

1. Tópico: Implementação de um sistema de tempo discreto LTI modelado por equação de diferença.

2. Objetivo: Implementar computacionalmente um sistema LTI modelado por equação de diferenças para filtragem de um sinal elétrico.

3. Desenvolvimento:

Parte 1. Sistema de Tempo-Discreto: *Filtro Notch*.

Muitas aplicações em Processamento Digital de Sinais requerem a eliminação de certas frequências que compõem o sinal analisado. Um sistema de tempo discreto que pode ser utilizado para esse fim consiste no filtro *notch* parametrizado. A resposta de ganho desse filtro é exemplificada na Fig. 1. A faixa de rejeição está centrada na frequência cancelada, denominada ω_{notch} , onde a resposta em Ganho é nula.

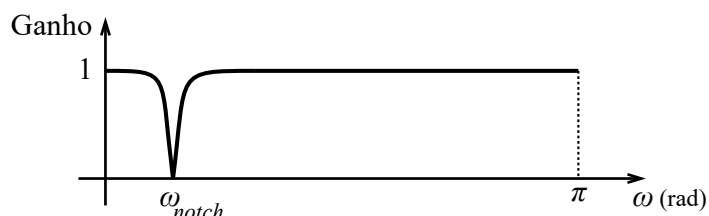


Figura 1. Resposta de ganho de um filtro *notch*.

O filtro *notch* parametrizado é modelado através de uma equação de diferenças de 2ª ordem dada por,

$$y[n] = -a_1y[n-1] - a_2y[n-2] + b_0x[n] + b_1x[n-1] + b_2x[n-2]$$

onde:

$$a_1 = -\beta(1 + \alpha); \quad a_2 = \alpha; \quad b_0 = \frac{1 + \alpha}{2}; \quad b_1 = -\beta(1 + \alpha); \quad b_2 = \frac{1 + \alpha}{2}$$

Os parâmetros α e β estão associados, respectivamente, à largura da faixa de rejeição e à frequência que deve ser cancelada. Para valores pequenos de α (≈ 0), a faixa de rejeição é ampla e *atenua* significativamente componentes laterais à frequência ω_{notch} . Por outro lado, quando α se aproxima da unidade, a faixa de rejeição torna-se estreita e implica em um filtro mais seletivo. O parâmetro β pode ser calculado a partir da frequência de *notch*, utilizando-se,

$$\beta = \cos(\omega_{notch})$$

É importante ressaltar que ω_{notch} corresponde à frequência do sinal a ser cancelado após a discretização do sinal contínuo analisado com uma frequência de amostragem f_s . Deste modo, em termos do período de amostragem, T_s , a frequência de *notch*, ω_{notch} , é dada por,

$$\omega_{notch} = 2\pi f_{notch} T_s$$

onde f_{notch} é componente de frequência que se deseja eliminar, do sinal contínuo analisado.

Parte 2. Filtros ativos de potência

A disseminação de cargas lineares para uso residencial, comercial e industrial trouxe uma série de benefícios aos fornecedores e aos consumidores de energia elétrica, mas também foi responsável por problemas. Se por um lado o uso de dispositivos de eletrônica de potência permitiu uma maior controlabilidade sobre equipamentos que fazem uso de energia, por outro lado, a “contaminação” dos sinais elétricos (idealmente senoidais) implica, por exemplo, em um maior aquecimento de máquinas rotativas, entre outros problemas.

As cargas não lineares são responsáveis por uma contaminação das correntes do sistema elétricos por componentes harmônicas. A interação dessas correntes harmônicas com as impedâncias de transmissão são

responsáveis por significativas distorções harmônicas nas formas de onda de tensão elétrica nos Pontos de Acoplamento Comuns (PACs).

Neste contexto, um filtro ativo de potência consiste de um sistema cujo objetivo é fornecer a corrente harmônica que cargas não lineares absorvem do sistema elétrico, fazendo com que a corrente da fonte de energia se aproxime de uma corrente senoidal ideal. Como consequência, tem-se a redução ou até mesmo a mitigação das distorções de forma de onda da tensão fornecida pelas concessionárias de energia. Na Fig. 2 apresenta-se uma configuração em paralelo de um filtro ativo, o qual deve identificar na corrente da carga, i_{carga} , o conteúdo harmônico absorvido do sistema e, em seguida, fornecê-lo a estas cargas para aproximar i_{fonte} de um sinal senoidal. O filtro ativo de potência utiliza dispositivos semicondutores de potência para realizar sua função.

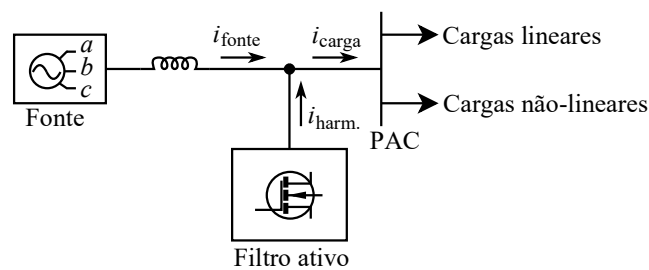


Figura 2. Representação esquemática de um filtro ativo de potência conectado em um sistema elétrico

Parte 3. Considerando um filtro ativo microcontrolado, no qual as chaves eletrônicas são comandadas por um algoritmo executado em um microcontrolador, que estima o conteúdo harmônico de um sinal de corrente medido em um PAC, pede-se:

- Implementar no SCILAB um filtro *notch* para extrair o conteúdo harmônico de um sinal elétrico de corrente. Os dados do sinal elétrico analisado são apresentados na Tabela I. Outros dados de simulação são apresentados na Tabela II. A Figura 3 apresenta graficamente o sinal elétrico de corrente e o respectivo conteúdo harmônico.

Tabela I. Conteúdo harmônico do sinal analisado

| Componente | Frequência (Hz) | Amplitude (p.u.) | Fase (°) |
|--------------|-----------------|------------------|----------|
| Fundamental | 60 | 1.0 | 0 |
| 3º harmônico | 180 | 0.3 | 22,5 |
| 5º harmônico | 300 | 0.1 | -18 |
| 7º harmônico | 420 | 0.05 | 0 |

Tabela II. Dados de simulação

| Parâmetro | Valor |
|--------------------------|-----------------|
| Frequência de amostragem | 3840 Hz |
| Tempo de simulação | 0 a 20 segundos |

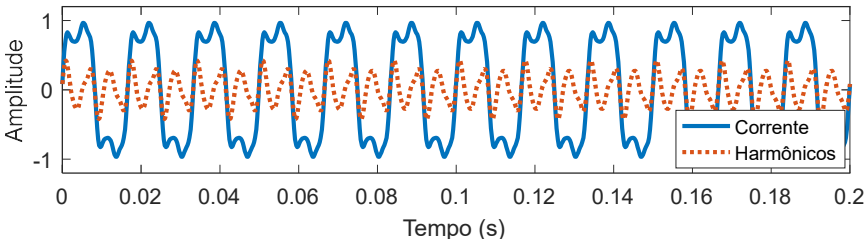


Figura 3. Sinal elétrico com harmônicos.

```
clear
close all
clc

% Definição dos parâmetros de simulação
```

```

fs = 3840; %Freq. de amostragem em Hertz (s-sampling)
Ts = 1/fs; %Período ou intervalo de amostragem
t = 0:Ts:20; %Vetor de tempo para a simulação
N = length(t); %Número de pontos simulados entre 0 e 20seg.
y = zeros(1, N); %Inicialização do sinal de saída do filtro

% Definição do sinal analisado
i1 = 1.0*sin(2*pi*60*t); %Componente de freq. fundamental 60Hz
i3 = 0.3*sin(2*pi*180*t+(pi/180)*22.5); %3° harmônico
i5 = 0.1*sin(2*pi*300*t+(pi/180)*(-18)); %5° harmônico
i7 = 0.05*sin(2*pi*420*t); %7° harmônico
i = i1 + i3 + i5 + i7; %Sinal de corrente completo (como se fosse medido por um
sensor de PAC)
ih = i3 + i5 + i7; %Conteúdo harmônico do sinal de corrente

% Definição dos coeficientes do filtro
wnotch = 2*pi*60*Ts; %Frequência de amostragem em rad
Alfa = 0.9; %Parâmetro de controle de largura da faixa de rejeição
Beta = cos(wnotch); %Parâmetro beta do filtro que controla a posição da frequência
eliminada
a1 = - Beta * (1 + Alfa);
a2 = Alfa;
b0 = (1 + Alfa)/2;
b1 = -Beta*(1 + Alfa);
b2 = (1 + Alfa) / 2;

% Processo de filtragem
for n = 1:N
    if(n > 2)
        y(n) = -a1*y(n-1) - a2*y(n-2) + b0*i(n) + b1*i(n-1) + b2*i(n-2); %Calculo da
saída
    elseif (n == 2)
        y(n) = -a1*y(n-1) - a2*0 + b0*i(n) + b1*i(n-1) + b2*0; %Calculo da saída
    else
        y(n) = -a1*0 - a2*0 + b0*i(n) + b1*0 + b2*0; %Calculo da saída
    end
end

%Plotando as figuras
figure(1)
subplot(211)
plot(t,i,'k','linewidth',2)
hold on
plot(t,y,'b','linewidth',2)
legend('Sinal de corrente','Corrente harmônica estimada')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Tempo (s)')
title('Estimativa da corrente harmônica do sinal de corrente')
hold off
subplot(212)
plot(t,ih,'k','linewidth',2)
hold on
plot(t,y,'b','linewidth',2)
legend('Conteúdo harmônico real','Corrente harmônica estimada')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Tempo (s)')
title('Comparação da corrente harmônica real com a estimativa')
hold off

```

- Executar o arquivo *script* para vários valores do parâmetro α . Para cada simulação gerar um gráfico com o seguinte trecho de código e realizar uma análise comparativa.

```

// Apresentação dos resultados
figure(1)

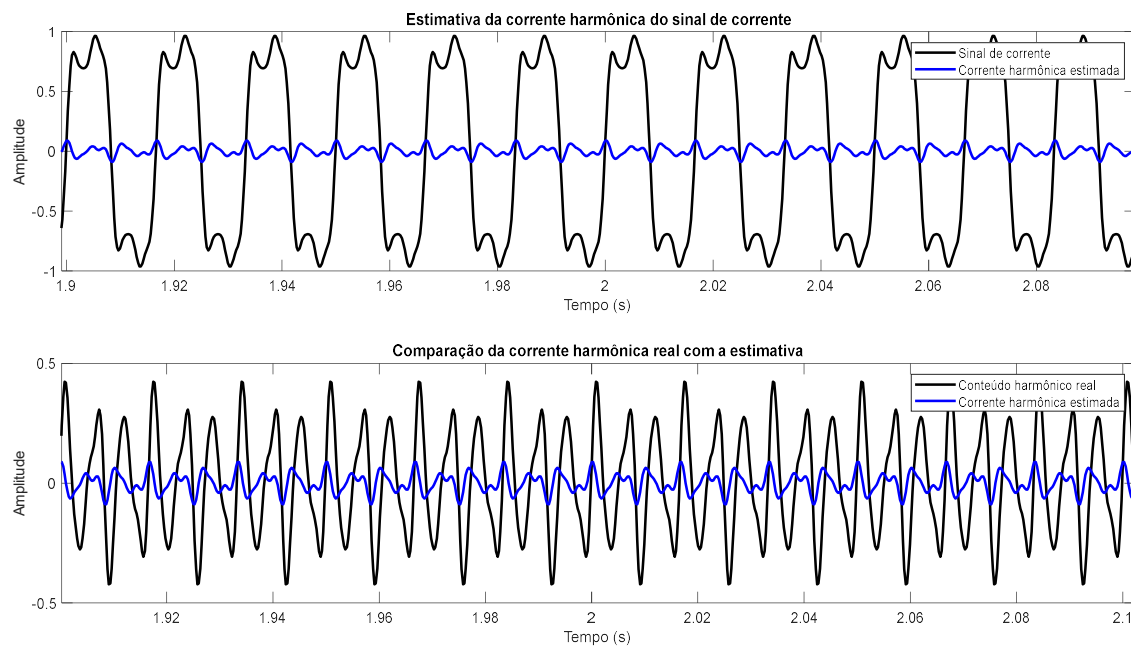
```

```

subplot(211)
plot(t,i,'k','linewidth',2)
plot(t,y,'b','linewidth',2)
legend('Sinal de corrente','Corrente harmônica estimada')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Tempo (s)')
title('Estimativa da corrente harmônica do sinal de corrente')
subplot(212)
plot(t,ih,'k','linewidth',2)
plot(t,y,'b','linewidth',2)
legend('Conteúdo harmônico real','Corrente harmônica estimada')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Tempo (s)')
title('Comparação da corrente harmônica real com a estimativa')

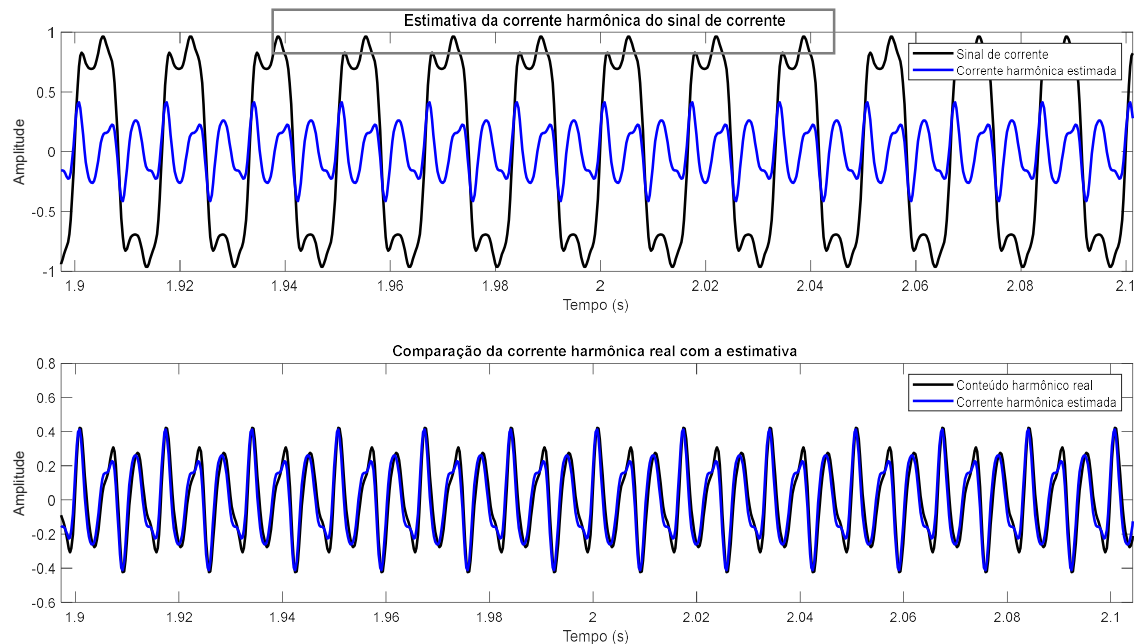
```

- **Gráficos gerados usando Alfa = 0.1.**



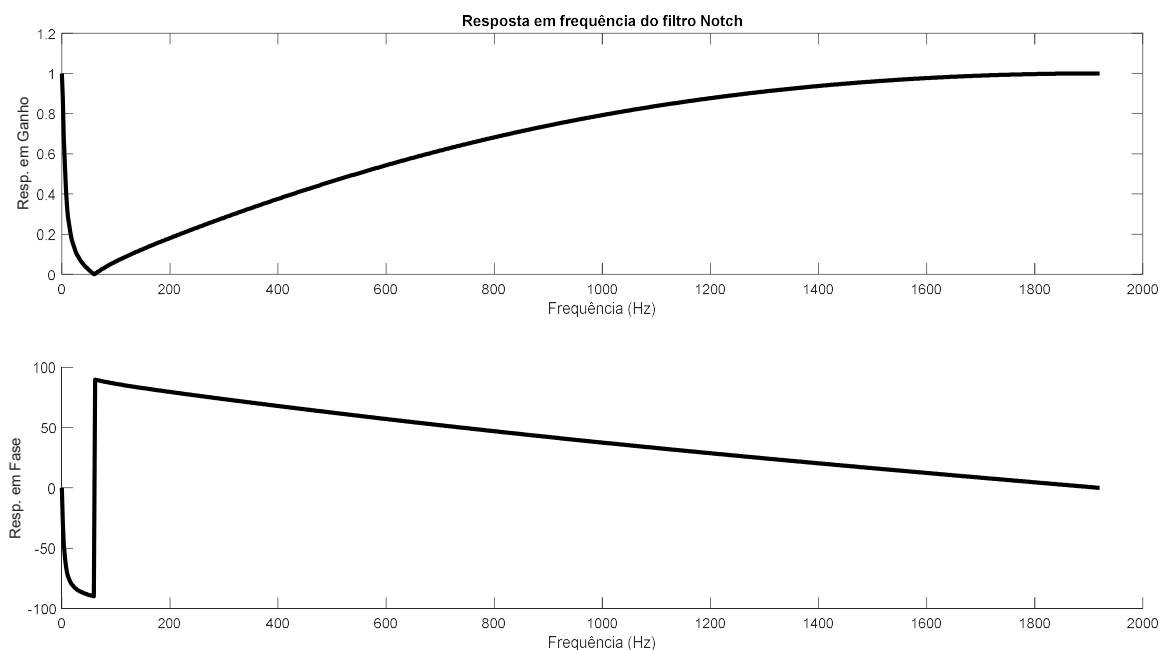
Analisando-se o gráfico acima, plotado para Alfa = 0.1, pode-se perceber que a corrente harmônica estimada teve uma amplitude média de aproximadamente 0,1 enquanto a amplitude média do conteúdo harmônico real foi aproximadamente de 0,4. Essa grande diferença ocorre pois o baixo valor do parâmetro Alfa implica em uma maior faixa de rejeição dos sinais harmônicos que serão atenuados. Como a corrente harmônica estimada pelo filtro tem uma grande discrepância quando comparada ao sinal real, o filtro não contribui com eficácia para compensar a componente harmônica que é demandada pelas cargas não-lineares.

- **Gráficos gerados usando Alfa = 0.9.**



Analisando-se o gráfico acima, plotado para $\text{Alfa} = 0.9$, pode-se perceber visualmente que a corrente harmônica estimada é muito próxima harmônico real. Com um valor de Alfa próximo de 1 o filtro se torna mais preciso atenuando somente a componente de frequência desejada e não interferindo no sinal das demais componentes harmônicas. Como a corrente harmônica estimada pelo filtro tem uma grande proximidade quando comparada ao sinal real, o filtro contribui com eficácia para compensar a componente harmônica que é demandada pelas cargas não-lineares.

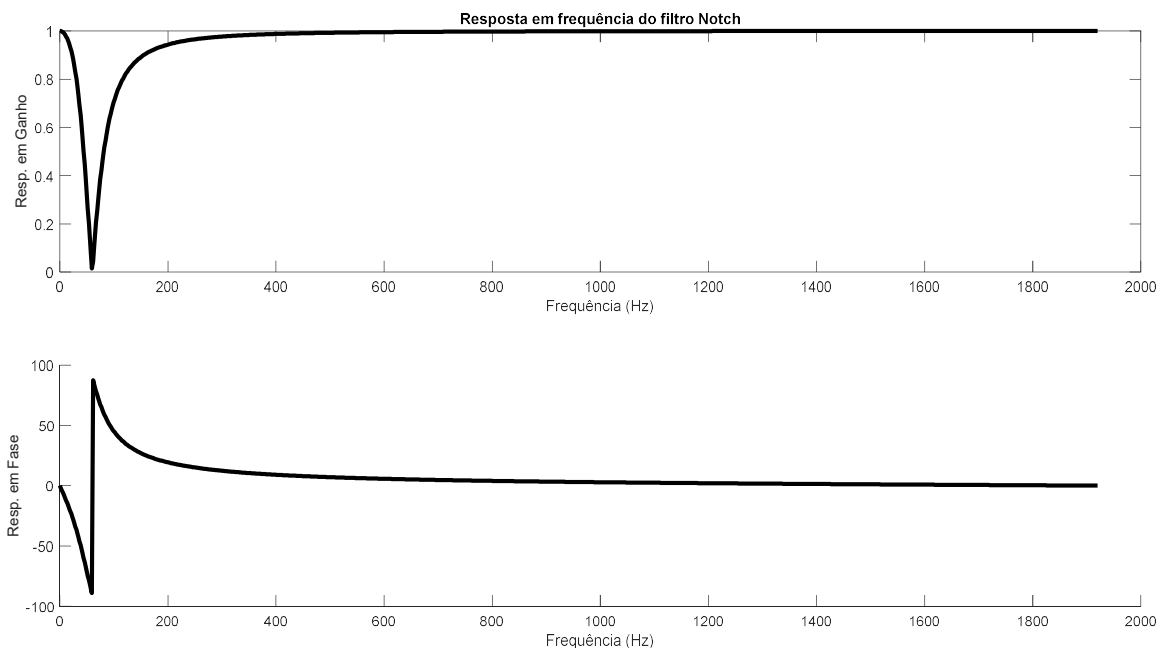
- A resposta em frequência do filtro *notch* será abordada no encontro síncrono da respectiva aula e o estudante deve analisar o processo de escolha adequado do parâmetro α para a aplicação.
- **Alfa = 0.1**



Analisando-se o gráfico de Ganho X Frequência acima, nota-se que para um valor de Alfa pequeno (distante de 1) o ganho atinge 0 para a componente de 60Hz e começa a subir recuperando novamente o valor 1 somente

próximo de 1800Hz, ou seja, atenuando uma grande faixa de componentes harmônicas. Nota-se também um atraso de fase das componentes com frequência próxima a 60Hz (Exatamente na componente de 60Hz ocorre um atraso de fase de 90°) e as componentes de frequência maior que 60Hz sofrem um adiantamento de fase, começando por 90° e decaindo até chegar em 0° em aproximadamente 1950Hz.

- Alfa = 0.9



Analisando-se o gráfico de Ganho X Frequência acima, nota-se que para um valor de Alfa de 0,9 (mais próximo de 1) o ganho atinge 0 para a componente de 60Hz e começa a subir rapidamente novamente, recuperando o valor 1 próximo de 400Hz, ou seja, atenuando uma pequena faixa de componentes harmônicas. Logo, a conclusão é que o Alfa ideal para o filtro será o Alfa mais próximo do valor 1 possível, para que o apenas a componente desejada de 60Hz seja atenuada.

Nota-se também um atraso de fase das componentes com frequência próxima a 60Hz (Exatamente na componente de 60Hz ocorre um atraso de fase de 90°) e as componentes de frequência maior que 60Hz sofrem um adiantamento de fase, começando por 90° e decaindo até chegar em 0° em aproximadamente 400Hz.

Considerações Finais: Discorra as conclusões que a atividade prática 02 proporcionou.

A implementação do algoritmo do filtro de Notch foi implementada com sucesso e comprovada a teoria abordada na disciplina. Nos gráficos de Fase X Frequência da resposta em frequência do filtro de Notch não foi possível obter os valores esperados pois houve uma diferença na utilização da função **atan** entre o Scilab e o Matlab que impactou em resultados das fases diferentes.

Este trabalho teve como objetivo mostrar que a eficácia do filtro de Notch corresponde diretamente ao valor de Alfa, quanto mais próximo de 1, mais preciso e eficaz será o filtro, atenuando apenas a componente desejada e obtendo o sinal de harmônicas mais próximo do real possível para poder injetar esse sinal na saída do filtro e suprir a demanda das cargas não lineares do sistema, resultando em uma tensão senoidal praticamente pura.

Bom trabalho!