

# ESTUDO DE CASO: SUPRESSÃO DE RUÍDO E CONTROLE DE NÍVEL

FELIPE FERRER SORRILHA,\*JOSÉ FELIPE DUARTE ANTUNES COLMAN,†MARIA EDUARDA SILVA  
MAFRA,‡MILLENA SARTORI DE OLIVEIRA§

Emails: felipesorrilha@alunos.utfpr.edu.br, jcolman@alunos.utfpr.edu.br,  
mariamafra.2005@alunos.utfpr.edu.br, millenasartori@alunos.utfpr.edu.br

**Abstract**— In this case study, Fourier and Laplace transforms were used to develop two tools with distinct purposes: a noise suppressor and a water level control system, respectively. The main objective was to model these two systems in the mathematical software MATLAB/Simulink, analyzing the system responses to identify and highlight the key differences and advantages of using the Laplace transform compared to the Fourier transform. The analysis provided a deeper understanding of the specific applications of each transform, as well as their effectiveness in solving practical engineering problems.

**Keywords**— Fourier, Laplace, PID

**Resumo**— Neste estudo de caso, as transformadas de Fourier e Laplace foram empregadas para desenvolver duas ferramentas com finalidades distintas: um supressor de ruído e um sistema de controle de nível de água, respectivamente. O principal objetivo consistiu em modelar esses dois sistemas na plataforma matemática MATLAB/Simulink, analisando as respostas de cada sistema para identificar e destacar as principais diferenças e vantagens da utilização da transformada de Laplace em comparação com a transformada de Fourier. A análise permitiu compreender melhor as aplicações específicas de cada transformada, bem como sua eficácia na resolução de problemas práticos de engenharia.

**Palavras-chave**— Fourier, Laplace, PID

## 1 Introdução

Com o avanço das tecnologias digitais, o desenvolvimento de ferramentas de manipulação de sinais tem se tornado cada vez mais sofisticado. Em aplicações como sistemas de áudio, sua manipulação se tornou crucial para alcançar um desempenho otimizado e garantir estabilidade em um sistema. Dessa forma, é possível que os conhecimentos a respeito de sistemas lineares sejam utilizados de forma que aplicações possam ser desenvolvidas de maneira a auxiliar aqueles que manipulam sinais, visando ter resultados mais proveitosos.

Aqui, o objetivo principal deste trabalho é abordar de maneira prática a análise de um sinal de som - proveniente de dados coletados - a partir do método de Transformada Rápida de Fourier (FFT) e da utilização de filtros que suprimem ruídos. Ademais, o projeto estuda o comportamento de um sistema de controle de nível de líquido dentro de um tanque, no qual foram utilizadas malhas abertas e fechadas. É evidenciado o uso de um controlador PID - Controlador Proporcional Integral Derivativo, além da Transformada de Laplace.

Atualmente, existem inúmeras ferramentas que podem ser utilizadas para a manipulação de sinais. Linguagens de programação como Python e C++ possuem bibliotecas com funções voltadas para a análise de sistemas. Neste projeto, foi empregada a ferramenta matemática MATLAB, muito utilizada em análise de sinais no âmbito da engenharia.

O método escolhido para que seja feita a análise em supressão de ruído é capaz de identificar a frequência do áudio e filtrar as maiores frequên-

cias. Feito isso, o programa utilizará um filtro passa-baixa, passa-alta e passa-faixa para comparar e exibir ao usuário o áudio final após cada etapa.

Quanto ao estudo relacionado ao controle de nível, é aplicado o método de Transformada de Laplace: por meio dela, é calculada a função de transferência de maneira que o controlador PID possa tomar as ações necessárias, sendo a principal delas verificar se o nível de líquido presente no recipiente está de acordo e, caso contrário, proporcionar um ajuste justo.

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Supressão de ruído

Para que o programa possa ser devidamente utilizado, é necessário, como entrada de dados, um áudio contendo uma voz humana em um ambiente ruidoso. Com a finalidade de deixar o áudio apropriado para o programa, foi empregado um filtro para altas frequências, seguido de filtros passa-baixa, passa-alta e passa-faixa, os quais são responsáveis por filtrar ruídos. O emprego dos três evidencia suas principais diferenças quanto ao tratamento do áudio, levando em conta que cada um filtra frequências diferentes do som (GUOTAO, 2024).

Com o auxílio da ferramenta matemática MATLAB, é possível utilizar o método FFT (Fast Fourier Transform) no áudio gravado, de forma que os ruídos acima da frequência máxima pré-definida sejam eliminados e o sinal que está no domínio do tempo seja alterado para o domínio da frequência.

A Transformada de Fourier decompõe um sinal contínuo no tempo em suas componentes de frequência. Para um sinal contínuo  $x(t)$ , a FT é definida como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Onde  $X(f)$  representa o sinal no domínio da frequência.

Para sinais discretos, como aqueles obtidos em sistemas digitais, utiliza-se a DFT. Dado um sinal discreto  $x[n]$  com  $N$  amostras, a DFT é calculada como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

Aqui,  $X[k]$  representa as componentes de frequência do sinal.

A FFT é uma versão otimizada da DFT que explora simetrias e redundâncias nos cálculos para reduzir o número de operações. Ela divide o sinal em partes menores (usando uma abordagem "dividir para conquistar"), calcula a DFT de cada parte e combina os resultados de forma eficiente. Isso é feito principalmente através de técnicas como o decimamento no tempo ou decimamento na frequência (WAHAB; GRITTI; O'HAYER, 2021).

Os filtros são sistemas ou algoritmos usados para modificar ou processar sinais. Eles são amplamente utilizados no processamento de áudio. Entre os tipos mais comuns de filtros estão os filtros passa-baixa, passa-alta e passa-faixa, cada um com características e aplicações específicas:

- **Butterworth:** Este filtro busca fornecer uma resposta em frequência o mais plana possível na banda de passagem, sem ondulações. Ele é caracterizado por sua suavidade e é amplamente utilizado em aplicações onde a distorção do sinal deve ser minimizada, ele será utilizado como filtro inicial antes de passar por qualquer outro.
- **Passa-baixa:** Um filtro passa-baixa permite a passagem de sinais com frequências abaixo de uma determinada frequência de corte ( $f_c$ ) e atenua sinais com frequências acima desse valor. Esse tipo de filtro é útil para remover ruídos de alta frequência ou suavizar sinais.
- **Passa-alta:** Faz o oposto do filtro passa-baixa - ele permite a passagem de sinais com frequências acima da frequência de corte ( $f_c$ ) e atenua sinais com frequências abaixo desse valor. Esse tipo de filtro é útil para destacar detalhes ou componentes de alta frequência.
- **Passa-faixa:** Permite a passagem de sinais dentro de uma faixa específica de frequências, definida por uma frequência inferior ( $f_1$ ) e uma frequência superior ( $f_2$ ). Sinais com frequências fora dessa faixa são atenuados.

## 2.2 Controle de nível

Quanto ao controle de nível de água dentro de um tanque, o projeto foi implementado por meio de técnicas de controle: o sistema verifica se o nível de fluido está de acordo com o desejado. Caso contrário, será analisado se o problema é referente ao excesso ou à falta de líquido. No primeiro caso, é acionado o sistema de escape para evacuar a quantidade excedente, e no outro, é empregada uma bomba para fornecer o líquido faltante.

Tal mecanismo se dá graças ao funcionamento conjunto de elementos sensoriais, responsáveis pela leitura, com elementos atuadores: feita a leitura dos sensores, ela é enviada para o sistema e sua lógica é executada, enviando assim sinais para os atuadores. Assim, o sistema é capaz de analisar uma situação e tomar decisões com base nos dados que lhe foram fornecidos. Um sistema de controle pode ser classificado entre malha aberta e fechada: o primeiro é um sistema no qual, após o sinal de entrada acionar um processo, é gerado um sinal de saída. No entanto, é possível que existam sinais de erro. Já no outro caso, existe a retroalimentação: depois do sinal de saída ser gerado, ele é comparado com o de entrada, e caso sejam detectados sinais de erro, o processo recomeça. Aqui, foram utilizados sistemas de controle com ambos os tipos de malhas.

Para que o sistema possa ser empregado com uma malha fechada, é preciso que seja utilizado um controlador PID: trata-se de um algoritmo de controle responsável por manter o valor desejado de uma variável de controle. Aqui, ele terá um papel fundamental, visto que será graças a ele que a variável responsável pelo nível do fluido dentro de um tanque será controlada. Juntamente, foram empregados sensores e um arduino - plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto -, responsável por executar o código do controlador PID e coordenar os sensores.

Paralelamente ao outro estudo de caso, aqui também foi empregado o uso do software MATLAB/Simulink: por meio dele, é facilitado o cálculo necessário envolvendo a transformada de Laplace, visto que é possível, por meio do simulador virtual, projetar malhas abertas e fechadas de um sistema de controle. O objetivo, ao aplicar tal método, é que possa ser calculada a função de transferência: a transformada de Laplace é capaz de transformar uma função do tempo  $f(t)$  em uma função no domínio da frequência, auxiliando no estudo do comportamento do sistema (DIAS, FARIAS, GUIMARÃES, COSTA, OLIVEIRA, 2023). Ela é dada por:

$$f(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

A função de transferência, por sua vez, irá descrever matematicamente o comportamento do

controlador no domínio de Laplace (domínio da frequência). Ela associa diferentes valores de  $s$  (variável complexa de Laplace) à resposta do sistema de controle.

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Em que:

- $K_p$ : Trata-se do ganho proporcional. A sua função é de responder diretamente ao erro entre a saída e o valor desejado. No entanto, caso  $K_p$  seja alto demais, o sistema pode se tornar instável.
- $\frac{K_i}{s}$ : É o termo integral. Com ele, o erro persistente ao longo do tempo é acumulado, e, dessa maneira, faz com que o sistema corrija pequenos erros.
- $K_d s$ : Refere-se ao ganho derivativo. Sua função é de prever o comportamento do erro futuramente, por meio da derivada do erro em relação ao tempo. É muito útil para evitar que o sistema passe por instabilidade ou grandes oscilações.

### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Supressão de ruído

A partir da análise dos filtros aplicados a um sinal de áudio gravado experimentalmente, foi obtido duas figuras que ilustram, respectivamente, o espectro de frequência e o comportamento no domínio do tempo do sinal original e do sinal processado pelos filtros passa-baixa, passa-alta e passa-banda.

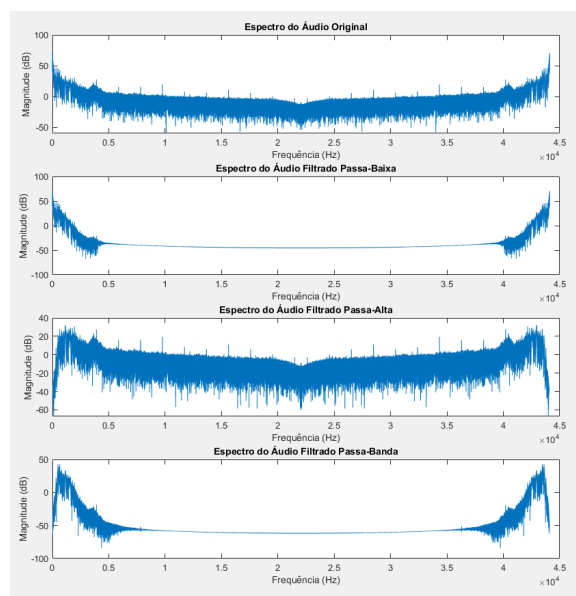


Figura 1: Espectro Magnitude x Frequência.

A Figura 1 mostra o espectro de frequência do sinal de áudio original e do sinal após a aplicação dos filtros passa-baixa, passa-alta e passa-banda.

- **Sinal original:** O espectro do sinal original exhibe componentes de frequência distribuídas ao longo de uma ampla faixa, desde baixas até altas frequências. O áudio em questão trata-se de um áudio gravado em frente a um ventilador, com a intenção de produzir perturbações de baixa frequência.
- **Filtro Passa-Baixa:** Após a aplicação, observa-se a retenção das componentes de baixa frequência (abaixo da frequência de corte -  $F_c$ ) e a atenuação das componentes de alta frequência. O gráfico mostra uma queda abrupta na magnitude para frequências acima da frequência de corte, confirmando a eficácia do filtro em remover perturbações de frequências mais baixas.
- **Filtro Passa-Alta:** Ele preserva as componentes de alta frequência (acima de  $F_c$ ) e atenua as de baixa frequência. No gráfico, é visível a supressão das frequências abaixo de  $F_c$ , enquanto as frequências mais altas mantêm sua magnitude próxima à do sinal original.
- **Filtro Passa-Banda:** O filtro passa-banda permite a passagem de uma faixa específica de frequências (entre  $F_1$  e  $F_2$ ), atenuando as frequências fora dessa faixa. O espectro resultante se assemelha ao do filtro passa-baixa, com um pico de magnitude maior.

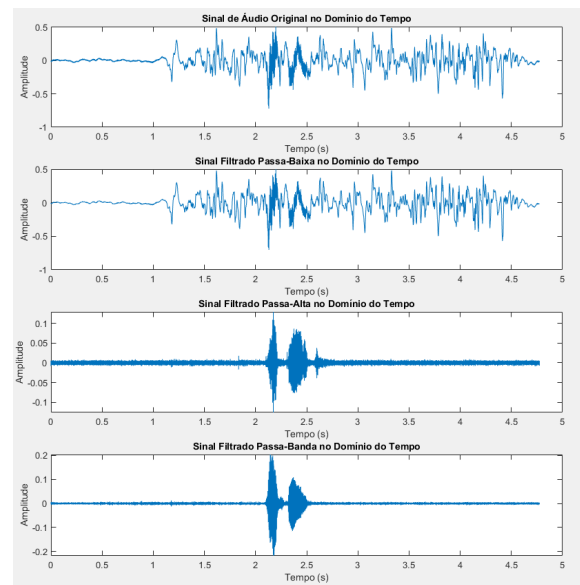


Figura 2: Espectro Amplitude x Frequência.

A Figura 2 apresenta os mesmos sinais, mas no domínio do tempo, tendo gráficos de tempo (eixo das ordenadas -  $x$ ) em função da amplitude (eixo das abscissas -  $y$ ). Essa análise complementa

a visão do espectro de frequência, mostrando como os filtros afetam a forma de onda do sinal.

- **Filtro Passa-Baixa:** Após a aplicação do filtro, visualiza-se que a forma de onda obtida é semelhante à original: muitas perturbações no áudio continuaram.
- **Filtro Passa-Alta:** O filtro projeta uma forma de onda mais suave, de maneira que a maioria das perturbações foram reduzidas.
- **Filtro Passa-Banda:** Foi projetada, graças ao filtro, uma forma de onda mais semelhante àquela do filtro passa-alta, no entanto, é perceptível que a amplitude de algumas regiões diminuiu.

### 3.2 Controle de nível

Quanto ao estudo de caso referente ao controle de nível, foram utilizadas ambas as malhas: Na aberta, o circuito analisado consta com uma função step, seguida por uma função de transferência e outra de delay. Por fim, também há um Scope - ele permite plotar um circuito em um gráfico.

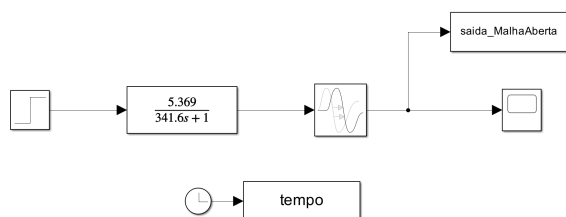


Figura 3: Malha aberta

Devido à ausência de realimentação, não houve comparação entre o sinal de saída e o de entrada. Por conta disso, o sistema não foi eficiente: o erro não foi corrigido, de forma que o gráfico se assemelha a uma função logarítmica.

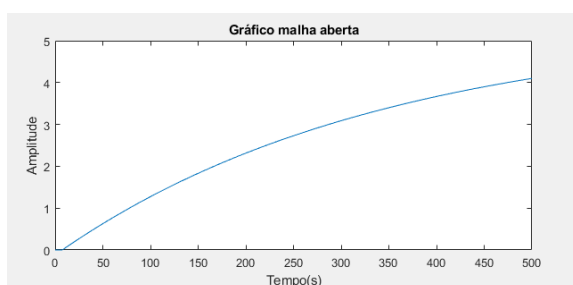


Figura 4: Gráfico Tempo X Amplitude

Em relação à malha fechada, os resultados foram satisfatórios. Como já citado anteriormente, a presença de um sistema de realimentação, unido ao controlador PID, permite que o sistema de controle se torne muito mais eficiente. O circuito em malha fechada é semelhante ao da aberta, também contendo os mesmos componentes, além de

também possuir um operador soma - responsável por comparar o valor de saída com o de entrada -, um controlador PID e um gerador de função.

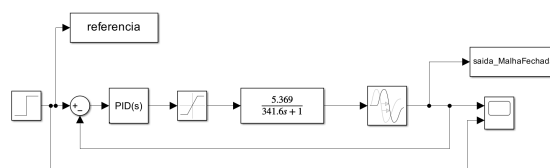


Figura 5: Malha Fechada

No gráfico, é possível visualizar que no início houve um crescimento muito rápido: isso se dá graças à função Step, a qual faz com que o sistema exceda o valor esperado do Setpoint e, com o tempo, atinja a estabilidade.

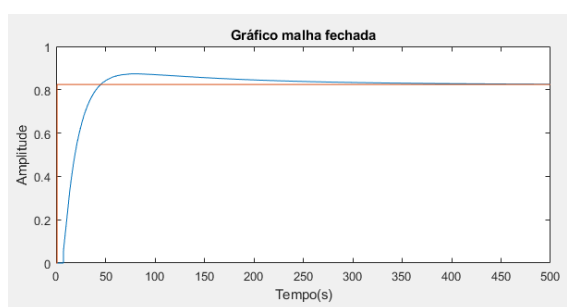


Figura 6: Gráfico Tempo X Amplitude

Em sistemas lineares, uma das maneiras de analisar respostas em frequência é por meio do diagrama de Bode. Com ele, é possível visualizar por meio de um gráfico a magnitude e a fase com a variação de frequência. Mais especificamente, existem dois tipos de gráfico: o de magnitude e o de fase, onde ambos são mostrados em função da frequência.

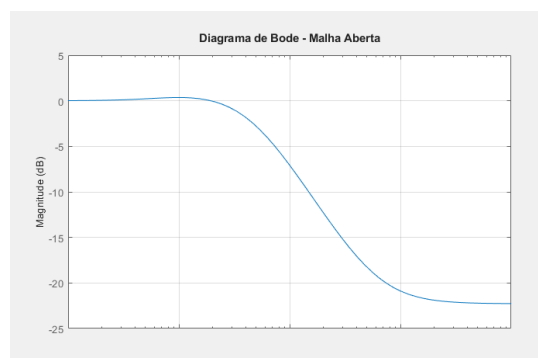


Figura 7: Gráfico de magnitude - Malha Fechada

## 4 Conclusão

A análise realizada neste estudo demonstrou a eficácia da Transformada Rápida de Fourier (FFT)

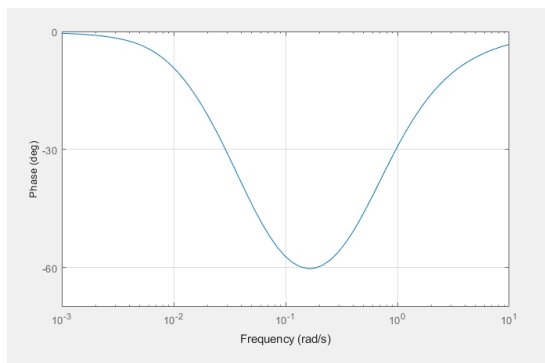


Figura 8: Gráfico de fase - Malha Fechada

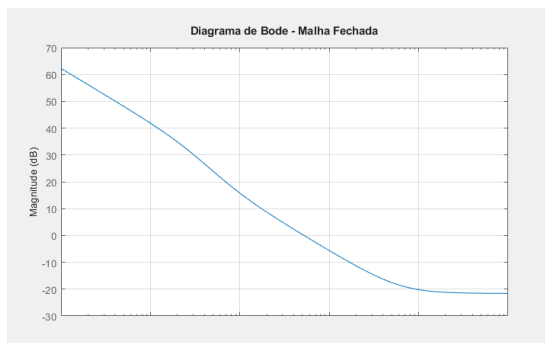


Figura 9: Gráfico de magnitude - Malha aberta

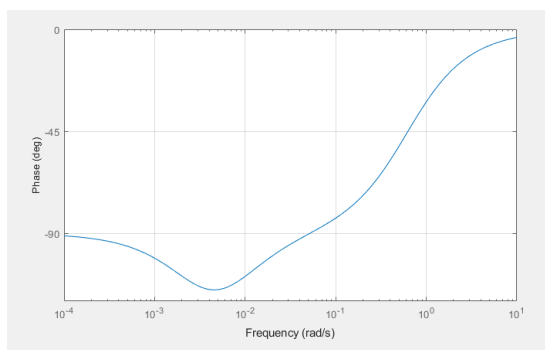


Figura 10: Gráfico de fase - Malha aberta

como ferramenta fundamental para o processamento e tratamento de sinais de áudio, especialmente na supressão de ruídos. A FFT permitiu a decomposição do sinal original em suas componentes de frequência, facilitando a aplicação dos filtros passa-baixa, passa-alta e passa-banda. Após o processamento, o programa reproduziu todos os áudios filtrados, possibilitando uma outra forma de avaliar os resultados.

O filtro passa-alta destacou-se como o mais adequado para o áudio em questão, que consistia em uma gravação realizada em frente a um ventilador, houveram perturbações de baixa frequência, mas esse filtro foi eficaz em reter as componentes com frequência acima de 1000hz, mantendo a essência do sinal original. A forma de onda resultante no domínio do tempo destacou bastante apenas a fala, confirmando que o filtro passa-alta foi capaz de preservar as características principais do áudio sem muda-lo muito.

Em relação ao segundo estudo, nota-se que o sistema controlado foi eficiente apenas quando há a presença de uma malha fechada. Com a malha aberta, não há verificação de erros, portanto, perde completamente sua eficiência. Já com a malha fechada, o resultado foi o oposto: com o controlador, a verificação de erros foi eficiente. Vale ressaltar que o controlador apenas teve um bom funcionamento graças à aplicação da Transformada de Laplace, a qual foi responsável por auxiliar a encontrar a função de transferência.

Dessa forma, por meio do estudo de caso realizado foi possível compreender as possíveis aplicações dos métodos de transformadas de Fourier e de Laplace, bem como a importância de saber manipular e interpretar sinais juntamente com o conhecimento teórico.

## 5 Referências

CHEN, G (2024). *"Matlab-based Speech Signal Design and Processing"* - Zhanjiang University of Science and Technology, Zhanjiang, 524094, China

WAHAB, FAROOQ, M; GRITTI, FABRICE; O'HAVER, C, THOMAS (2021). *Discrete Fourier transform techniques for noise reduction and digital enhancement of analytical signals* - Department of Chemistry and Biochemistry, University of Texas at Arlington, USA

DIAS, RAFAEL; FARIAS, MARIANA; GUIMARÃES, ELIAS; COSTA, BRENDA; OLIVEIRA, STEFÂNIA (2023). *"Sistema de controle de nível usando controlador PID"* - Universidade Federal do Oeste da Bahia, Brasil