

MODULAÇÃO AM E DEMODULADOR DE ENVELOPE

Objetivos de Estudo:

- Desenvolvimento de um modulador AM e um demodulador, utilizando MatLab.
- Visualização dos efeitos de modulação e demodulação no domínio tempo e frequência.
- Representação gráfica de efeitos, como sobremodulação e distorção harmônica.

Introdução

A modulação é a palavra chave quando tratamos de transmissão de sinais. Seja pelo ar, fios ou fibras, ela nos possibilitou as massivas redes de comunicação, que se tornaram o alicerce da sociedade moderna. A ideia de deslocar um sinal de informação para uma frequência diferente da original permitiu que, simultaneamente, por um mesmo canal, diversas mensagens diferentes fossem transmitidas. Sem isso, por exemplo, seria impossível compartilhar junto ao telefone, o seu sinal de internet.

Neste trabalho, utilizaremos o conceito de modulação por amplitude, o primeiro modelo que foi utilizado para *broadcast* em larga escala.

Na modulação por amplitude (AM) a informação a ser transmitida varia proporcional e linearmente à amplitude de uma onda portadora. Isso permite deslocar a informação em frequência, possibilitando o uso de antenas fáceis de serem construídas (há uma relação entre comprimento de onda e o comprimento físico da antena). A portadora é comumente uma onda senoidal em uma frequência várias vezes maior que a do sinal modulante. Outra vantagem do uso de modulação é a multiplexação por divisão de frequência, em que sinais originalmente com a mesma banda-base podem, agora, com portadoras de frequência diferentes, serem transmitidos no mesmo canal.

No lado do receptor, para obter o sinal novamente, é necessário um circuito demodulador. A função do demodulador é de recuperar e separar a informação original da portadora modulada que foi recebida. O AM convencional, por conter no sinal modulado uma parcela da portadora, permite que o processo de demodulação seja muito simples. Com poucos componentes, foi possível construir receptores de AM completos, tornando este tipo de modulação a chave para as primeiras grandes rádios.

Metodologia

Para obter como resultado a modulação AM precisamos dos seguintes itens:

- Onda portadora
- Sinal modulante
- Fonte de sinal DC
- Mixer

O mixer é utilizado para misturar os sinais da portadora e o sinal modulante. Matematicamente ele é representado pela multiplicação dos sinais no tempo.

Uma parcela DC é somada com o sinal modulante fazendo com que na saída do mixer (multiplicador) a portadora esteja presente. Essa etapa é fundamental para o correto funcionamento do demodulador por envelope. (casos em que isso não ocorre serão analisados no final do documento). A equação matemática que descreve o processo é:

$$s(t) = A_c.[1 + K.m(t)].\cos(2.\pi.F_c.t)$$

Utilizando um sinal $m(t)$ também cosenoidal, com frequência F_m , obtemos:

$$s(t) = A_c.[1 + K.A_m.\cos(2.\pi.F_m.t)].\cos(2.\pi.F_c.t)$$

Onde as variáveis são:

- A_c*: amplitude da portadora
- A_m*: amplitude da informação
- F_c*: frequência da portadora
- F_m*: frequência da informação
- K*: fator de sensibilidade

Começaremos então a modelar os sinais utilizando a ferramenta MatLab:

```
function [] = modulacao_AM(K)
%% CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO
% tamanho da janela de visualização

Tw = .001;

% tempo de amostragem - iteração.
Ts = 1e-8;

%% MODULADOR

% frequência da portadora e do sinal de entrada
% portadora de 160khz conforme combinado em aula, para melhor
% representação gráfica
Fc = 160e3;
Fm = 4e3;

% amplitude da portadora e do sinal de entrada
Ac = 10;
Am = 1;

% gera a portadora e o sinal, em função do tempo
t = 0:Ts:Tw;

ct = Ac*cos(2*pi*t*Fc);
mt = Am*cos(2*pi*t*Fm);

% aplica modulador AM, com nível DC unitário e sinal de saída ot
ot = (1 + K.*mt).*ct;
```

Com a portadora e o sinal de entrada em ct e mt faremos o processo de modulação. Utilizando um fator K definido por argumento de função, fica mais simples repetir a simulação para índices de modulação diferentes.

Para visualizar os resultados no tempo utilizaremos a função plot do MatLab. Já para obtermos o resultado em frequência desenvolvi nossa função que automaticamente aplica a FFT e plota o resultado corretamente, essa função pode ser vista a seguir.

```
function [freq, amp] = plot_fft(Ts, sinal, fmin, fmax, plot_arg)

    % tentativa de aumentar a resolução com zero padding
    % coisa do grégory
    sinal = [sinal zeros(1,1e6)];

    % aplica FFT, faz o módulo, shifta pra zero e normaliza
    ftt = fftshift(abs(fft(sinal))/numel(sinal));

    %cria vetor de frequência
    f = (-numel(ftt)/2):(numel(ftt)/2-1);
    f = f.*(1/Ts)/numel(ftt);

    % plota e define eixos
    plot(f, ftt, plot_arg);

    % define limites.
    % limite superior maior 10% do máximo da fft
    axis([fmin fmax 0 max(ftt)*1.1]);

end
```

Com `plot_fft` debugar o código e mostrar os resultados ficou extremamente fácil.
Código completo para plotar a saída do modulador de forma organizada e formatada:

```
% plota sinais da parte moduladora numa figura separada
figure;
subplot(3,2,1);
plot(t,ct);
title('Portadora');

subplot(3,2,3);
plot(t,mt);
ylabel('Amplitude (un.)');
title('Sinal (informação)');

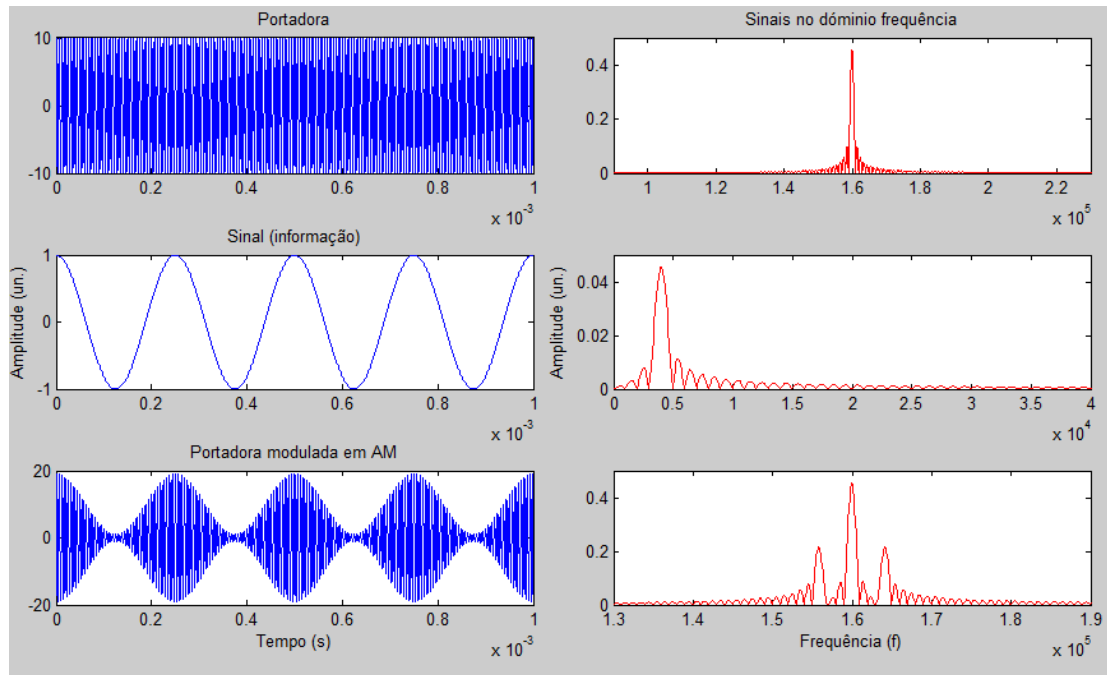
subplot(3,2,5);
plot(t,ot);
xlabel('Tempo (s)');
title('Portadora modulada em AM');

subplot(3,2,2);
plota_fft(Ts,ct,90e3,230e3,'r');
title('Sinais no domínio frequência');

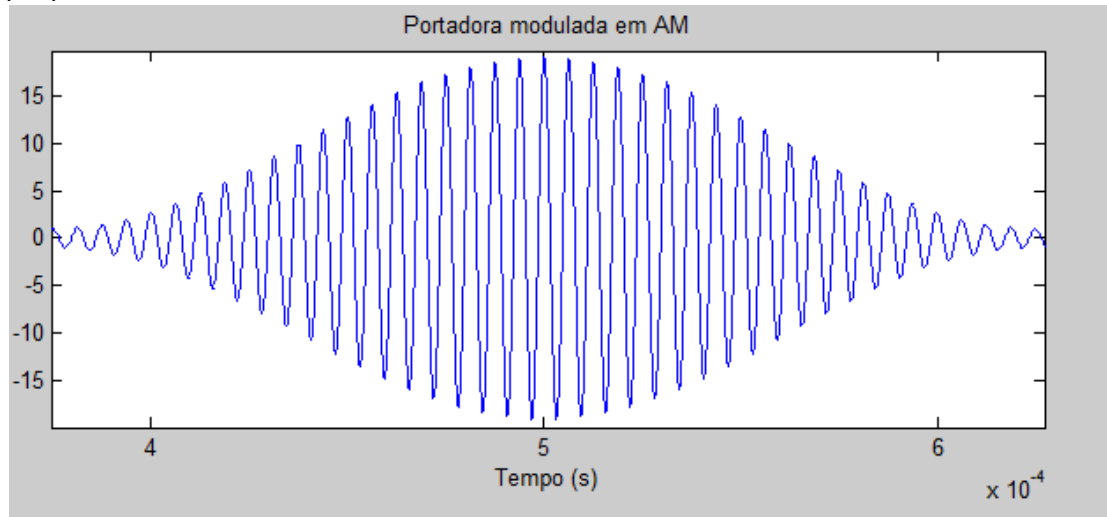
subplot(3,2,4);
plota_fft(Ts,mt,0,40e3,'r');
ylabel('Amplitude (un.)');

subplot(3,2,6);
plota_fft(Ts,ot,130e3,190e3,'r');
xlabel('Frequência (f)');
```

Resultados obtidos utilizando $K = 0.9$, $A_c = 10$, $A_m = 1$, $I_m = 0.9$:

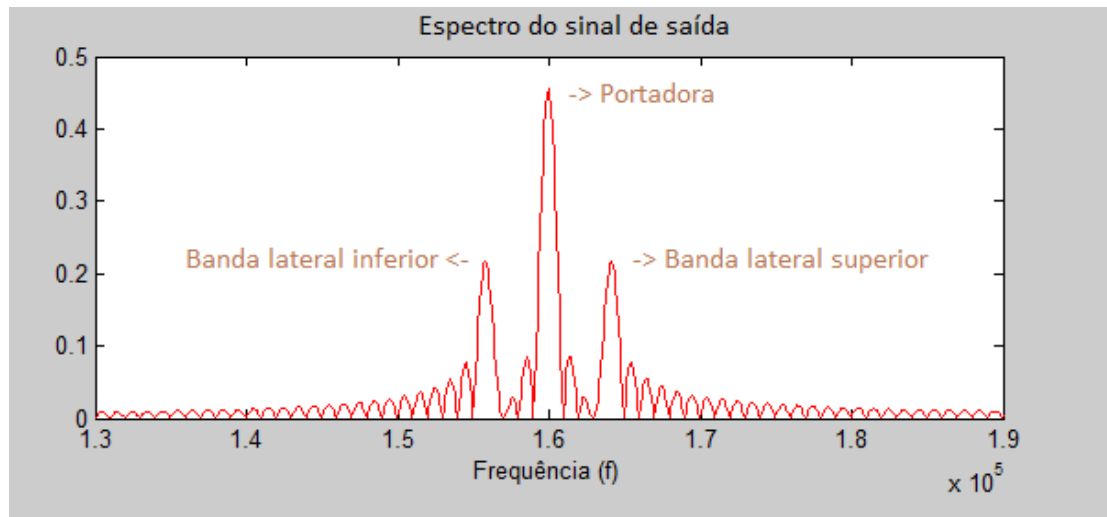


Vista aumentada do sinal de saída do modulador *ot*. Nesta imagem fica clara como a frequência da portadora se mantém constante mas a amplitude varia proporcional e linearmente ao sinal modulante.

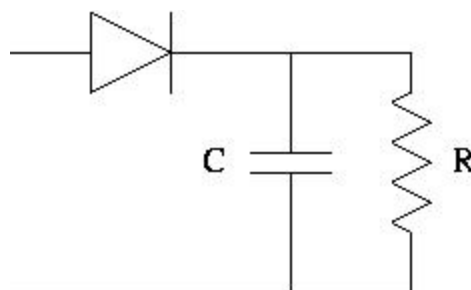


O sinal modulante (informação) está contido no envoltório da onda transmitida. É visível como o sinal original da portadora está presente a todo momento na saída do modulador. Isso significa que a portadora também está sendo transmitida. Isso possibilita a fácil demodulação utilizando um detector de envelope.

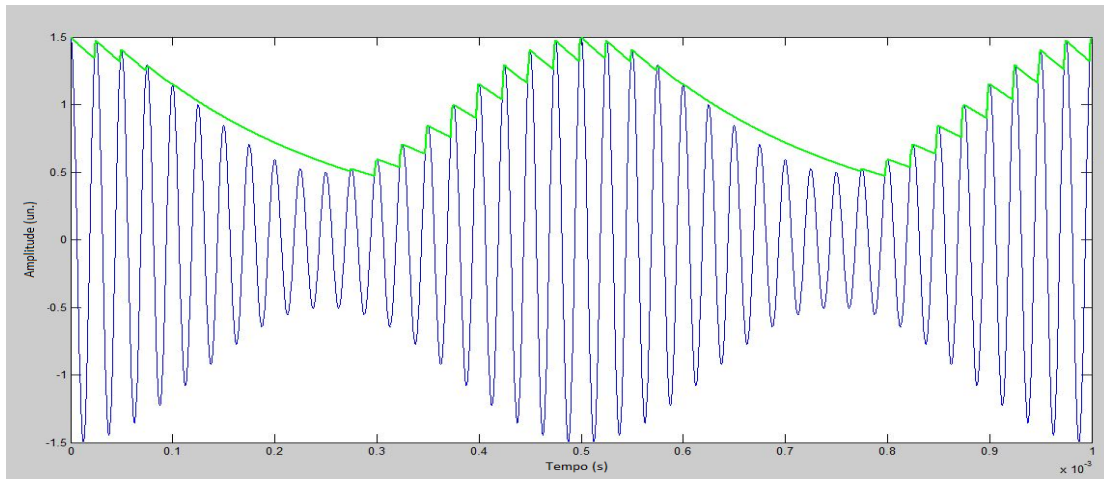
No sinal em frequência fica visível a onda portadora e as bandas laterais. As informações estão contidas nas bandas laterais e a presença da portadora facilitará a demodulação. Contudo, fica claro como a potência é desperdiçada, pois boa parte do espectro é ocupado pela portadora, que não é um sinal em forma de *payload* (informação útil).



Para o demodulador de envelope utilizamos o modelo diodo-capacitor, que pode ser visto na figura a seguir:



O funcionamento é extremamente simples e se assemelha a um retificador de potência. O capacitor será instantaneamente carregado com a tensão de pico do sinal de entrada. O resistor pode ser visto como a carga e descarregará o capacitor até o próximo pico. A saída será um sinal que segue a forma de onda (envelope) do sinal recebido. Parte da portadora ainda estará presente na saída, em forma de ripple com frequência F_c , que pode ser posteriormente filtrado utilizando um passa-baixas. Um exemplo é visto na imagem abaixo.



Na simulação transporte o modelo discretizando o circuito RC e utilizando um modelo de diodo ideal. O filtro pode ser numericamente representado pela equação iterativa

$$Y_i = \alpha X_i + (1 - \alpha) Y_{i-1}$$

que define a implementação de um filtro passa-baixas em tempo discreto, função matematicamente descrita por “Média móvel exponencialmente ponderada”. A utilização desse filtro é possível, nessa aplicação, já que consideramos a entrada sendo nula, simulando a curva exponencial de descarga do capacitor. O diodo carrega o capacitor diretamente, não influenciando na equação iterativa.

A relação entre o método iterativo em tempo discreto e o circuito em tempo contínuo é

$$R.C = \Delta T \cdot \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)$$

obtida com a utilização da transformada Z, que não faz parte do escopo desse trabalho.

Iniciamos a simulação definindo os parâmetros do nosso circuito:

```
% capacitância do capacitor, em Farads
C = 100e-9;

% resistencia da carga paralela, em Ohm (usualment a impedância do FPB
% de saída, aqui foi arbitrado)
R = 1.5e2;

% tensão de queda no diodo, em Volts. (os tempos de comutação serão
% considerados ideais)
Vd = .7;

% tensão no capacitor
Vc = 0;

% calcula consante RC
RC = R*C;

% transporta o circuito para domínio discreto, com constante de
% amortecimento O
O = Ts / (RC + Ts);
```

Com tudo definido podemos dar inicio ao processo iterativo para simular o circuito demodulador:

```
% aplica demodulador, com saída dm
for i = 1:numel(ot)
    % faz a queda exponencial da tensão no capacitor com a descarga
    % pelo resistor
    Vc = Vc * (1 - O);

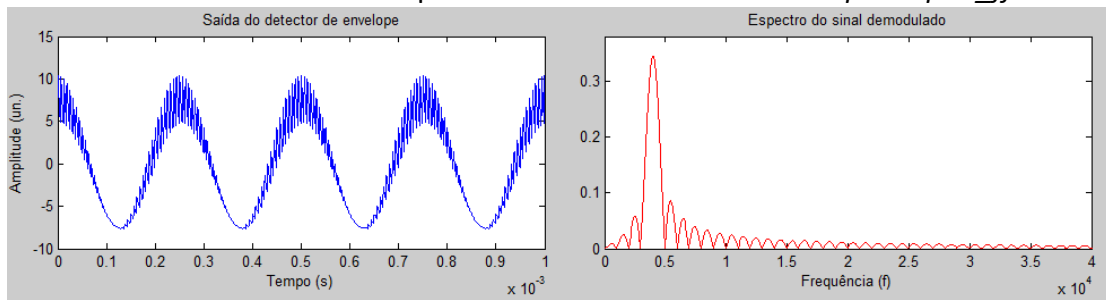
    % simula o diodo - quando a tensão de entrada chega na tenão do
    % capacitor + a queda no diodo, carrega o capacitor
    if (ot(i) >= Vd + Vc)
        Vc = ot(i) - Vd;
    end

    % armazena resultado num vetor de saída
    dm(i) = Vc;
end
```

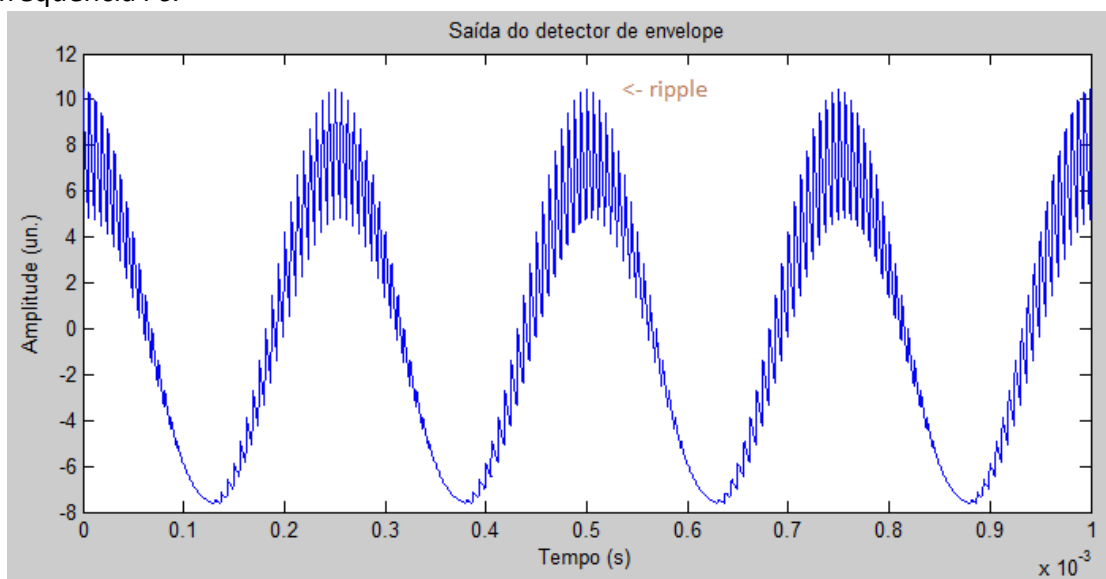
O resultado do demodulador está agora presente em dm. Como o detector retifica a parte positiva do sinal recebido, um nível DC positivo estará presente na saída. Comumente um capacitor seria colocado na saída para retirar esse nível DC, o que foi simulado com a seguinte linha de código:

```
% retira nível DC do sinal demodulado
dm = dm - mean(dm);
```

A saída do demodulador pode ser vista com um comando `plot` e `plot_fft`.

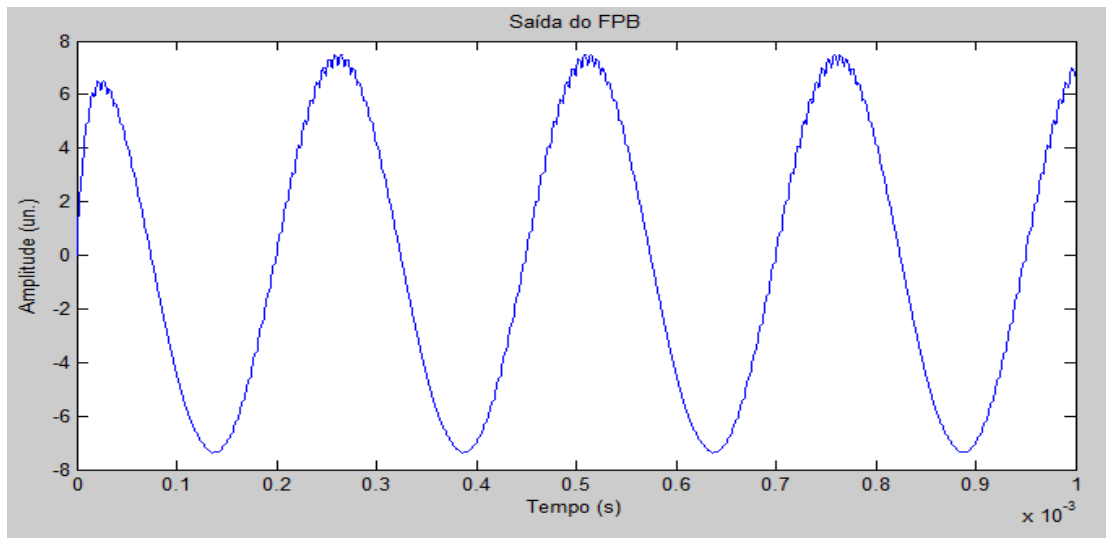


Ampliando o sinal é visível a presença da portadora no formato de ripple de frequência F_c .

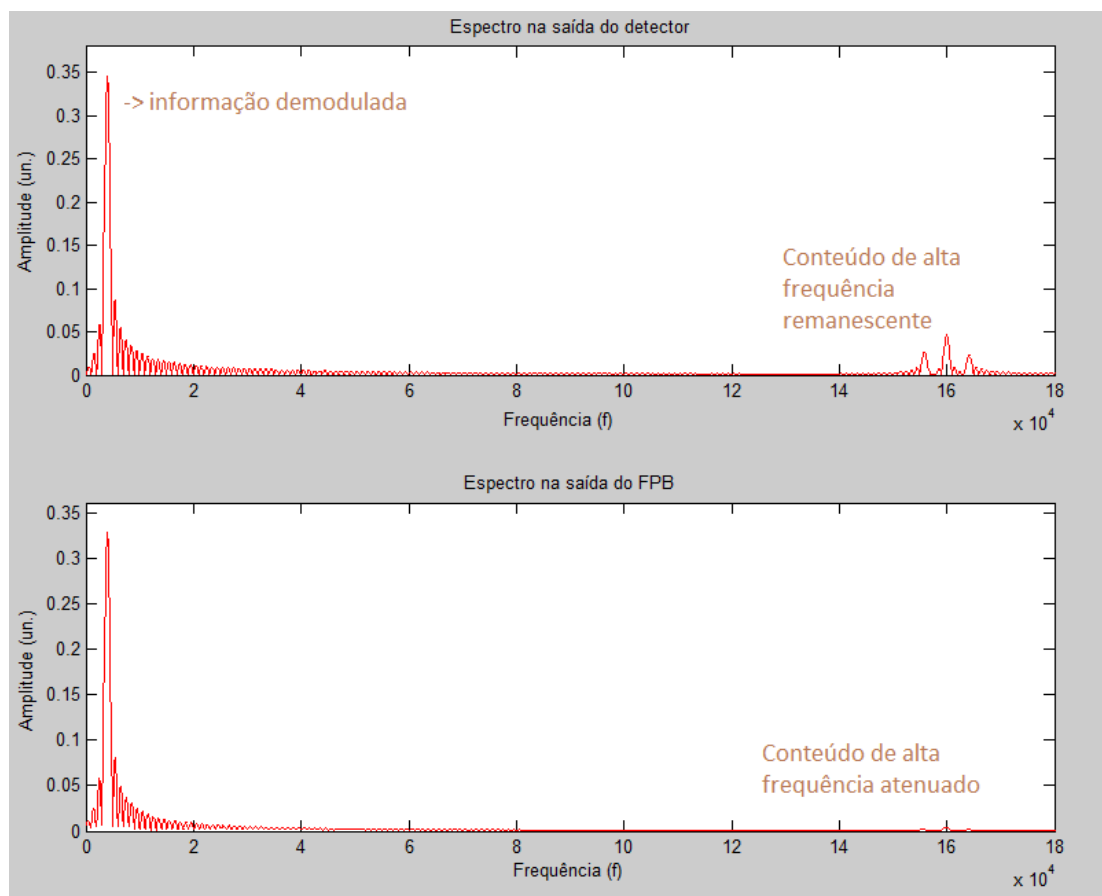


Para filtrar a o ripple da saída do demodulador tentamos adicionar um filtro passa-baixas na saída do detector de envelope. Utilizamos a mesma topologia descrita anteriormente. Os resultados foram extremamente satisfatórios.

```
% (OPCIONAL) filtro passa baixa na saída do demodulador
fpb(1) = 0;
% constante de amortecimento, escolhida arbitrariamente
P = .999;
for i = 2:numel(dm)
    fpb(i) = P * fpb(i-1) + (1-P)*dm(i);
end
```

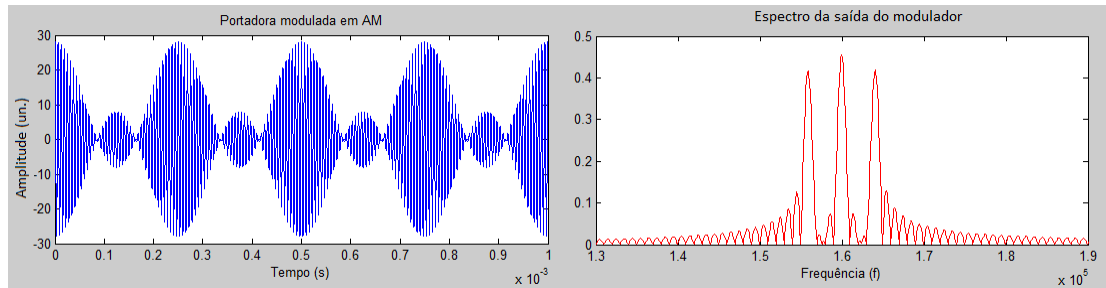


No domínio frequência fica clara a efetividade do filtro passa-baixas implementado. Observa-se que na saída do detector a parte responsável pelo alto ripple é a portadora e também as bandas laterais, que não são filtrados completamente com o circuito diodo-capacitor. Na saída do FPB, a portadora e as bandas estão consideravelmente atenuadas, comprovando a remoção do ripple.

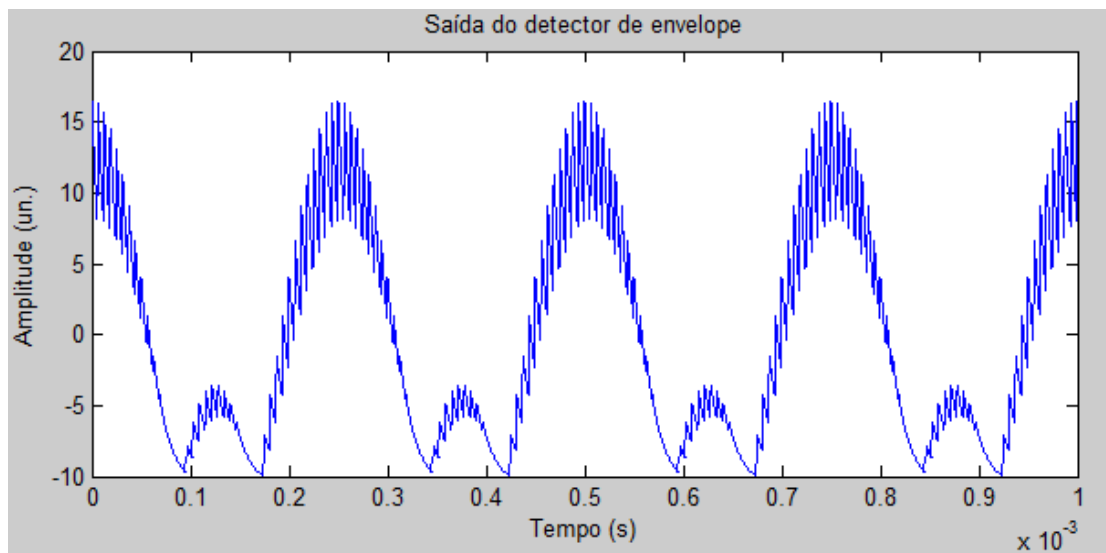


Efeitos da Sobremodulação

Quando o fator modulante é maior que a unidade o fenômeno de sobremodulação ocorre. Nesse caso a envoltória ultrapassa o zero porque em certos momentos a parcela $[1 + K m(t)]$ resulta em sinal negativo. Foi feita uma simulação do circuito com índice de modulação 1,8 para observar os efeitos no domínio tempo e no domínio frequência.



Fica claro que o envelope da onda modulada não representa mais o sinal modulante, porque não apresenta mais o formato cossenoidal. Já no espectro de frequência, percebemos que as bandas laterais somam uma potência maior que a da portadora. Com a portadora “fraca” (comparando com as bandas laterais) o detector de envelope que foi desenvolvido nesse trabalho não conseguirá mais demodular a informação, isso é visto na imagem seguinte.



Observamos que agora o sinal demodulado apresenta uma espécie de *undershoot* porque a retificação acaba incluindo a parte da portadora que ultrapassou o zero. Essa não linearidade deforma o sinal introduzindo distorção harmônica, que pode ser vista no espectro do sinal.

