de áudio.

2.2 Método Sallen-Key

O filtro passa-baixa em topologia Sallen-Key é uma configuração muito popular em circuitos eletrônicos devido à sua simplicidade, estabilidade e desempenho. Esse tipo de filtro utiliza amplificadores operacionais (amp-ops) em conjunto com componentes passivos, como resistores e capacitores, para filtrar sinais de alta frequência, permitindo a passagem de frequências mais baixas.

O filtro Sallen-Key é um filtro ativo, o que significa que ele utiliza um amplificador operacional para aumentar o desempenho do circuito. Ele é normalmente projetado em versões de segunda ordem, oferecendo uma atenuação de 40dB por década (duas vezes mais do que um filtro de primeira ordem) acima da frequência de corte.

Daí, temos que a frequência de corte do filtro passa-baixa em topologia Sallen-Key é determinada pela combinação dos resistores R_1 e R_2 , e dos capacitores C_1 e C_2 , conforme a equação:

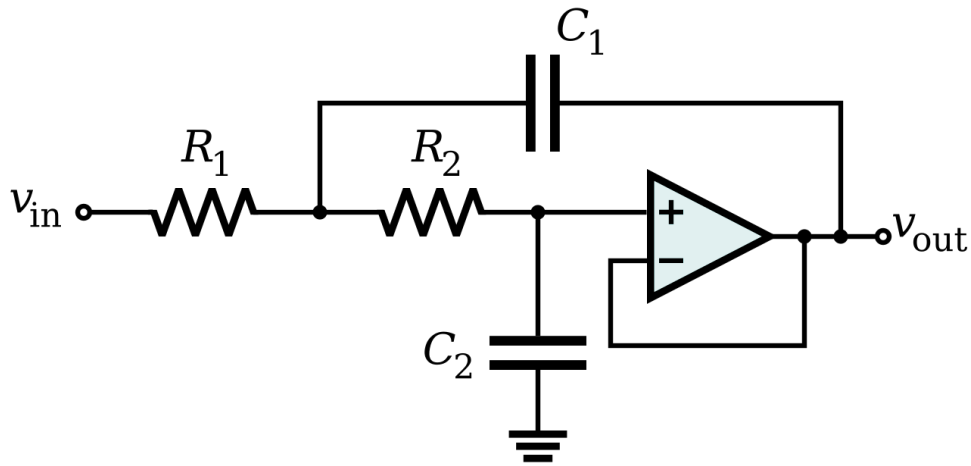
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2)$$

Esse método para circuitos, em tese, usa um amplificador de tensão com impedância de entrada praticamente infinita e impedância de saída zero para implementar uma resposta passa-baixa, passa-alta, passa-faixa, etc. Esse filtro permite alto fator Q e ganho de banda passante sem o uso de indutores, além de ter a vantagem da independência, em que os filtros podem ser colocados em cascata sem que os estágios afetem a sintonia uns dos outros. Basicamente, um filtro Sallen-Key é uma variação de um filtro VCVS (Topologia de filtro de fonte de tensão controlada por tensão) que usa um amplificador de ganho

unitário (ou seja, um amplificador de buffer).

A aplicação dessa topologia em filtro passa-baixa pode ser demonstrada a partir da configuração apresentada na figura 3, donde há um amplificador operacional usado como buffer, embora um seguidor de emissor também seja eficaz.

Figura 3: Um filtro passa-baixa de ganho unitário implementado com uma topologia Sallen-Key



Fonte: Wikipédia

Este circuito é equivalente ao caso genérico de ganho unitário, com:

$$Z1 = R1, Z2 = R2, Z3 = \frac{1}{sC1}, Z4 = \frac{1}{sC2} \quad (3)$$

A função de transferência para este filtro passa-baixa de ganho unitário de segunda ordem é:

$$H(s) = \frac{W0^2}{s^2 + 2\alpha s + W0^2} \quad (4)$$

Onde a frequência natural não amortecida $f0$, atenuação α , fator Q e taxa de amorte-

cimento ζ , são dadas por:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5)$$

$$2\alpha = 2\zeta\omega_0 = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right). \quad (6)$$

Que nos permitem concluir a seguinte equação:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\alpha} = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2)}. \quad (7)$$

O Q é o fator que determina a altura e a largura do pico da resposta de frequência do filtro. À medida que esse parâmetro aumenta, o filtro tenderá a "tocar" em uma única frequência ressonante próxima a f_0 .

2.3 Espaço de Estados

A noção de espaço de estado vem do método de variáveis de estado para descrever equações diferenciais. Nesse método, as equações diferenciais que descrevem um sistema dinâmico são organizadas como um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem no vetor de estados do sistema, e a solução é visualizada como uma trajetória desse vetor de estados no espaço. O projeto de controle no espaço de estados é a técnica em que o engenheiro de controle projeta uma compensação dinâmica, trabalhando diretamente com a descrição do sistema em variáveis de estado. Essa abordagem tem sido muitas vezes referida como projeto de controle moderno, sendo que além de permitir a análise de sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) com mais facilidade, pode ser utilizada para modelar também as relações entre as variáveis internas ao sistema, sendo estas duas características limitações na representação por Funções de Transferência (AGUIRRE, 2007) (OGATA, 2010). Um modelo linear típico representado em forma de Espaço de Estados

apresenta as equações a seguir:

$$\{\dot{x}(t)\} = \{A\}\{x(t)\} + \{B\}\{u(t)\} \quad (8)$$

$$\{y(t)\} = \{C\}\{x(t)\} + \{D\}\{u(t)\} \quad (9)$$

Onde:

- $\{x\}$ é o vetor de estado;
- $\{u\}$ é o vetor de entrada;
- $\{y\}$ é o vetor de saída;
- $[A]$ é a matriz da dinâmica do sistema;
- $[B]$ é a matriz dos atuadores no sistema;
- $[C]$ e $[D]$ são as matrizes dos sensores e da perturbação dos sensores devido aos atuadores.

Duas observações importantes sobre a representação em forma de espaço de estados são apresentadas neste momento (AGUIRRE, 2007):

- O conhecimento dos vetores de estado em qualquer instante t_0 especifica o estado ou condição do sistema neste instante;
- A representação em espaço de estados não é única, ou seja, um sistema pode ser representado por mais de um modelo no espaço de estados

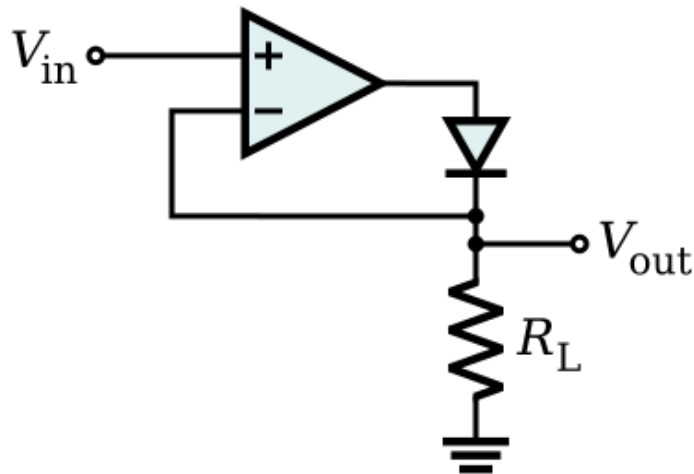
2.4 Super Diodo

O superdiodo, também conhecido como retificador de precisão, é um circuito que combina um amplificador operacional com um diodo convencional para simular o comportamento de um diodo ideal. Em um diodo comum, há uma queda de tensão significativa durante a condução direta (0,7 V para diodos de silício), o que pode ser problemático em aplicações que exigem alta precisão. O superdiodo elimina essa queda de tensão, permitindo uma condução mais precisa e eficiente.

O funcionamento do superdiodo é baseado na realimentação negativa do amplificador operacional, que ajusta sua saída para compensar as perdas de tensão do diodo. Isso

faz com que a tensão de saída do circuito seja praticamente igual à tensão de entrada, mesmo para sinais de baixa amplitude. Essa característica torna o superdiodo essencial em aplicações como retificação de precisão, onde é necessário converter sinais de corrente alternada em corrente contínua sem distorção.

Figura 4: Exemplo de Super diodo



Fonte: Wikipédia

Em termos de aplicações, o superdiodo é amplamente utilizado em circuitos de instrumentação, medição de sinais de baixa amplitude e em sistemas de proteção de circuitos. Ele oferece uma solução eficiente para manter a precisão em condições onde diodos convencionais falhariam devido à queda de tensão direta, garantindo maior exatidão em ambientes eletrônicos sensíveis.

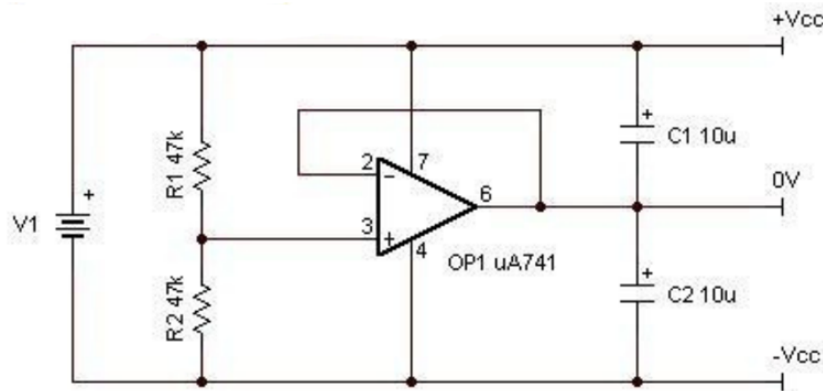
2.5 Fonte de Alimentação Simétrica

Uma fonte de alimentação simétrica fornece tensões contínuas de polaridades opostas em relação a um ponto de referência, geralmente o terra. Ela é amplamente utilizada em circuitos eletrônicos que requerem tensões positivas e negativas para operar corretamente, como amplificadores operacionais e circuitos de áudio. A principal função é oferecer duas tensões, uma positiva (+V) e outra negativa (-V), ambas em relação ao terra.

O funcionamento da fonte simétrica envolve a conversão de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) por meio de transformadores, retificadores e reguladores. Primeiramente, um transformador ajusta a tensão CA, que é retificada para converter em

CC. Em seguida, o sinal é filtrado e regulado, garantindo uma saída estável e simétrica.

Figura 5: Fonte de alimentação simétrica



Fonte: bratfich

Fontes de alimentação simétricas são essenciais para circuitos que exigem alta precisão e estabilidade. A simetria das tensões reduz distorções e interferências, além de melhorar o desempenho do sistema ao fornecer uma tensão de referência central. Por isso, são comumente usadas em sistemas de áudio, instrumentação e sistemas de controle.

2.6 Equações de Diferenças

Em circuitos contendo capacitores e indutores, as variáveis de tensão e corrente são frequentemente relacionadas por equações diferenciais, pois a resposta desses componentes depende da taxa de variação (derivada) da tensão ou da corrente ao longo do tempo.

No caso de circuitos RC (resistor-capacitor) e amplificadores operacionais, o comportamento de um filtro passa-baixa é descrito por uma equação diferencial de segunda ordem, que relaciona a tensão de saída $V_{out}(t)$ com a tensão de entrada $V_{in}(t)$. Em um circuito RC básico, a relação entre tensão e corrente no capacitor é dada por:

$$i_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (10)$$

Essa equação descreve que a corrente no capacitor C é proporcional à taxa de variação da tensão $V_C(t)$ ao longo do tempo. Combinando isso com a Lei de Ohm para o resistor R , a equação diferencial completa para um filtro passa-baixa pode ser derivada.

No circuito Sallen-Key, o comportamento da saída em função da entrada envolve o uso de amplificadores operacionais e componentes RC, então a equação diferencial que descreve o comportamento desse tipo de filtro é dada por:

$$\frac{d^2V_{\text{out}}(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dV_{\text{out}}(t)}{dt} + \omega_n^2 V_{\text{out}}(t) = \omega_n^2 V_{\text{in}}(t) \quad (11)$$

Onde:

- ω_n é a frequência natural do sistema, que depende dos valores de R e C .
- ζ é o fator de amortecimento, que pode ser ajustado pelo ganho do amplificador operacional.
- $V_{\text{in}}(t)$ é a tensão de entrada aplicada ao filtro.
- $V_{\text{out}}(t)$ é a tensão de saída.

Essa equação diferencial de segunda ordem governa o comportamento dinâmico do filtro, ou seja, como o filtro responde a uma variação de entrada ao longo do tempo. Em geral, o uso dessas equações diferenciais em circuito de filtro passa-baixa em topologia Sallen-Key é fundamental para modelar e prever o comportamento dinâmico do filtro, já que permitem determinar a resposta temporal e de frequência do sistema, ajudando no projeto e otimização de filtros para aplicações em sistemas de controle, processamento de sinais, e eletrônica de potência.

2.7 LQR (Linear Quadratic Regulator)

O controle LQR é um método amplamente utilizado em sistemas de controle automático, especialmente quando o sistema é linear e o objetivo é otimizar uma função de custo quadrática. Ao invés de utilizar a localização dos pólos como critério de projeto, o LQR está baseado na minimização de um critério quadrático que está associado à energia das variáveis de estado e dos sinais de controle a serem projetados.

Para que um sistema seja controlado de forma eficiente, atingindo seus objetivos de maneira otimizada, o LQR considera um modelo matemático do sistema, que descreve como ele se comporta ao longo do tempo. Em seguida, define-se uma função de custo que representa o quanto o sistema se afasta do seu estado desejado e o esforço necessário para realizar as correções. Essa função de custo é quadrática, ou seja, envolve o quadrado das variáveis de estado e de controle:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (12)$$

No caso do LQR, a matriz de ganhos K será obtida a partir da minimização de um funcional de custo quadrático. Portanto, o projeto de reguladores ótimos baseados em índices de desempenho (funcional de custo) quadráticos consiste, simplesmente, na determinação dos elementos da matriz K .

Existem várias maneiras de resolver o problema do LQR, a mais comumente usada é aquela que se baseia no segundo método de Lyapunov. A maior vantagem da aplicação do método de Lyapunov é que, exceto em casos muito especiais, a estabilidade fica garantida a priori, ou seja, garante-se encontrar uma matriz de ganhos K que resulte em autovalores estáveis de $(A + BK)$.

2.8 Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo)

O controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) é amplamente utilizado em sistemas de controle para ajustar automaticamente uma variável de processo, como a tensão de saída, em resposta a uma entrada de referência ou comando. No caso do circuito de filtro passa-baixa com topologia Sallen-Key, o controlador PID é aplicado para ajustar e estabilizar a resposta do mesmo, garantindo que o sistema opere de maneira eficiente e estável em diferentes condições de operação. O controlador PID ajusta a saída com base em três ações:

1. Ação Proporcional (P): A ação proporcional é responsável por gerar uma correção proporcional ao erro atual, que é a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o

valor medido da saída do sistema. No caso de um circuito de filtro passa-baixa, a ação proporcional seria responsável por corrigir imediatamente qualquer diferença entre a tensão de saída e a tensão de referência. Um ganho proporcional alto pode resultar em uma resposta rápida, mas também pode causar oscilações e instabilidade. Sua fórmula é dada por:

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (13)$$

2. Ação Integral (I): A ação integral tem como objetivo eliminar o erro acumulado ao longo do tempo. Se a saída do filtro apresenta um erro persistente, a ação integral vai somar pequenas correções até que o erro seja completamente eliminado. Em circuitos de controle, essa ação garante que o sistema atinja precisamente o valor de referência e não apenas se aproxime dele. No entanto, um ganho integral muito alto pode introduzir oscilações. Sua fórmula é dada por:

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (14)$$

3. Ação Derivativa (D): A ação derivativa responde à taxa de variação do erro, ou seja, ela "prevê" o comportamento futuro do erro com base na sua taxa de mudança. Isso ajuda a reduzir oscilações e estabilizar a resposta do sistema, especialmente quando o ganho proporcional é alto. No circuito, a ação derivativa suaviza a resposta do sistema em altas frequências, reduzindo os picos de erro. Sua fórmula é dada por:

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

Basicamente, a ação proporcional (P) corrige o erro imediato entre o valor de referência e a saída do filtro, garantindo uma resposta rápida. A ação integral (I) elimina erros acumulados ao longo do tempo, assegurando que o filtro atinja exatamente o valor desejado sem desvios permanentes. Já a ação derivativa (D) suaviza a resposta, antecipando mudanças no erro e prevenindo oscilações e picos de saída indesejados.

Nesse circuito Sallen-Key então, o controlador PID otimiza a resposta em frequência, ajustando a saída de forma a atenuar frequências mais altas e transmitir com precisão as frequências abaixo do ponto de corte. A combinação das três ações (P, I e D) melhora a estabilidade e a eficiência do filtro, evitando tanto instabilidade quanto erros persistentes, além de suavizar transientes rápidos, resultando em um desempenho robusto e controlado.

2.9 Controle Adaptativo

Um controle adaptativo é uma abordagem para sistemas de controle que são capazes de se ajustar ao longo do tempo em resposta a mudanças nas condições e conhecimentos adquiridos pelo controlador. Em vez de permanecer estático ou na tentativa de lidar com menores desvios, o controle adaptativo ativamente responde a alterações do sistema para melhorar um determinado controle. Esta abordagem é necessária com os sistemas dinâmicos em ambientes instáveis, como por exemplo, em aeronaves, navios e ambientes hospitalares como robôs médicos.

Com o controle adaptativo, um determinado controlador coleta dados sobre o meio ambiente, operando um sistema com a utilização destas informações para fazer ajustes quando necessário, ou quando houver a mínima alteração de condição, se assim for ajustado. Exemplos de controles adaptativos podem ser vistos em alguns veículos com a capacidade de ajustar sistemas automáticos de frenagem para piso molhado ou com neve. Nestes casos, o sistema responde às condições para melhorar a precisão, eficácia e eficiência, tornando a condução mais segura e fácil em uma grande variedade de configurações.

O objetivo primordial do controle adaptativo é calcular uma lei de adaptação, conjuntamente com a lei de controle, para que o sinal de erro do sistema seja zero, isto é, a saída do sistema seja igual ao modelo de entrada. Existem vários esquemas de controle adaptativo, dentre os quais destacam-se: escalonamento de ganhos, sistemas adaptativos por modelo de referência e reguladores auto-ajustáveis. O controle adaptativo é um

tipo especial de controle realimentado não-linear em que os estados do processo podem ser separados em duas categorias, que mudam em diferentes velocidades: *estados lentos*: parâmetros do regulador; *estados rápidos*: realimentação convencional.

3 Metodologia

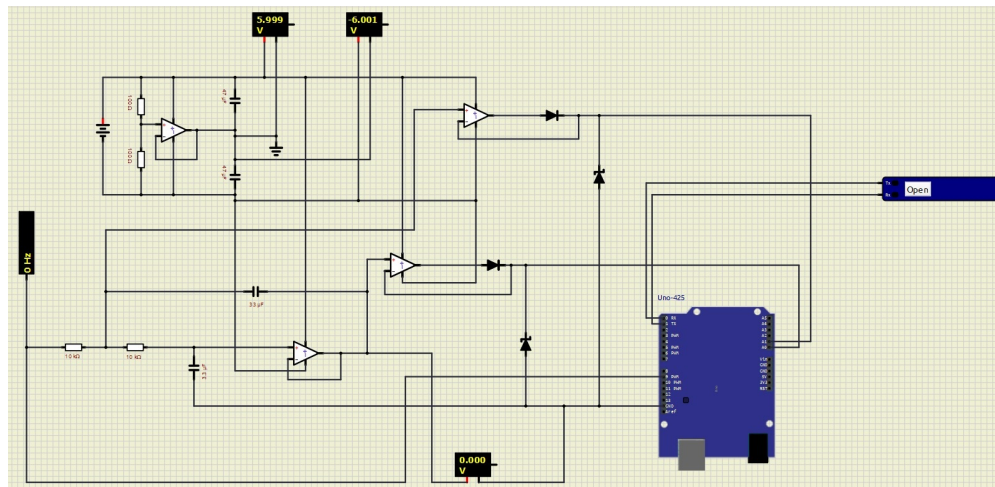
Nesta seção, são apresentados os procedimentos e materiais utilizados para a realização do experimento prático sobre filtro passa-baixa com arduíno e fonte de alimentação simétrica para aquisição de dados e utilização de técnicas de controle em sistemas.

3.1 Descrição da Prática

3.1.1 Materiais

- 4 Amplificadores, LM 741CN
- 2 de $10k\Omega$
- 2 de $180k\Omega$
- 2 de $1k\Omega$
- 1 Capacitor de $3.3\mu F$
- 1 Capacitor de $33\mu F$
- 2 Diodos 0.7V
- 2 Diodos Zenner 5.1V
- 1 Fonte de Alimentação de 18V
- 1 Arduíno UNO
- 1 Cabo de Arduíno
- Fios condutores
- Protoboard

Figura 6: Circuito da prática de controle



Fonte: Autoria própria

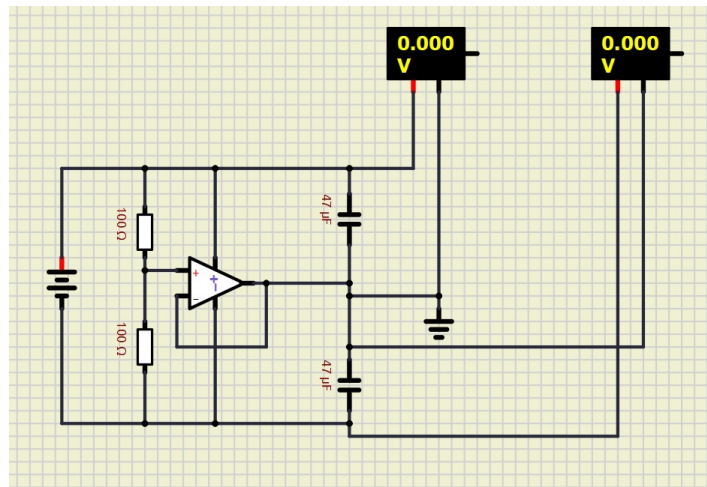
3.1.2 Montagem

Na prática do experimento sobre filtro Sallen-Key, que tem como objetivo montar um modelo de circuito com arduino e fonte de alimentação simétrica, foram seguidos os seguintes passos para montagem:

1. Utilizar o código do MATLAB para estipular os materiais utilizados durante o experimento, ou seja, as especificações;
2. Utilizar o código disponibilizado para o arduino;
3. Montar o circuito com base na figura 6;
4. Alimentar o circuito com 18V

Em mais detalhes e explicando também o que cada parte em específico faz na figura 6, abaixo foi quebrado em partes o circuito para análise da ponte simétrica, captação do sinal de VI e VCI e circuito Sallen-Key.

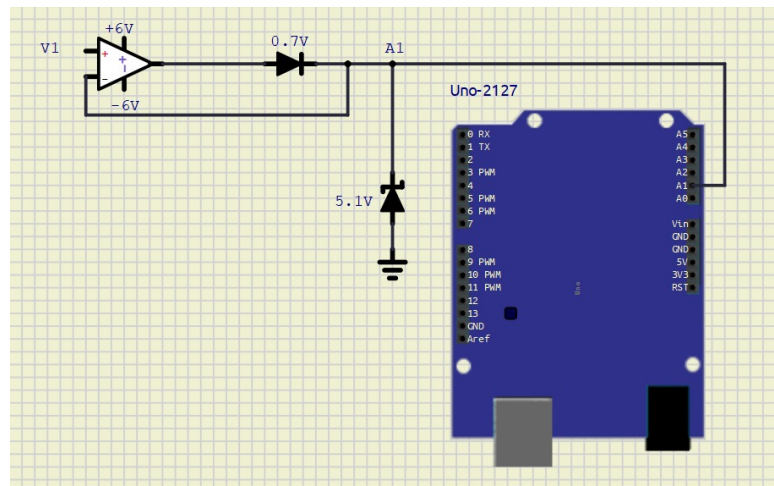
Figura 7: Circuito Separado da Alimentação Simétrica



Fonte: Autoria própria

No circuito da figura 8, apresenta-se o circuito de Alimentação Simétrica onde será dado como alimentação positiva $V_{cc+} = +6V$ e negativa $V_{cc-} = -6V$ nos amplificadores presentes do sistema.

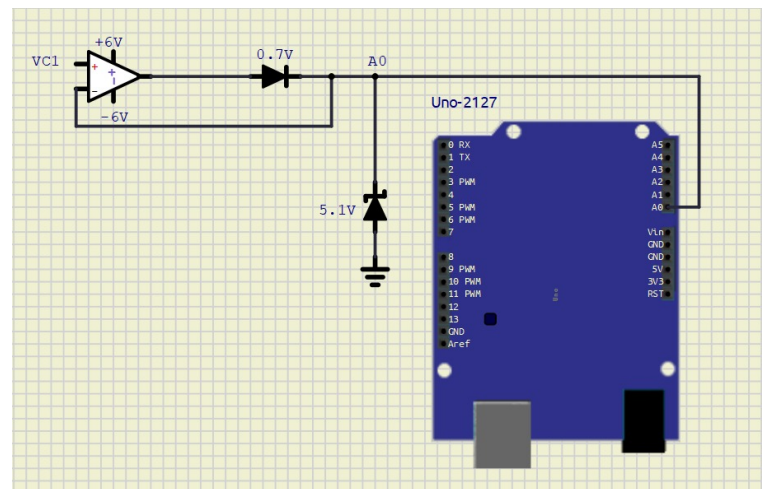
Figura 8: Circuito Separado da captação do sinal de V1



Fonte: Autoria própria

No circuito da figura 9, apresenta-se o circuito de Super Diodo que capta o sinal de tensão V1 no circuito para ser utilizado no código e lido na entrada analógica A1.

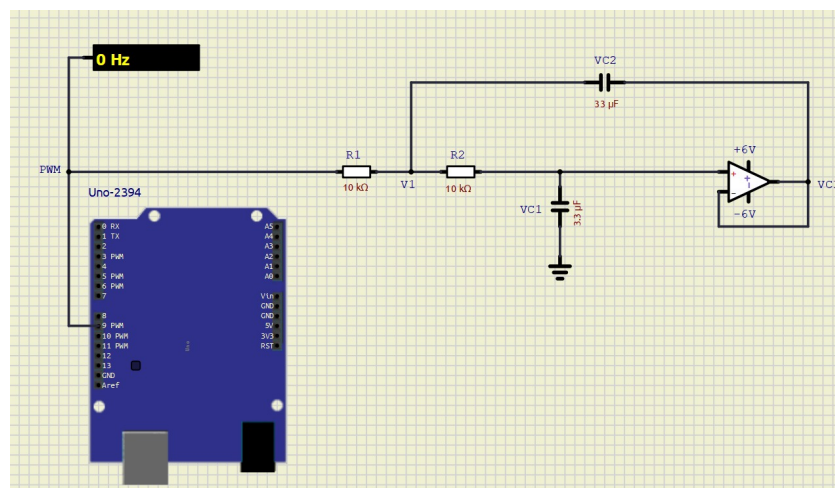
Figura 9: Circuito Separado da captação do sinal de VC1



Fonte: Autoria própria

No circuito da figura 10, apresenta-se o circuito de Super Diodo que capta o sinal de tensão do capacitor $VC1$ no circuito para ser utilizado no código e lido na entrada analógica $A0$.

Figura 10: Circuito Separado do Sallen Key



Fonte: Autoria própria

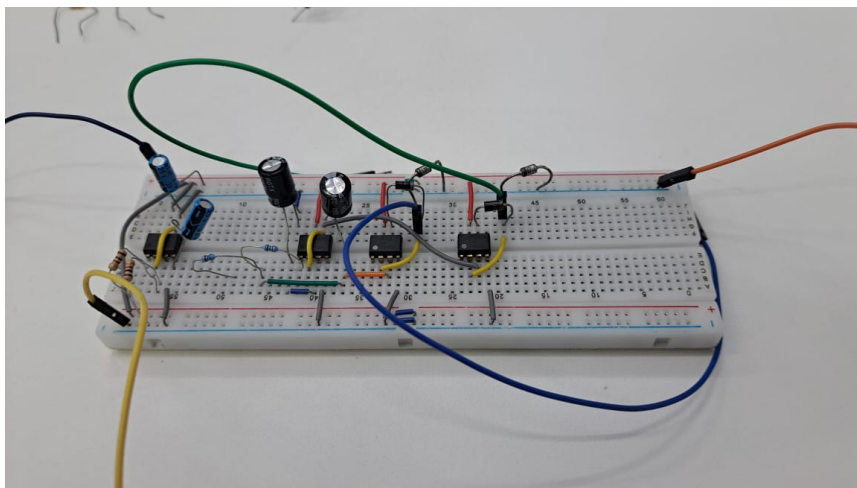
No circuito da figura 11, apresenta-se o circuito do método Sallen-Key que capta o sinal PWM do arduino que é utilizado como entrada para as tensões dos componentes passivos e ativos do circuito, tendo como saída do amplificador a tensão do capacitor $VC1$ no circuito.

3.1.3 Experimento

Na execução prática do experimento, após a montagem do circuito, foram seguidos os passos abaixo:

1. Conectar as portas do arduíno com o circuito;
2. Ligar a fonte de tensão;
3. Utilizar o plotter serial e plotter monitor para analisar o comportamento dos sinais;
4. Registrar o comportamento dos sinais;
5. Fazer a aquisição de dados obtidos;
6. Aplicar técnicas de controle com os valores captados por aquisição de dados;
7. Desligar a fonte de alimentação.

Figura 11: Montagem do Experimento

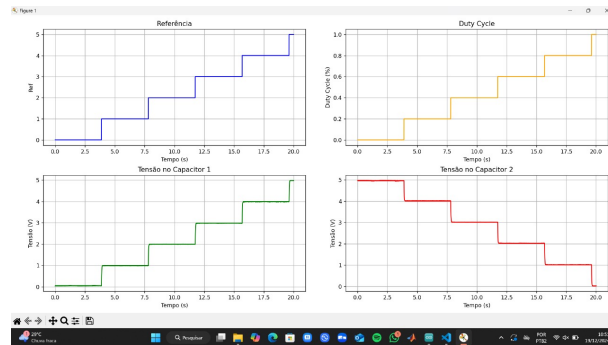


Fonte: Autoria própria

4 Resultados

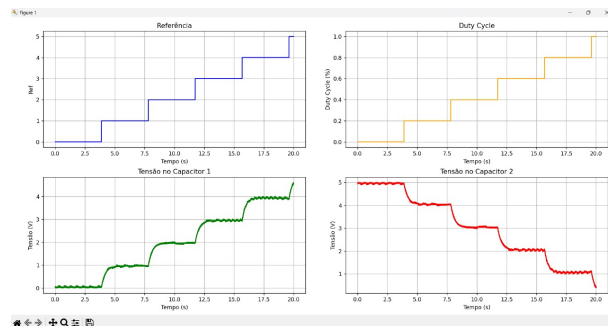
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos durante as simulações e experimentos prático, além de uma breve discussão sobre os resultados obtidos.

Figura 12: Resposta da Simulação via arduino IDE sem controladores para 10K



Fonte: Autoria própria

Figura 13: Resposta da Simulação via arduino IDE sem controladores para 180K



Fonte: Autoria própria

Para resistores de $10k\Omega$ e $180k\Omega$, os gráficos de resposta indicam diferenças significativas no comportamento dinâmico. Respostas sem controladores apresentam maior suscetibilidade a ruídos e tempos de estabilização mais altos, conforme mostrado nas 12 e 13.

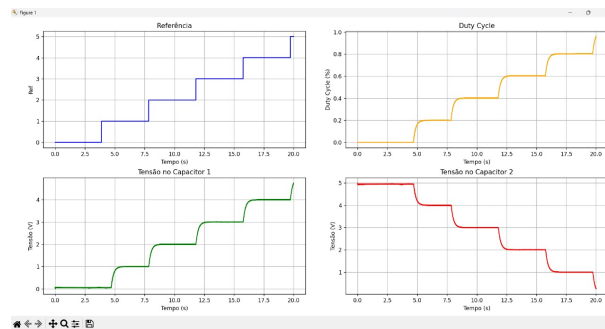
Com o resistor de $10k\Omega$, por exemplo, o sistema tem uma resposta mais rápida, porém mais suscetível a oscilações e ruídos devido ao menor amortecimento. Já com o resistor de $180k\Omega$, o sistema apresenta uma resposta mais lenta, mas com maior estabilidade e suavidade, graças ao aumento no amortecimento e à melhor atenuação de ruídos. Essas

diferenças refletem como a escolha dos valores de resistência influencia o equilíbrio entre rapidez e robustez na resposta do sistema.

4.1 LQR (Linear Quadratic Regulator)

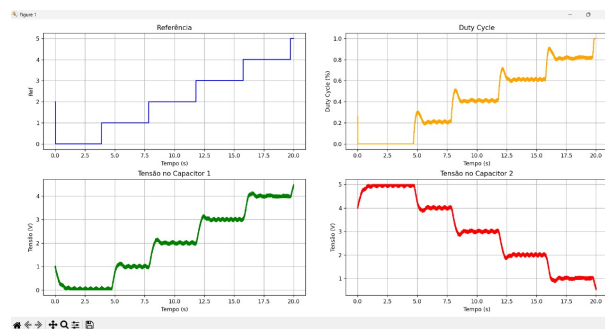
4.1.1 Prática

Figura 14: Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador LQR com resistor de 10k



Fonte: Autoria própria

Figura 15: Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador LQR com resistor de 180k



Fonte: Autoria própria

O controlador LQR, aplicado com resistores de $10k\Omega$ e $180k\Omega$, melhorou significativamente a estabilidade do sistema. A minimização da função custo garantiu uma resposta mais eficiente, com menor tempo de estabilização e redução de oscilação.

Com o resistor de $10k\Omega$, o sistema demonstra uma resposta mais rápida, alcançando o estado desejado em menor tempo. Contudo, a menor resistência pode resultar em oscilações mais acentuadas ou maior sensibilidade a distúrbios, mesmo sob a ação do LQR.

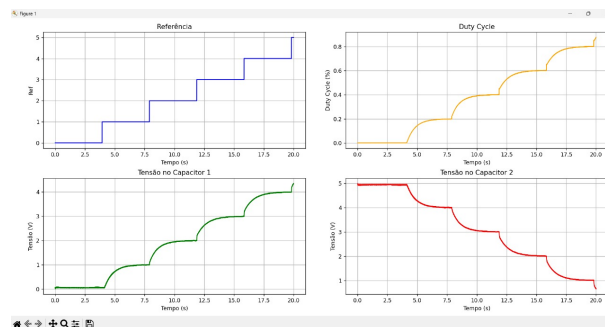
Já no caso do resistor de $180k\Omega$, o sistema apresenta uma resposta mais estável e amortecida, com transições mais suaves e menor suscetibilidade a oscilações, embora o tempo para atingir o estado desejado seja maior. Isso se deve ao maior efeito de amortecimento proporcionado pela resistência mais alta.

4.2 Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e Controle Adaptativo

4.2.1 Prática

4.2.1.1 Para resistores de 10K

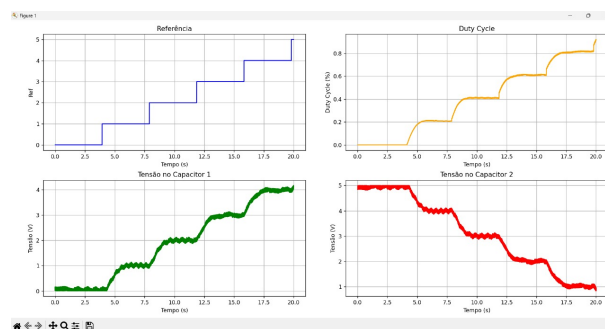
Figura 16: Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador PID + adaptativo com resistor de 10k



Fonte: Autoria própria

4.2.1.2 Para resistores de 180K

Figura 17: Resposta da Simulação via arduino IDE com controlador PID + adaptativo com resistor de 180k



Fonte: Autoria própria

Para resistores de $10\text{k}\Omega$ e $180\text{k}\Omega$, a combinação PID + Controle Adaptativo permitiu ajustes dinâmicos que compensam variações no sistema, oferecendo uma resposta robusta, especialmente em situações de maior incerteza nos parâmetros do sistema.

Nos gráficos do controle PID + Adaptativo com resistores de $10\text{k}\Omega$ e $180\text{k}\Omega$, observa-se que o resistor de $10\text{k}\Omega$ proporciona uma resposta mais rápida, mas com maior propensão a oscilações devido ao menor amortecimento. Já o resistor de $180\text{k}\Omega$ apresenta uma resposta mais lenta, porém mais estável e suave, devido ao maior amortecimento e melhor atenuação de ruídos. Em ambos os casos, o Controle Adaptativo, combinado ao PID, ajusta os ganhos dinamicamente, reduzindo os erros e melhorando o desempenho do sistema.

5 Conclusão

Neste relatório, foram exploradas diferentes técnicas de controle aplicadas a um sistema de filtro passa-baixa com topologia Sallen-Key, incluindo os métodos LQR, PID e Controle Adaptativo. A análise comparativa desses métodos permitiu compreender suas vantagens, desafios e adequação a diferentes cenários e requisitos de projeto, destacando a versatilidade do sistema testado.

Em tese, os gráficos obtidos ao decorrer deste trabalho ilustraram com clareza as diferenças no comportamento dinâmico do sistema para os diferentes controladores e valores de resistência testados. Para o resistor de $10\text{k}\Omega$, os resultados destacaram uma resposta mais rápida, porém com maior suscetibilidade a oscilações e ruídos, enquanto o resistor de $180\text{k}\Omega$ apresentou uma resposta mais lenta, mas com maior estabilidade e suavidade, devido ao aumento no amortecimento e melhor atenuação de ruídos. A combinação do controlador PID com o Controle Adaptativo, por exemplo, demonstrou a eficácia em ajustar ganhos dinamicamente, reduzindo os erros e compensando variações nos parâmetros do sistema, enquanto o LQR destacou-se por otimizar a resposta com estabilidade e menor tempo de estabilização.

O controlador LQR, no caso deste sistema, demonstrou-se mais eficiente e matematicamente sólido, já que garantiu estabilidade e uma resposta otimizada. Sua abordagem baseada na minimização de uma função custo quadrática é ideal para sistemas bem modelados, mas sua dependência de parâmetros precisos limita sua aplicação em cenários com alta variabilidade.

O controlador PID, conhecido por sua simplicidade e robustez, apresentou-se como uma solução prática e amplamente aplicável. Apesar de ser eficiente em condições estáveis, sua performance pode ser afetada em sistemas com parâmetros variáveis, demandando ajustes frequentes ou combinação com outras técnicas, como o Controle Adaptativo, para melhorar sua adaptabilidade.

O Controle Adaptativo, por sua vez, destacou-se em situações com alta incerteza ou variação, ajustando automaticamente os ganhos do sistema em tempo real para manter um desempenho constante. Contudo, sua implementação exige maior capacidade de processamento, o que pode limitar seu uso em sistemas mais simples.

De forma geral, a escolha da técnica de controle depende do contexto do sistema e

dos requisitos específicos do projeto. A integração dessas abordagens mostrou-se essencial para potencializar os benefícios de cada método, proporcionando sistemas mais estáveis, resilientes e adaptáveis. O filtro passa-baixa com topologia Sallen-Key revelou-se uma plataforma eficaz para demonstrar as diferenças e complementaridades entre métodos clássicos e modernos, reforçando a importância de combinar essas abordagens no design de sistemas de controle eficientes e versáteis.

6 Referências

1. CAMINO, J. F. Controle Avançado de Sistemas: Regulador Linear Quadrático Ótimo. FEM, UNICAMP. Disponível em: https://www.fem.unicamp.br/~camino/CourseNotes/Aulas_ES728_Proj_Ctrl_Otimo_Camino.pdf. Acesso em: 20 nov 2024.
2. Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
3. MECÂNICA INDUSTRIAL. O que é controle adaptativo? Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/217-o-que-e-controle-adaptativo/>. Acesso em: 20 nov 2024.
4. OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.
5. GOMES, Pablo José T. **Identificação de Estruturas em espaço de estados utilizando o algoritmo ERA/OKID**. 2019. 209 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2019.
6. Wikipédia. **Filtro passa-baixo**. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_passa-baixo. Acessado em: 28 setembro de 2024.
7. Wikipédia. **Sistemas de primeira ordem**. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistemas_de_primeira_ordem. Acessado em: 10 de Dezembro de 2024.
8. Wikipédia. **Sistemas de segunda ordem**. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistemas_de_segunda_ordem. Acessado em: 10 de Dezembro de 2024.