

**INSTITUTO  
FEDERAL**

Santa Catarina

---

Câmpus  
São José

---

## Relatório 2

Multiplexação

---

**Curso:** Engenharia de Telecomunicações  
**Disciplina:** COM29007 – Sistemas de Comunicação 1  
**Professor:** Mario de Noronha Neto

**Aluno**

João Pedro Menegali Salvan Bitencourt

04 de setembro de 2023

## Sumário

1	Introdução	2
2	Fundamentação teórica	2
3	Gráficos gerados	3
4	Conclusão	20

# 1 Introdução

Nesse documento serão apresentados 2 experimentos realizados na linguagem MATLAB, que demonstram o processo de modulação, demodulação, filtragem e multiplexação.

Para cada experimento, será visualizado o que ocorre no domínio do tempo e da frequência.

## 2 Fundamentação teórica

Um sinal de informação em uma dada frequência pode ter esta deslocada para facilitar a transmissão. Esse processo é chamado de modulação, que consiste em convolucionar o sinal de informação com outro sinal chamado de portadora. Esta, possui uma frequência maior do que a do sinal modulante.

Neste experimento, foi abordado dois tipos de modulação:

- AM DSB: chamado de Modulação em Amplitude com Banda Lateral Dupla (*Amplitude Modulation Double-Side Band*, em inglês), consiste na variação da amplitude da portadora conforme a amplitude do sinal modulante. Nessa modulação, a portadora está presente no sinal modulado, ocupando parte da potência do mesmo. O fator de modulação determina a razão entre a potência do sinal modulado e a potência da portadora. Quanto maior for o fator de modulação, maior será a potência dedicada à portadora e mais informações poderão ser transmitidas já que a amplitude da portadora sofrerá mais variações. Entretanto, pode levar a maior distorção do sinal.
- AM DSB-SC: chamado de Modulação em Amplitude com Banda Lateral Dupla e Portadora Suprimida (*Amplitude Modulation Double-Side Band Suppressed Carrier*, em inglês), assim como a anterior, varia a amplitude da portadora conforme a do sinal modulante. Entretanto, o sinal de portadora não é incluso no sinal modulado, o que economiza potência de transmissão. O processo de demodulação ocorre com um detector de envoltória.

O processo de demodulação envolve convolucionar o sinal modulado com a própria portadora do mesmo. Conforme será visto na próxima seção, essa ação faz com que as componentes frequenciais sejam deslocadas, permitindo o uso de um filtro passa-baixa para a recuperação da informação.

Já o processo de multiplexação envolve a soma de sinais modulados com o objetivo de transmitir através de um canal de comunicação. Um exemplo disso são os sinais de rádio. Quando o aparelho de rádio seleciona uma estação, o mesmo filtra o sinal desejado com o filtro passa-faixa e realiza a demodulação do sinal filtrado. O processo de multiplexação e demultiplexação é mostrado abaixo:

- Multiplexação:
  1. Cada sinal de informação é modulado;
  2. Cada sinal modulado é filtrado com filtro passa-faixa cuja banda passante é a componente de maior frequência;
  3. Os sinais filtrados são somados no tempo.
- Demultiplexação:
  1. O sinal multiplexado passa por filtros passa-faixa que vão separar a componente de cada sinal;
  2. Cada sinal separado é convolucionado com a portadora de cada um, provocando um deslocamento frequencial;
  3. Cada sinal é recuperado através da utilização de um filtro passa-baixa, finalizando, assim, o processo de demodulação.

Com as etapas descritas acima, é possível montar um transmissor, que é responsável por modular e multiplexar o sinal, bem como um receptor, que realiza a demultiplexação e demodulação.

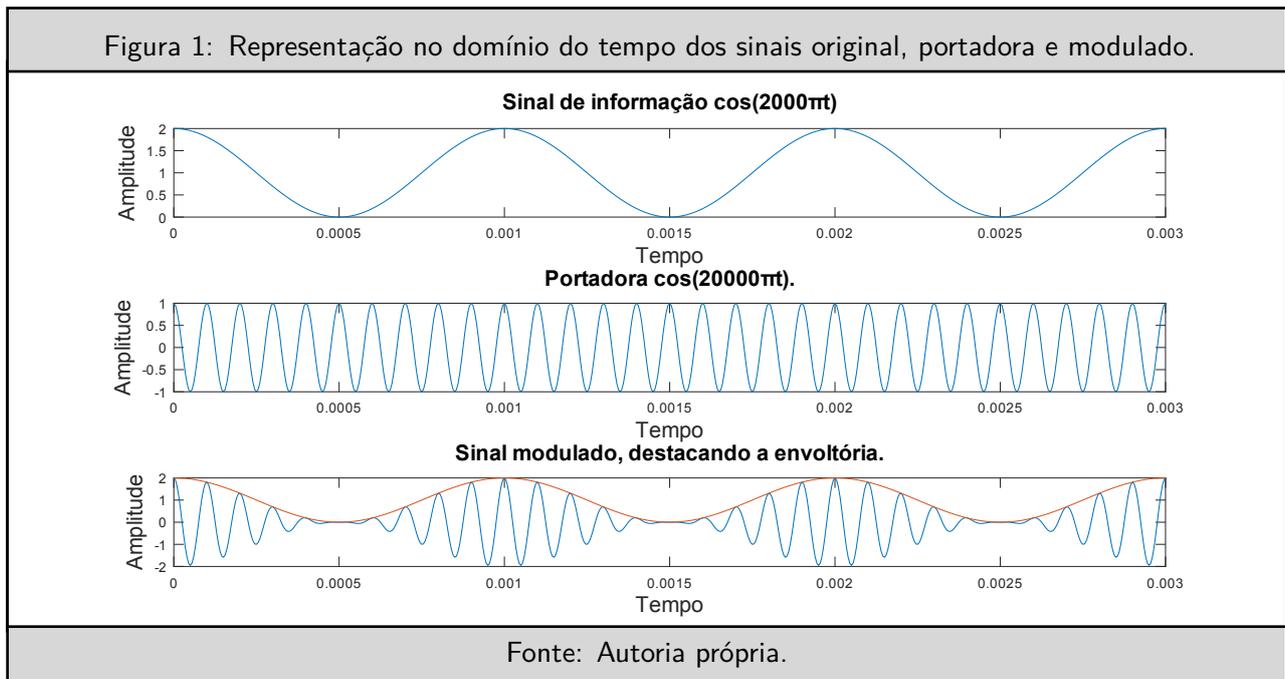
Nos experimentos realizados, são utilizadas as funções do MATLAB *fir1*, responsável pela criação do filtro não ideal, e *filter*, responsável pela aplicação do filtro.

### 3 Gráficos gerados

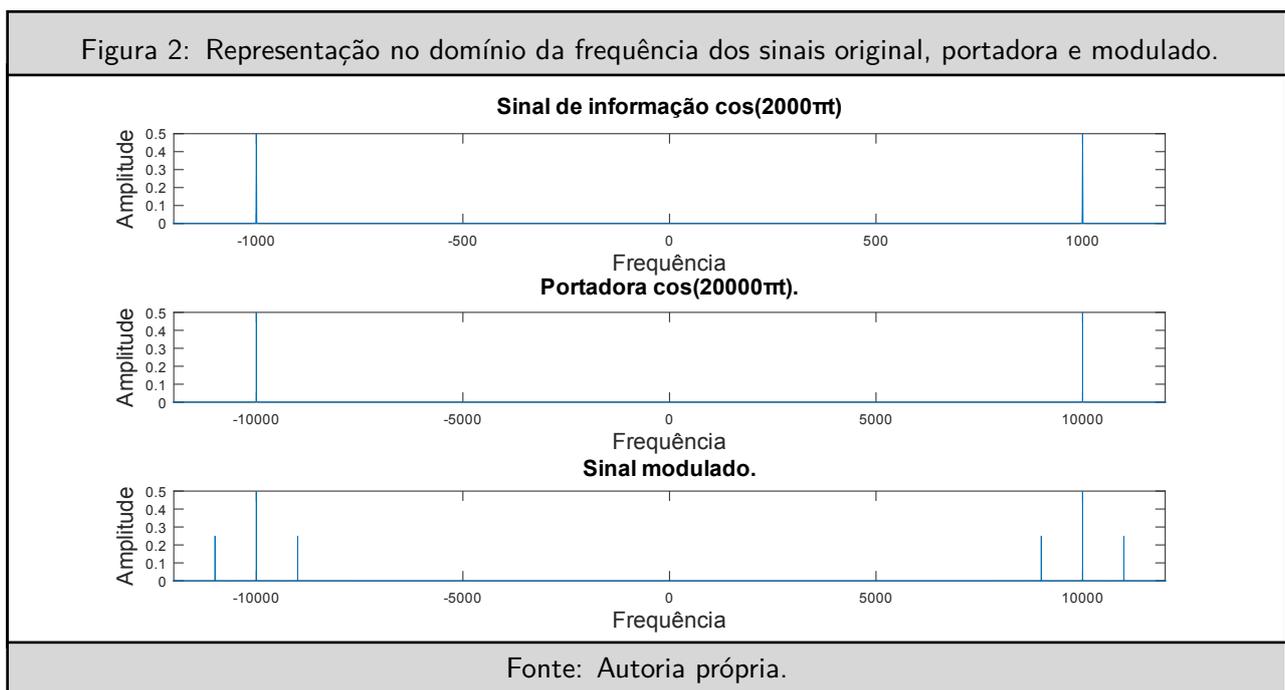
No **primeiro experimento**, foi gerado uma senoide de 1 kHz e uma portadora de 10 kHz:

- $m(t) = \cos(2000\pi t)$ ;
- $c(t) = \cos(20000\pi t)$

O sinal  $m(t)$  é modulado com a portadora  $c(t)$ . Abaixo, é mostrada a comparação entre os sinais gerados:



Na Fig. 1 é possível destacar a envoltória em vermelho, que mostra uma característica da modulação AM. Nesse caso, foi aplicada a modulação AM DSB, cujo sinal modulado contém o sinal de portadora. Na figura a seguir, é mostrado esses três sinais no domínio da frequência:



No terceiro gráfico da Fig. 2, é possível observar a presença da portadora no sinal modulado. Além disso, observando a amplitude da portadora, é possível verificar que esta consome boa parte da potência do sinal. Essa potência pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$Pot_{por} = \left[ \left( \frac{A_m A_c}{4} \right)^2 + \left( \frac{A_m A_c}{2} \right)^2 + \left( \frac{A_m A_c}{4} \right)^2 \right] * 2 = \left[ \left( \frac{1}{4} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \right)^2 + \left( \frac{1}{4} \right)^2 \right] * 2$$

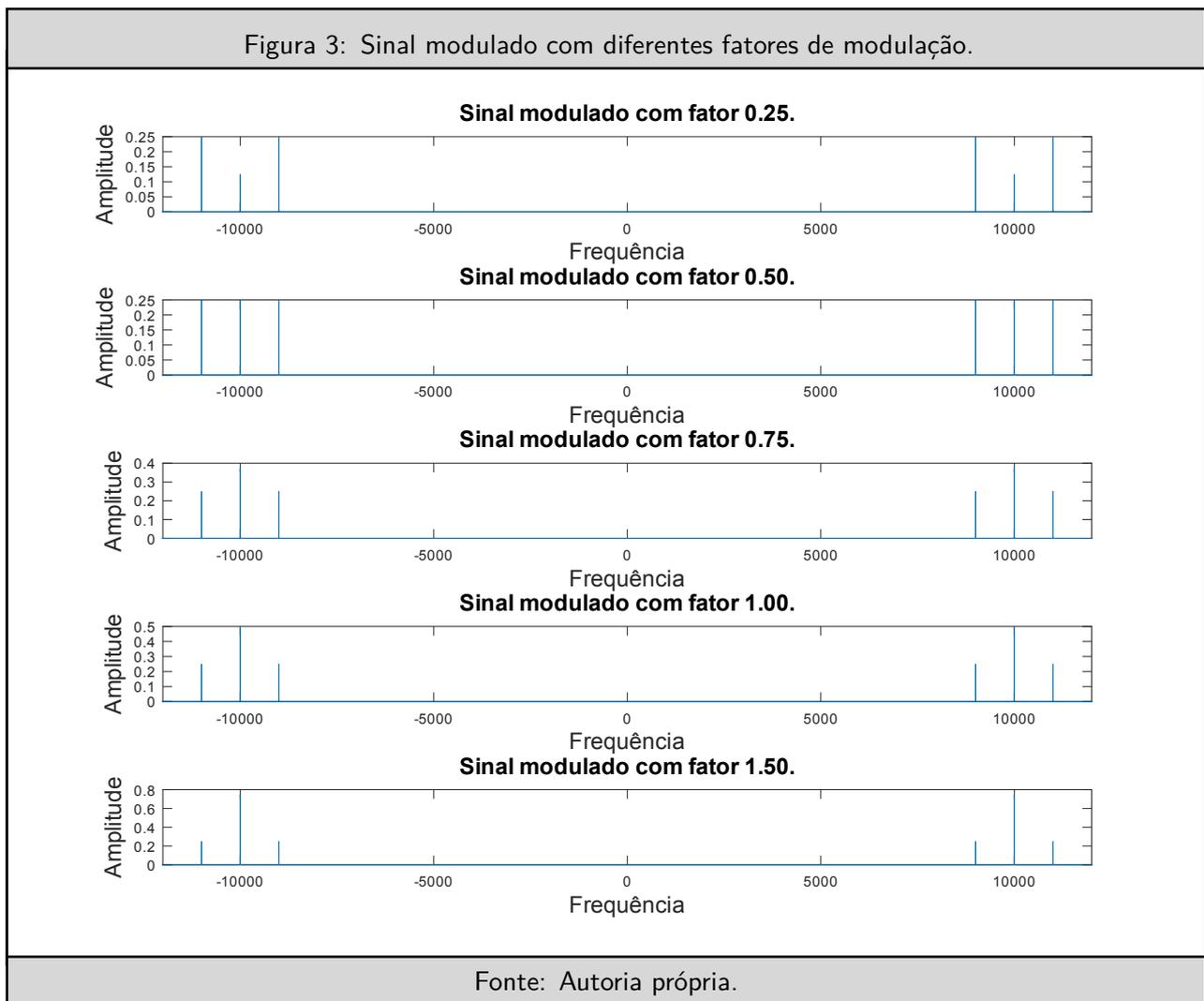
$$Pot_{por} = \left[ \frac{1}{8} + \frac{1}{4} \right] * 2 = 0,75W$$

Pela proporção, o sinal de portadora consome  $\frac{2}{3}$  da potência do sinal transmitido, enquanto que  $\frac{1}{3}$  é consumido pela informação. Isso faz com que a modulação AM DSB gaste mais potência no lado do transmissor.

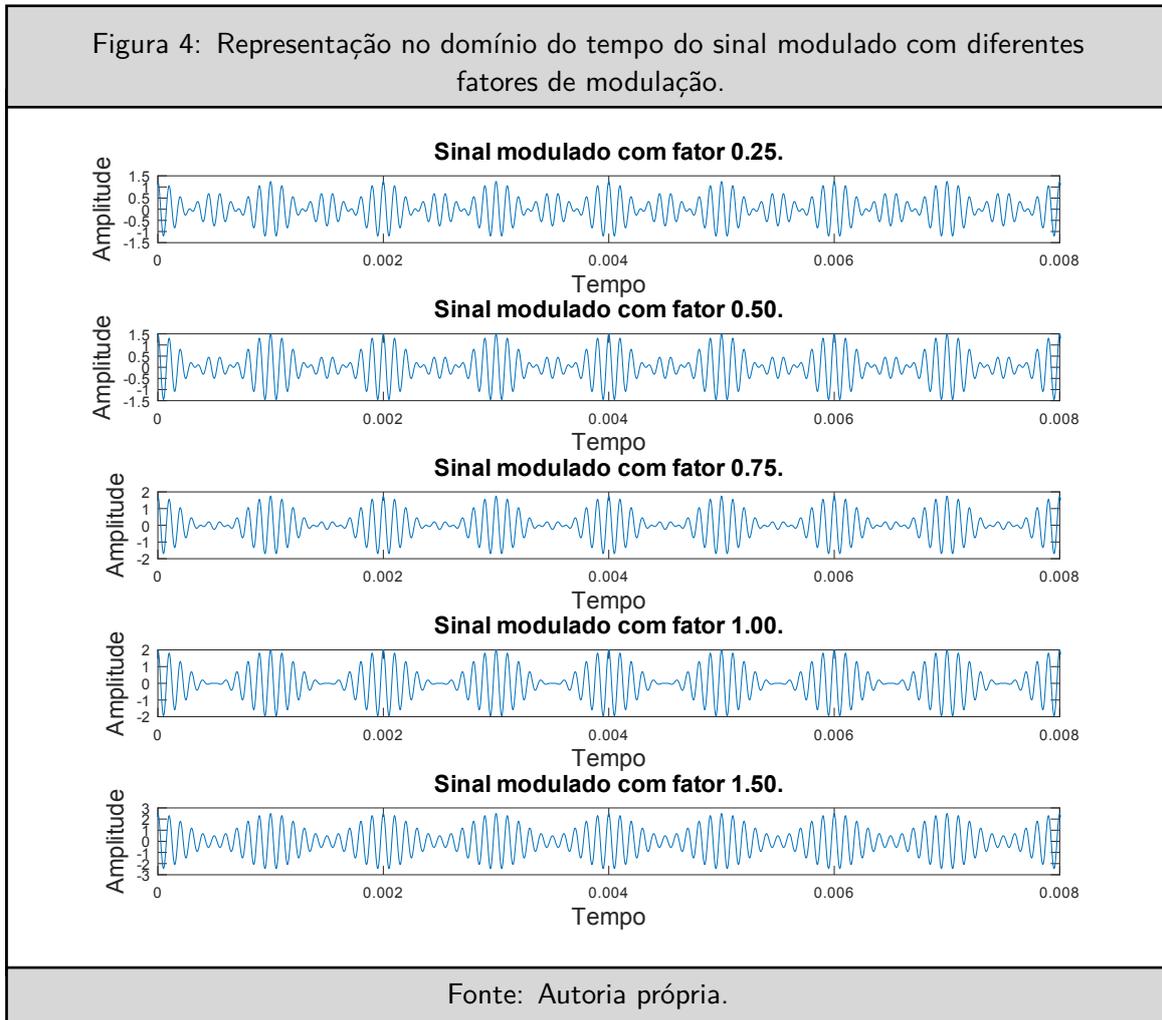
Em seguida, foi avaliado o efeito do fator de modulação, variando o mesmo em cinco valores diferentes:

- 0,25;
- 0,5;
- 0,75;
- 1;
- 1,5;

Abaixo, é mostrado o efeito no domínio da frequência:

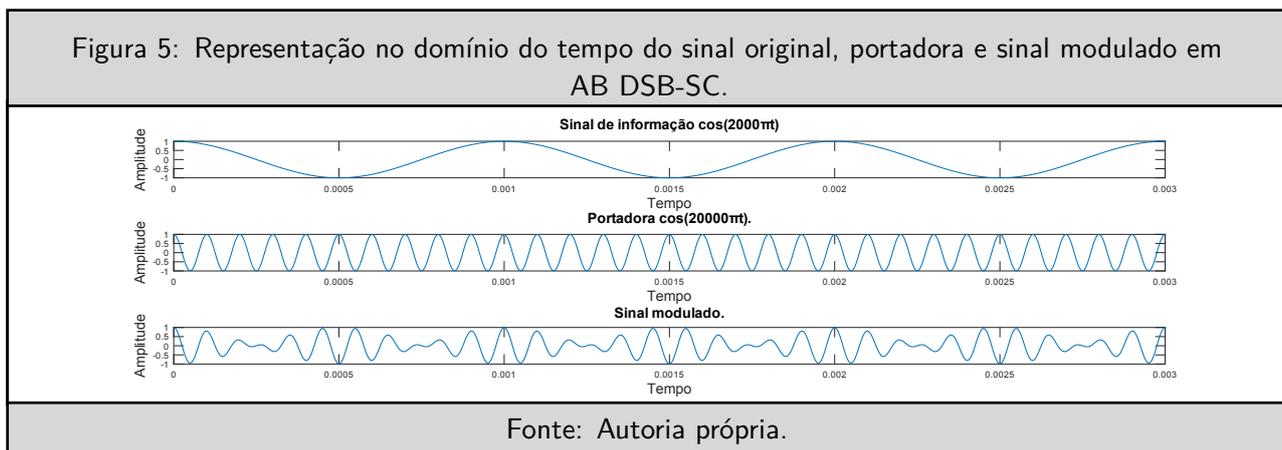


Na Fig. 3 é mostrado que a amplitude da portadora diminui com um fator de modulação menor e aumenta, caso contrário. Em outras palavras, com um fator de modulação menor, a portadora consome menos potência do sinal e o sinal modulado tende a ter o mesmo comportamento do sinal modulado em AM DSB-SC. Abaixo, é mostrado o efeito fator de potência no domínio do tempo.

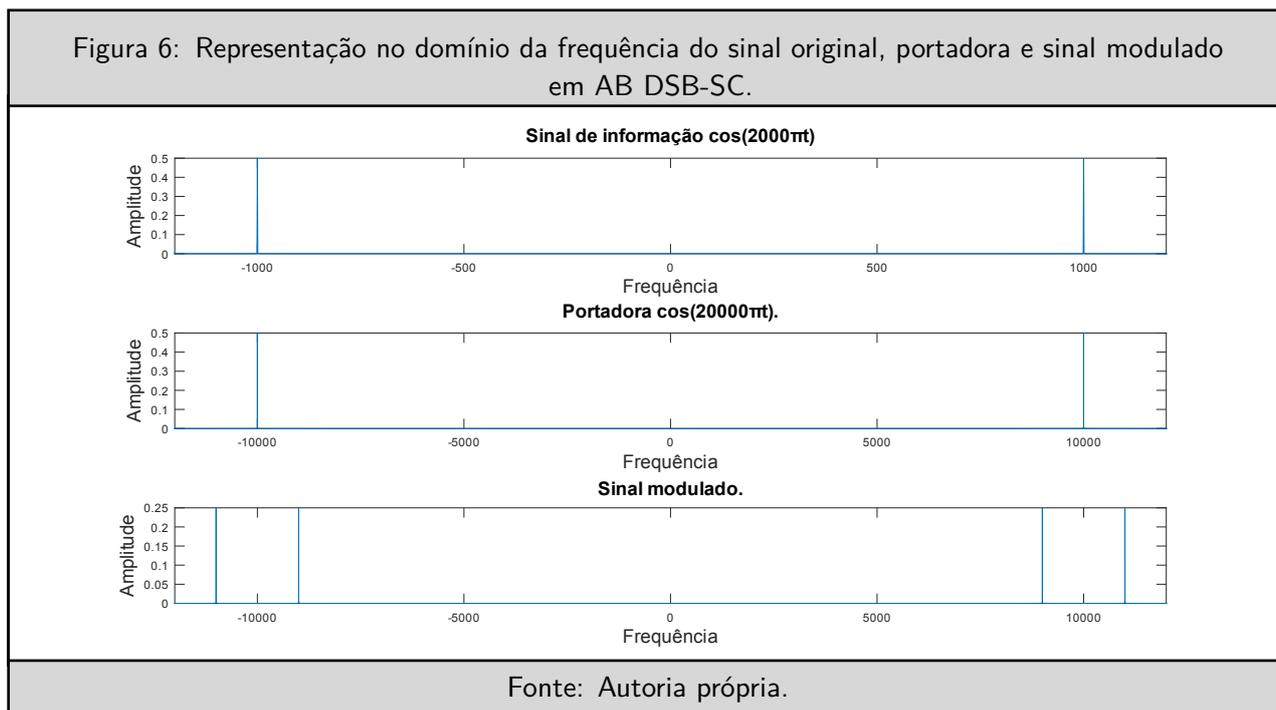


Na Fig. 4, nota-se como fica a representação dos sinais no domínio do tempo, o qual é possível observar distorções quando o fator de modulação é muito baixo ou alto. No caso do fator de modulação de 0,25, é possível observar a presença de componentes de amplitude entre as parábolas originais do sinal. Já no fator de modulação de 1,5, é possível observar que a frequência aparente começa a sofrer alterações, que podem interferir na demodulação com detector de envoltória.

Em outra etapa do experimento, o processo de modulação foi alterado para AM DSB-SC:



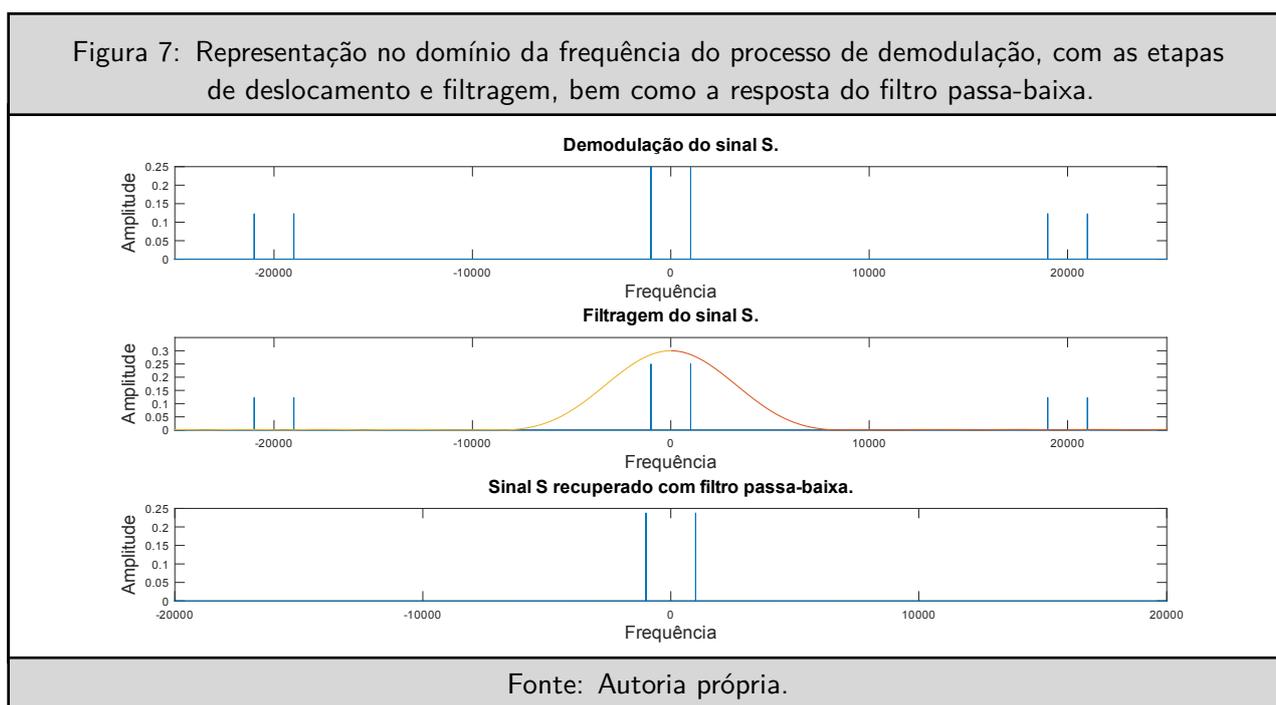
Abaixo, é mostrado o resultado no domínio da frequência:



Na Fig. 6 é possível observar que a componente frequencial da portadora está ausente. Dessa forma, toda a potência do sinal modulado é ocupada pelas componentes correspondentes do sinal original. O sinal de 1 kHz modulado gera componentes em 9 e 11 kHz.

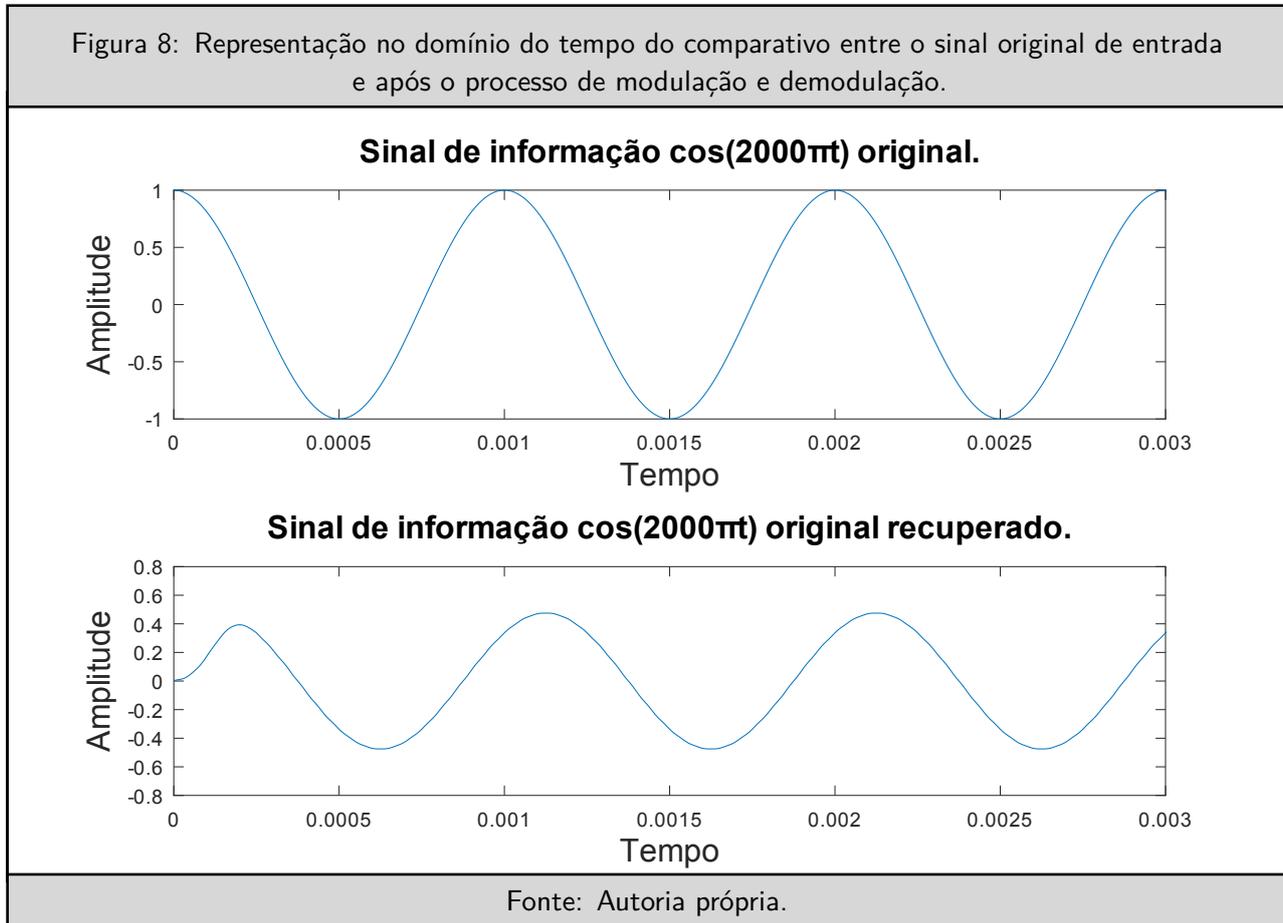
Em ambas as modulações AM mostradas, estão presentes tanto a banda lateral superior (USB – *Upper Side Band*), que contém as componentes de frequência positivas, quanto a banda lateral inferior (LSB – *Lower Side Band*), que contém as componentes de frequência negativas.

Na próxima etapa dessa segunda parte do experimento, foi realizado o processo de demodulação. Este consiste em convolucionar o sinal modulado com sua portadora. Isso faz com que as componentes de frequência sejam deslocadas de volta para as frequências originais do sinal. Entretanto, pela natureza do processo de modulação, ainda há a presença de outras componentes frequenciais harmônicas. A recuperação do sinal é realizada através de um filtro passa-baixa:



No primeiro gráfico da Fig. 7, é mostrado o efeito da convolução do sinal modulado com sua portadora. Já no segundo gráfico, é mostrado o quais componentes de frequência estão na banda passante do filtro passa-baixa. Nesse caso, o filtro não ideal possui ordem 50 e frequência de corte de 1,5 kHz, o que já foi suficiente para recuperar apenas as frequências do sinal desejado. Em traçado vermelho, é possível observar a resposta em frequência do filtro passa-baixa. Por padrão, a amplitude do filtro é 1, porém, para melhor demonstração visual, esta foi ajustada para ficar representado próximo à amplitude do sinal original.

Abaixo, é mostrado o comparativo entre o sinal de entrada e o sinal de saída do sistema:



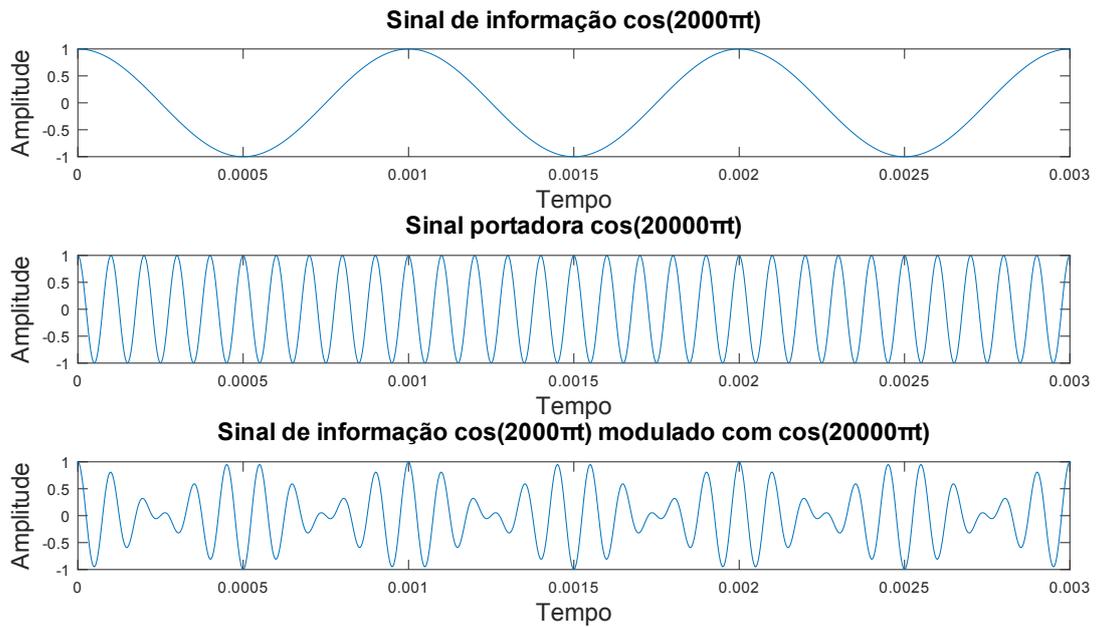
No segundo gráfico da Fig. 8, nota-se que há um pequeno desvio no formato da onda recuperada. Isso deve-se pela natureza do filtro utilizado. Nota-se ainda que amplitude foi reduzida pela metade em relação ao sinal original.

No **segundo experimento**, foi realizado o processo de multiplexação e demultiplexação. Inicialmente, foram gerados três sinais e cada um foi modulado com uma portadora diferente de forma que assumissem frequências fundamentais diferentes:

- Sinal de informação  $m_1(t)$  de 1 kHz  $\cos(2000\pi t)$  modulado com portadora de 10 kHz  $\cos(20000\pi t)$ ;
- Sinal de informação  $m_2(t)$  de 2 kHz  $\cos(4000\pi t)$  modulado com portadora de 12 kHz  $\cos(24000\pi t)$ ;
- Sinal de informação  $m_3(t)$  de 3 kHz  $\cos(6000\pi t)$  modulado com portadora de 14 kHz  $\cos(28000\pi t)$ .

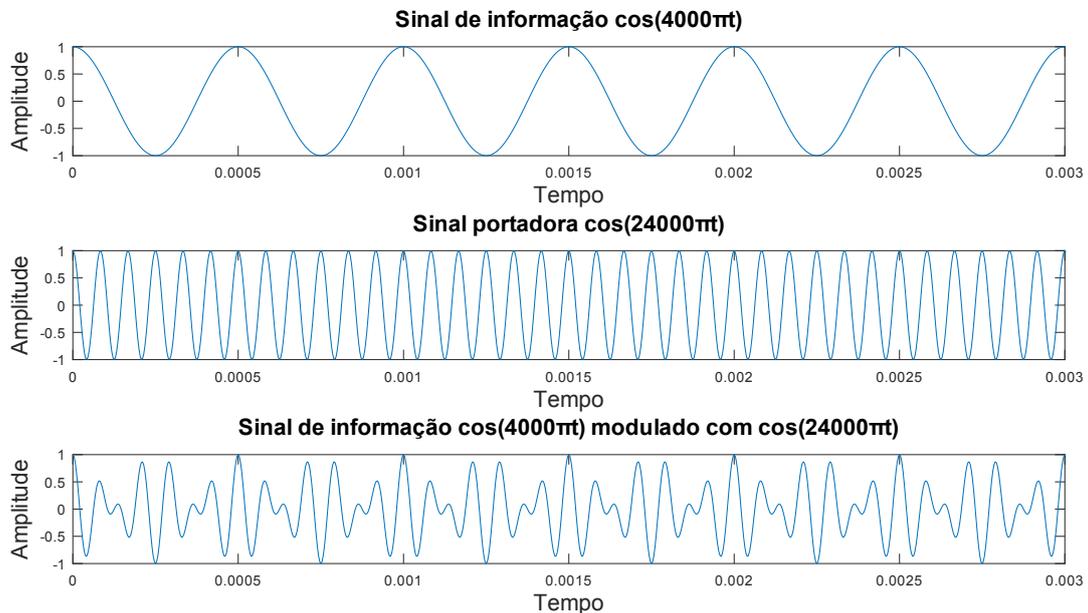
Abaixo, são mostradas três figuras, no domínio do tempo, com os sinais  $m_1(t)$ ,  $m_2(t)$  e  $m_3(t)$  originais, bem como suas portadoras e o sinal modulado:

Figura 9: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(2000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.



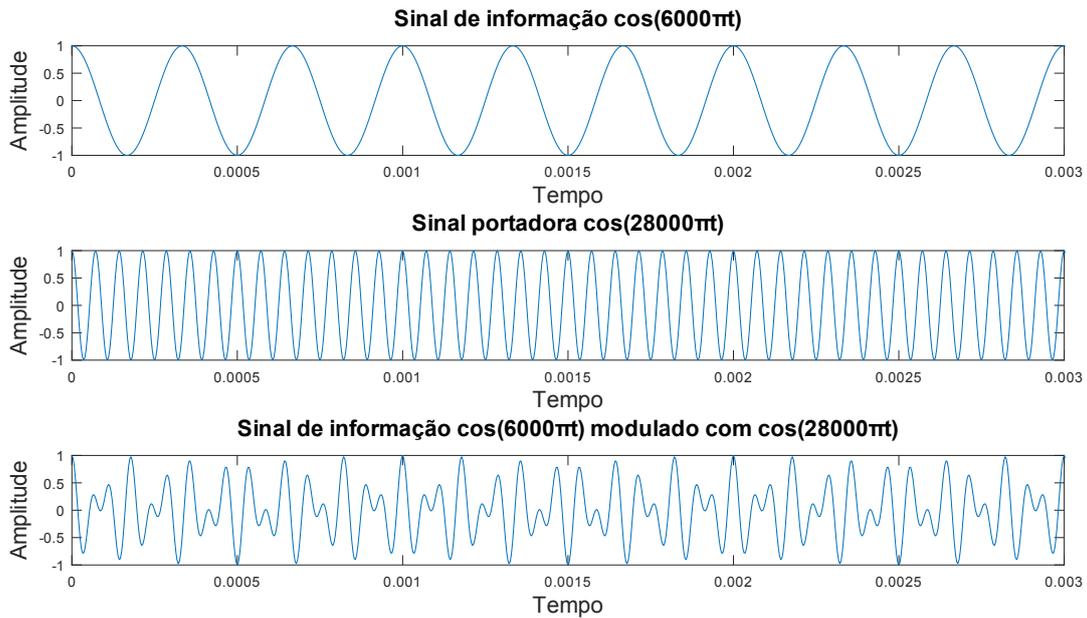
Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(4000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.



Fonte: Autoria própria.

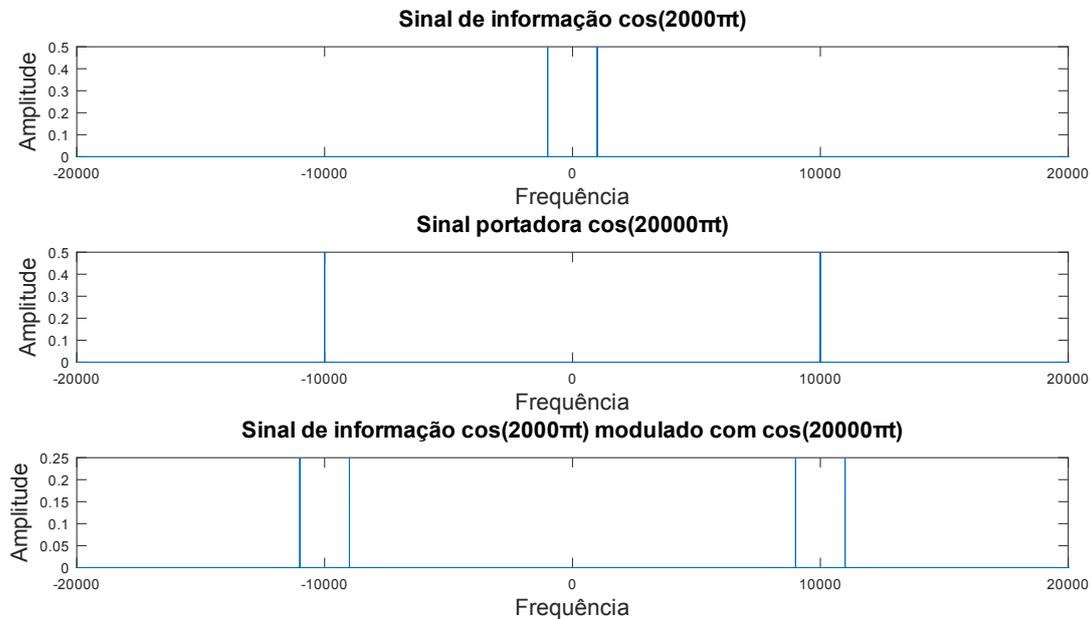
Figura 11: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(6000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.



Fonte: Autoria própria.

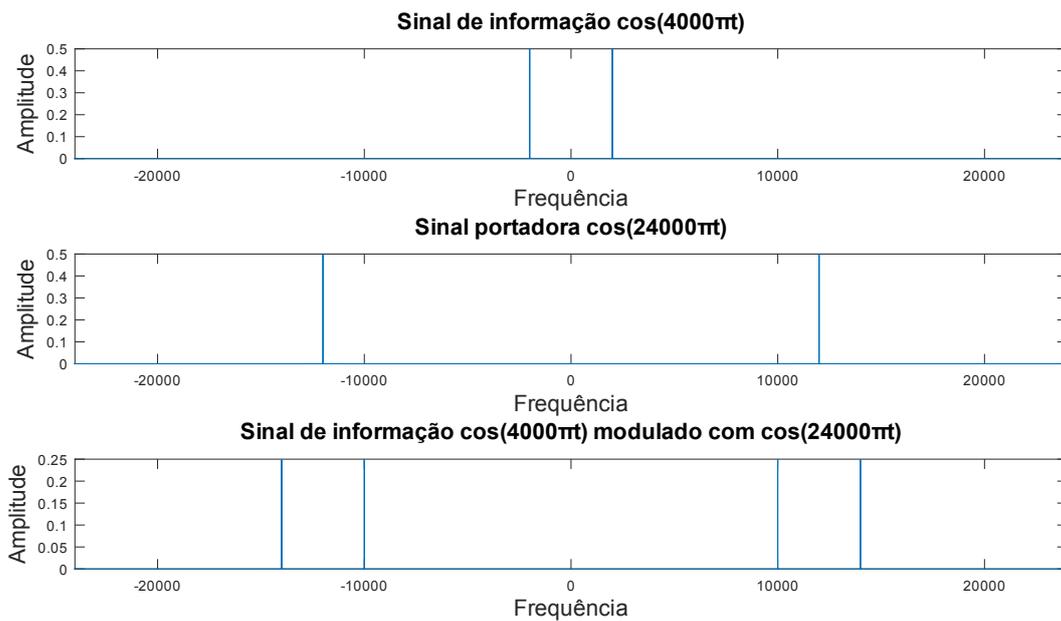
Já a representação no domínio da frequência dos sinais  $m_1(t)$ ,  $m_2(t)$  e  $m_3(t)$  originais, sua portadora e o sinal modulado é mostrada nas três imagens a seguir:

Figura 12: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(2000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.



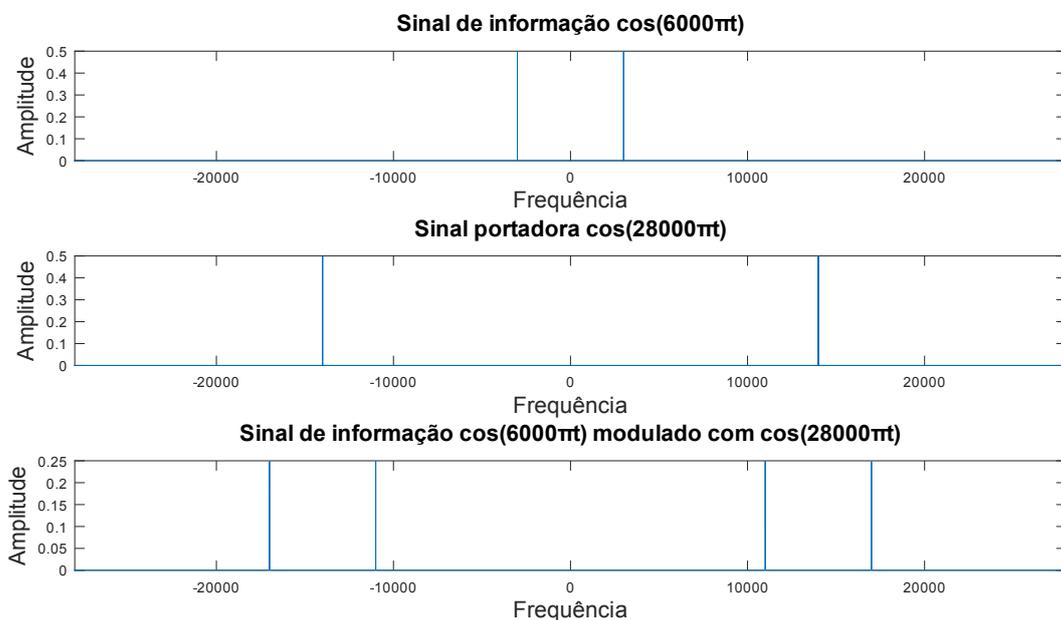
Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(4000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(6000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal resultante da modulação.

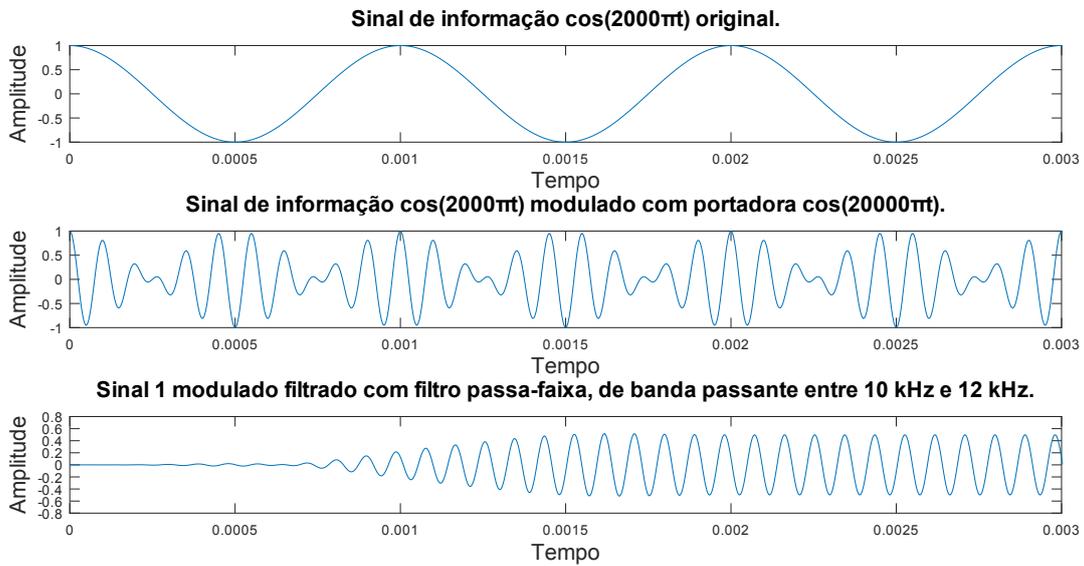


Fonte: Autoria própria.

Na próxima etapa do segundo experimento, os sinais modulados foram filtrados com um filtro passa-faixa, que removeu uma das componentes de frequência de cada sinal, com o objetivo de economia de banda no momento da multiplexação.

A figura a seguir mostra o resultado no domínio do tempo dessa filtragem no sinal  $\cos(2000\pi t)$ :

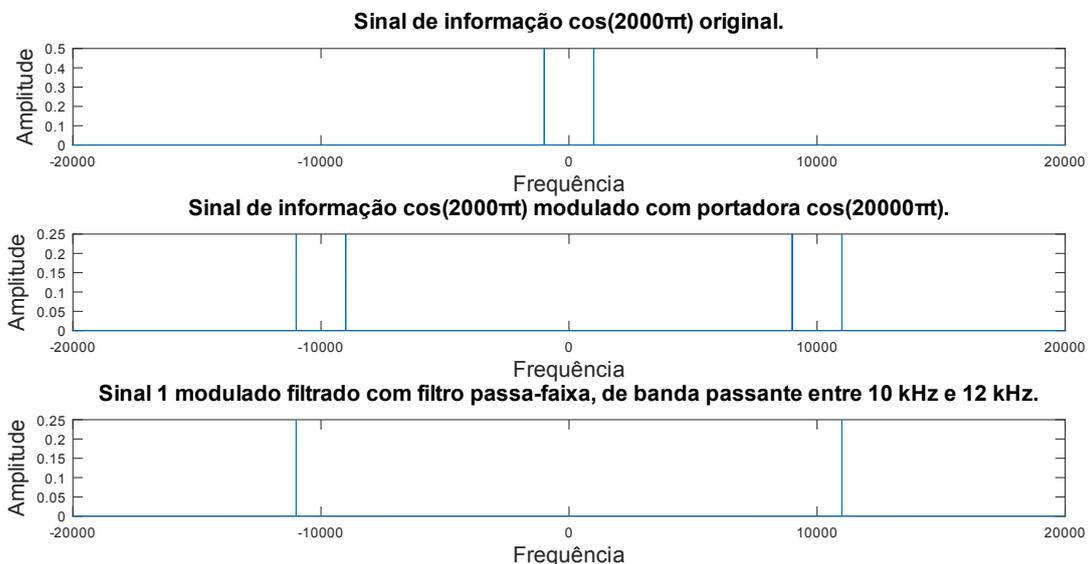
Figura 15: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(2000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 10 kHz e 12 kHz.



Fonte: Autoria própria.

Já a próxima figura mostra o mesmo processo, porém no domínio da frequência:

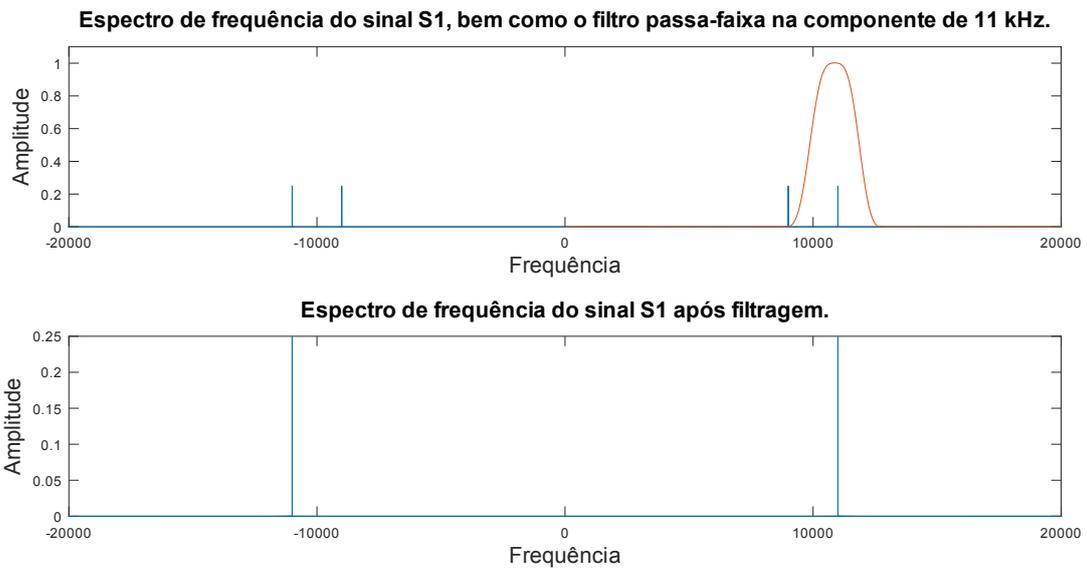
Figura 16: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(2000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 10 kHz e 12 kHz.



Fonte: Autoria própria.

No terceiro gráfico da Fig. 16, é possível observar a filtragem de uma das componentes do sinal. Nesse caso, apenas a componente de 11 kHz foi preservada.

Figura 17: Representação no domínio da frequência da filtragem passa-faixa do sinal  $\cos(2000\pi t)$  modulado, bem como do resultado após a filtragem.

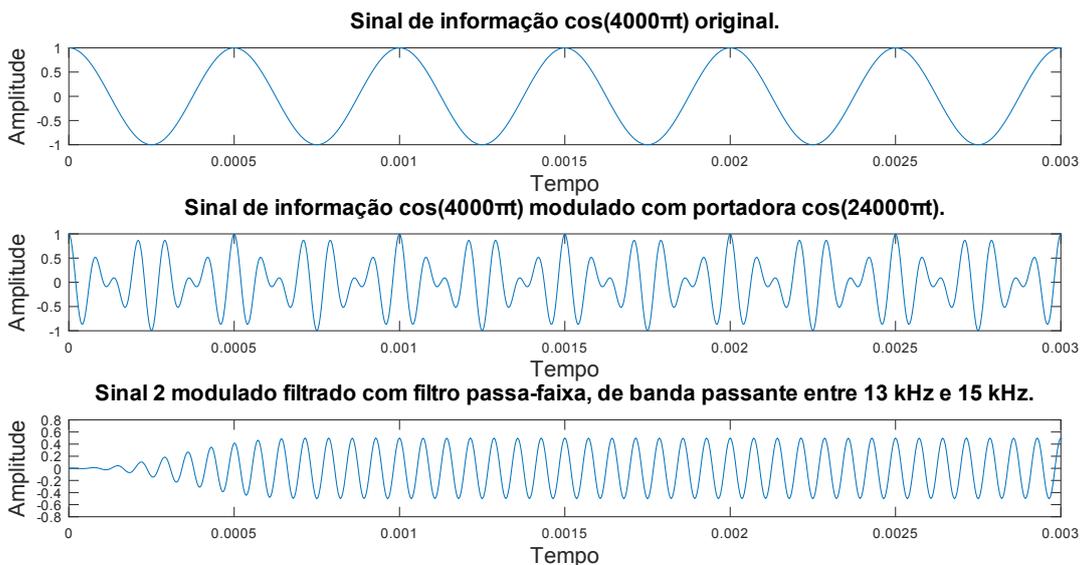


Fonte: Autoria própria.

No primeiro gráfico da Fig. 17, é possível visualizar a resposta em frequência do filtro utilizado. Para esse experimento, a ordem do filtro foi de 500 e a banda passante foi entre 10 kHz e 12 kHz, que deixou passar apenas a componente frequencial de 11 kHz.

Na sequência, a figura a seguir mostra o resultado no domínio do tempo dessa filtragem no sinal  $\cos(4000\pi t)$ :

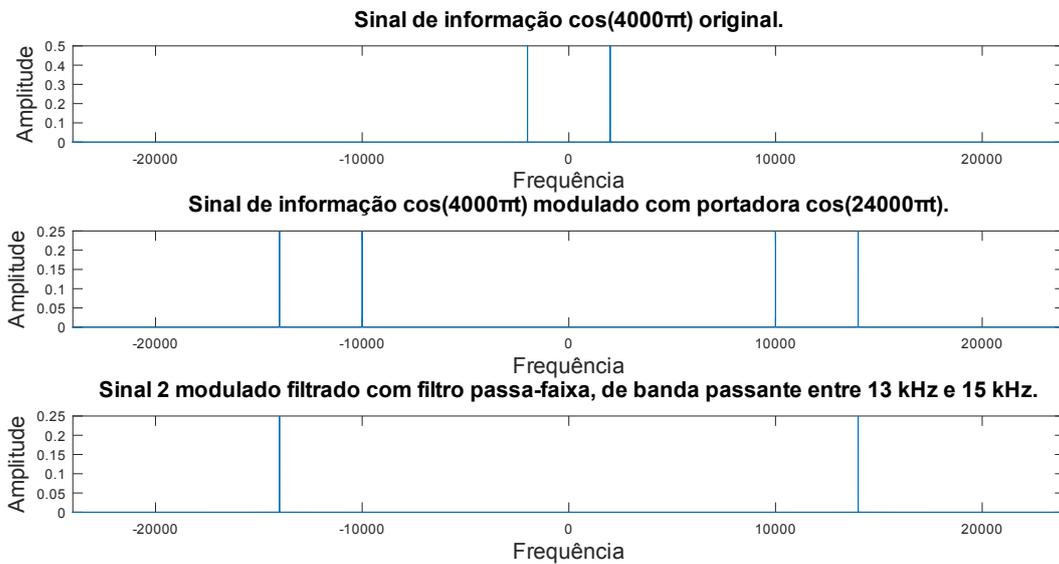
Figura 18: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(4000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 13 kHz e 15 kHz.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico abaixo mostra o mesmo processo, porém no domínio da frequência:

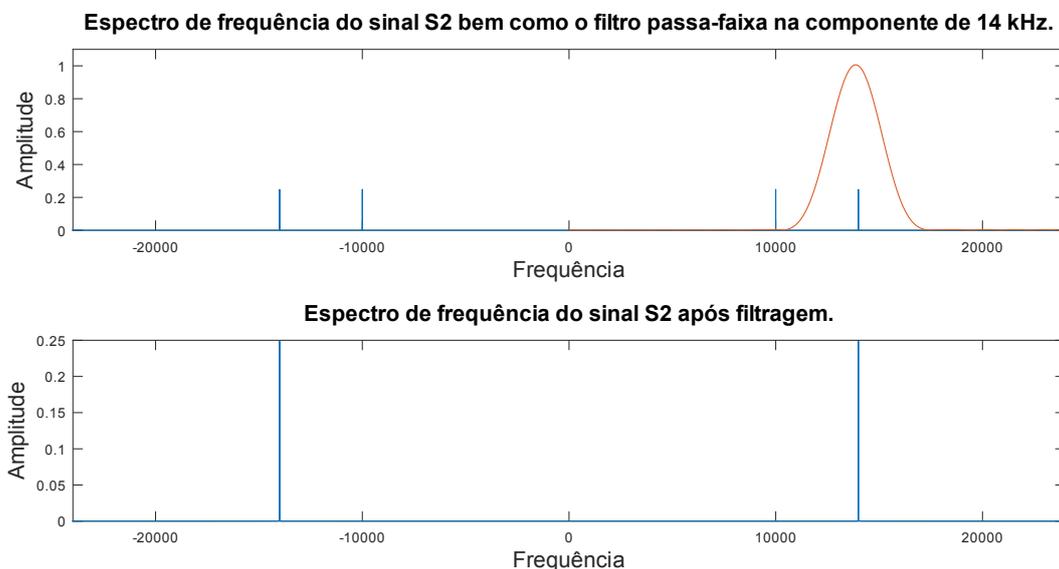
Figura 19: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(4000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 13 kHz e 15 kHz.



Fonte: Autoria própria.

No terceiro gráfico da Fig. 19, é possível observar a filtragem de uma das componentes do sinal. Nesse caso, apenas a componente de 14 kHz foi preservada.

Figura 20: Representação no domínio da frequência da filtragem passa-faixa do sinal  $\cos(4000\pi t)$  modulado, bem como do resultado após a filtragem.

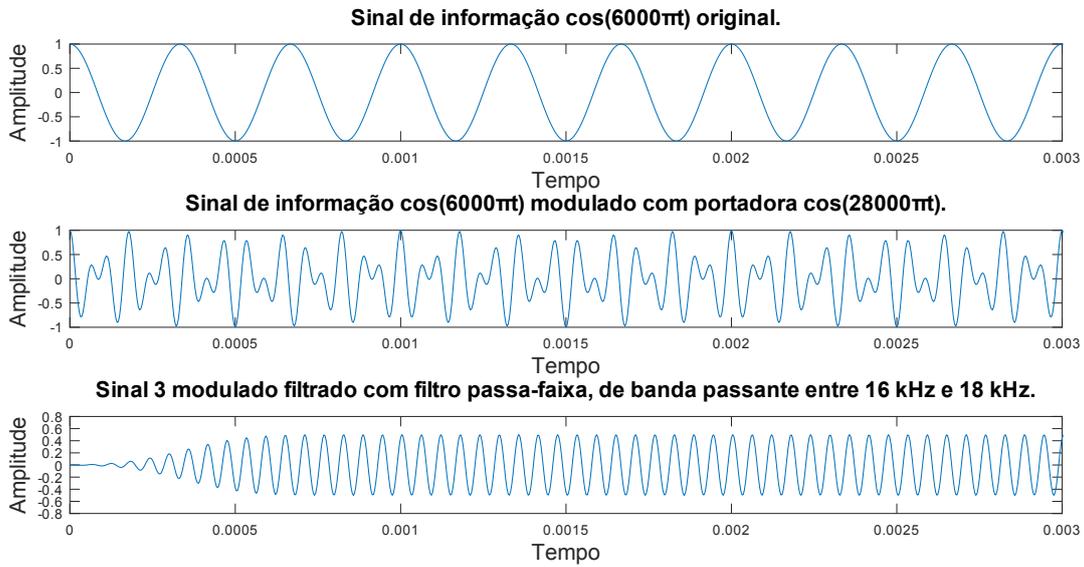


Fonte: Autoria própria.

No primeiro gráfico da Fig. 20, é possível visualizar a resposta em frequência do filtro utilizado. Para esse experimento, a ordem do filtro foi de 400 e a banda passante foi entre 13 kHz e 15 kHz, que deixou passar apenas a componente frequencial de 14 kHz.

Por fim, a próxima figura mostra o resultado no domínio do tempo dessa filtragem no sinal  $\cos(4000\pi t)$ :

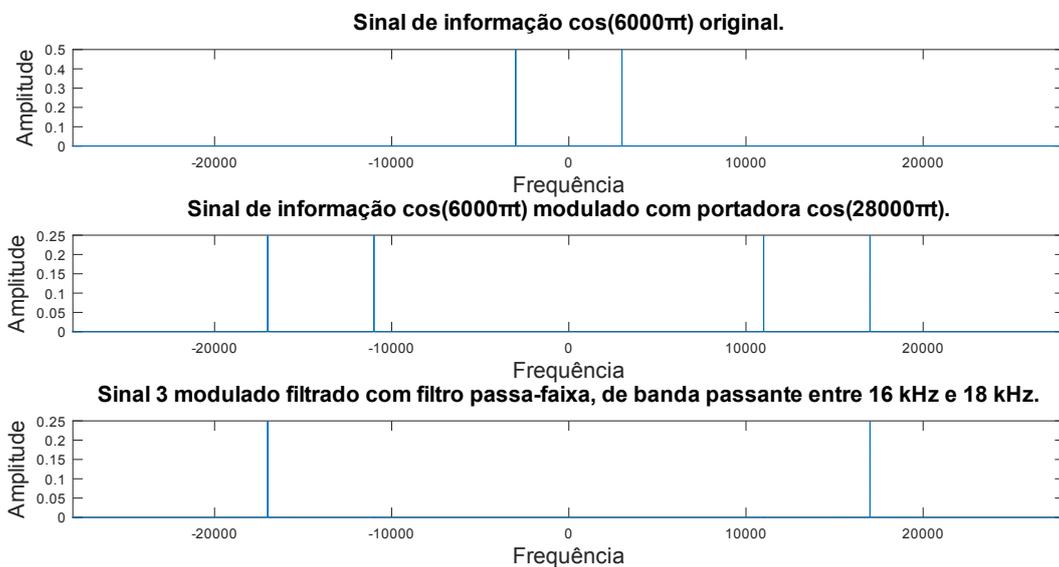
Figura 21: Representação no domínio do tempo do sinal  $\cos(6000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 16 kHz e 18 kHz.



Fonte: Autoria própria.

Já a próxima figura mostra o mesmo processo, porém no domínio da frequência:

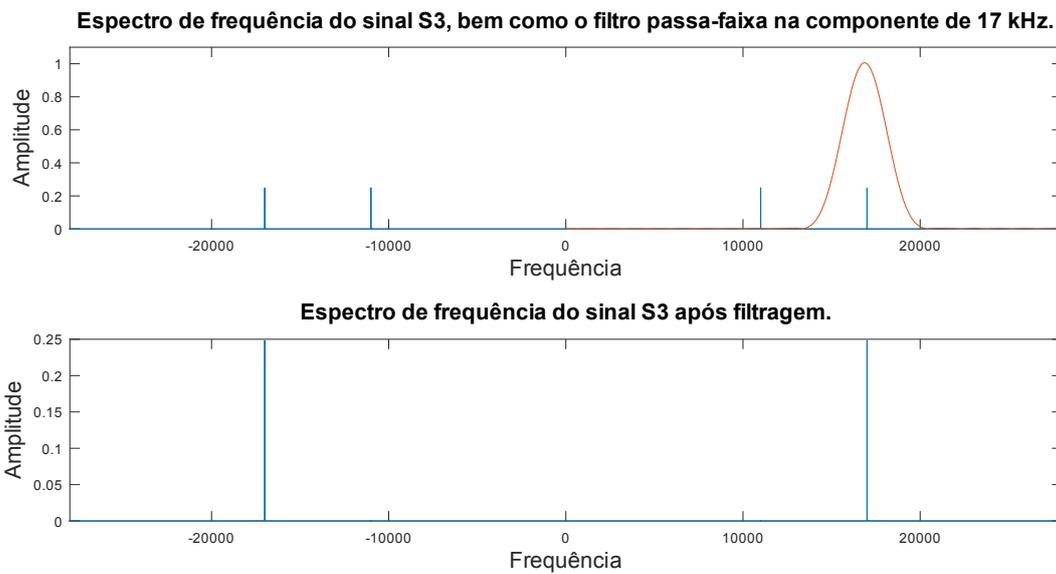
Figura 22: Representação no domínio da frequência do sinal  $\cos(6000\pi t)$  original, sua portadora e o sinal modulado após passar pela filtragem passa-faixa, com banda de passagem entre 16 kHz e 18 kHz.



Fonte: Autoria própria.

No terceiro gráfico da Fig. 22, é possível observar a filtragem de uma das componentes do sinal. Nesse caso, apenas a componente de 17 kHz foi preservada.

Figura 23: Representação no domínio da frequência da filtragem passa-faixa do sinal  $\cos(6000\pi t)$  modulado, bem como do resultado após a filtragem.

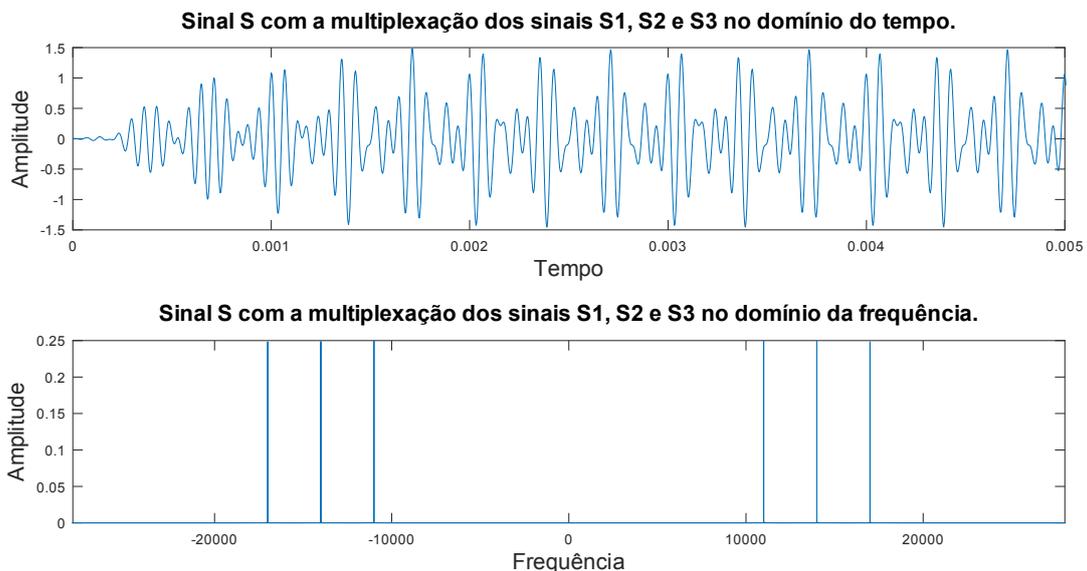


Fonte: Autoria própria.

No primeiro gráfico da Fig. 23, é possível visualizar a resposta em frequência do filtro utilizado. Para esse experimento, a ordem do filtro foi de 400 e a banda passante foi entre 16 kHz e 18 kHz, que deixou passar apenas a componente frequencial de 17 kHz.

Após todos essas filtragens, os três sinais foram multiplexados, compondo apenas um único sinal, conforme mostra a figura a seguir:

Figura 24: Representação do sinal multiplexado nos domínios do tempo e da frequência.

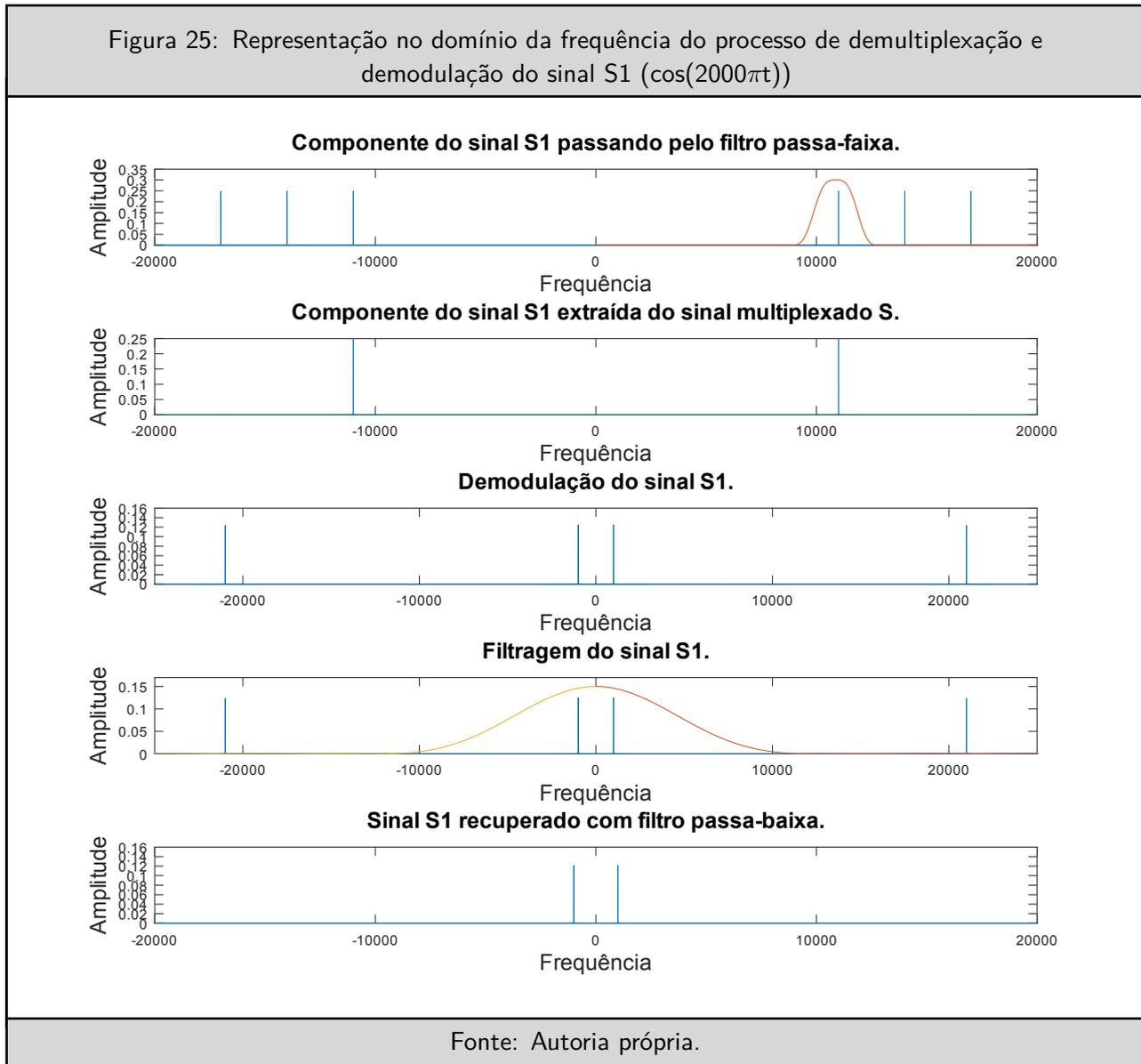


Fonte: Autoria própria.

No segundo gráfico da Fig. 24 é possível observar as três componentes frequenciais que foram preservadas dos sinais anteriores. Dessa forma, esse sinal S multiplexado possui as componentes de 11 kHz, 14 kHz e 17 kHz.

Nesta próxima etapa, esse sinal multiplexado sofreu o processo inverso, ou seja, foi demultiplexado. Essa etapa ocorre no receptor. Recebido o sinal, inicialmente, é preciso extrair cada uma das componentes de

frequência, que neste caso são as frequências de 11 kHz, 14 kHz e 17 kHz discutidas anteriormente. No primeiro gráfico da Fig. 25 a seguir, é mostrado o filtro passa-faixa, de banda passante entre 10 kHz e 12 kHz, filtrando o sinal multiplexado e extraíndo apenas a componente de 11 kHz.



Para melhor representação visual, a amplitude da resposta em frequência do filtro passa-faixa, mostrada no primeiro gráfico da Fig. 25, foi reduzida. A amplitude original tem valor 1 e não altera a amplitude da componente de frequência extraída.

Já no segundo gráfico da Fig. 25, é mostrada que a apenas a componente de interesse foi extraída.

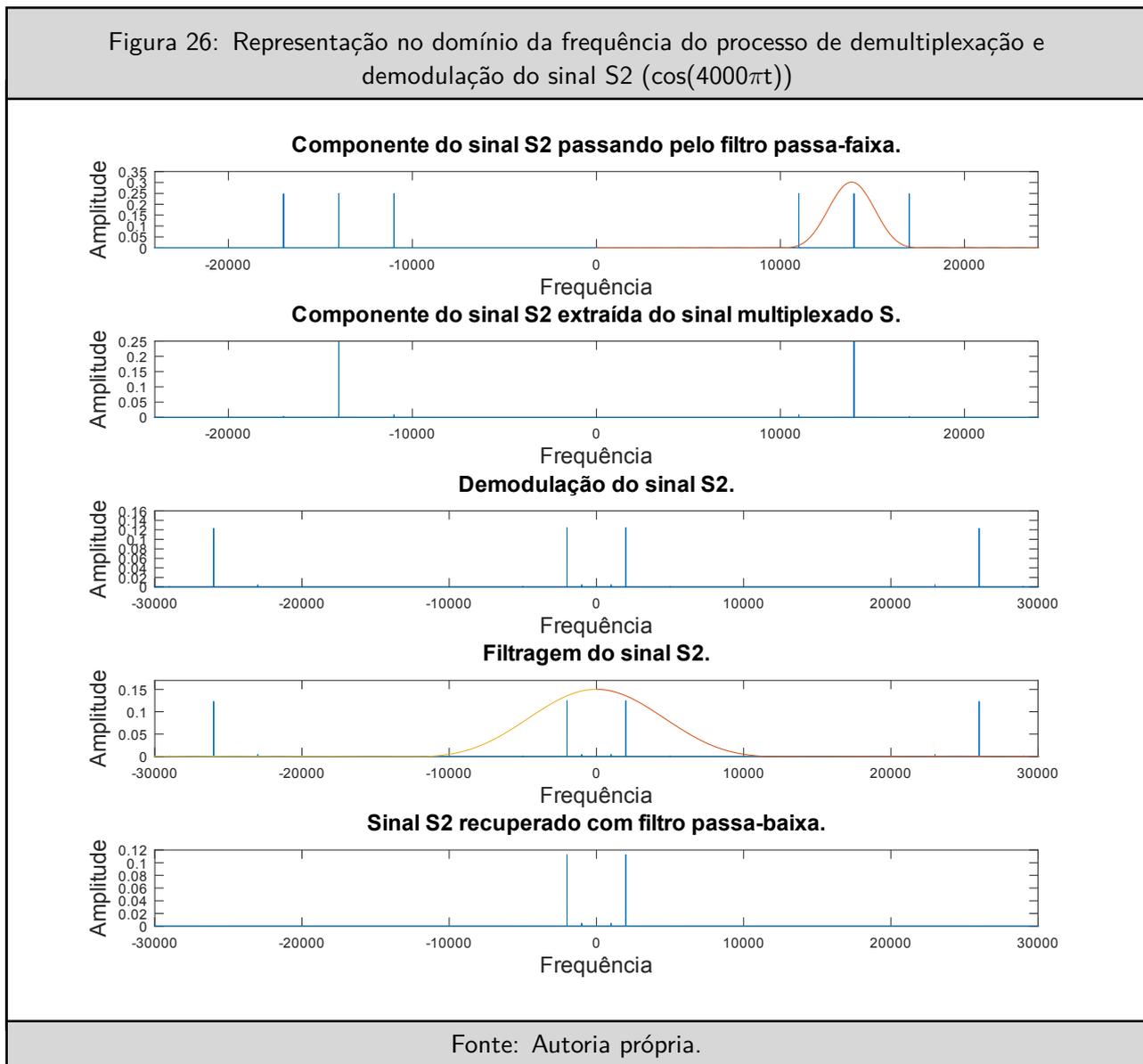
No terceiro gráfico dessa mesma figura, observa-se o resultado do processo de demodulação, o qual a portadora  $\cos(20000\pi t)$  foi convolucionada com o sinal modulado, causando o deslocamento das frequências e preparando o sinal para a filtragem passa-baixa, mostrada no quarto gráfico.

Assim como no primeiro gráfico da Fig. 25, a amplitude da resposta em frequência do filtro passa-baixa foi reduzida apenas para melhor representação visual, ou seja, tal amplitude encontra-se com valor menor que 1 apenas na representação visual. O filtro passa-baixa não ideal possui frequência de corte de 1,5 kHz e ordem 50.

No quinto gráfico da Fig. 25, é possível observar o sinal recuperado, possuindo as componentes de 1 kHz.

Para recuperar o sinal  $\cos(4000\pi t)$ , foi realizado o mesmo processo do sinal anterior.

No primeiro gráfico da Fig. 26 a seguir, é mostrado o filtro passa-faixa, de banda passante entre 13 kHz e 15 kHz, filtrando o sinal multiplexado e extraíndo apenas a componente de 14 kHz.



Assim como realizado na Fig. 25, para melhor representação visual, a amplitude da resposta em frequência do filtro passa-faixa, mostrada no primeiro gráfico da Fig. 26, foi reduzida. A amplitude original tem valor 1 e não altera a amplitude da componente de frequência extraída.

Já no segundo gráfico da Fig. 26, é mostrada que a apenas a componente de interesse foi extraída.

No terceiro gráfico dessa mesma figura, observa-se o resultado do processo de demodulação, o qual a portadora  $\cos(24000\pi t)$  foi convolucionada com o sinal modulado, causando o deslocamento das frequências e preparando o sinal para a filtragem passa-baixa, mostrada no quarto gráfico.

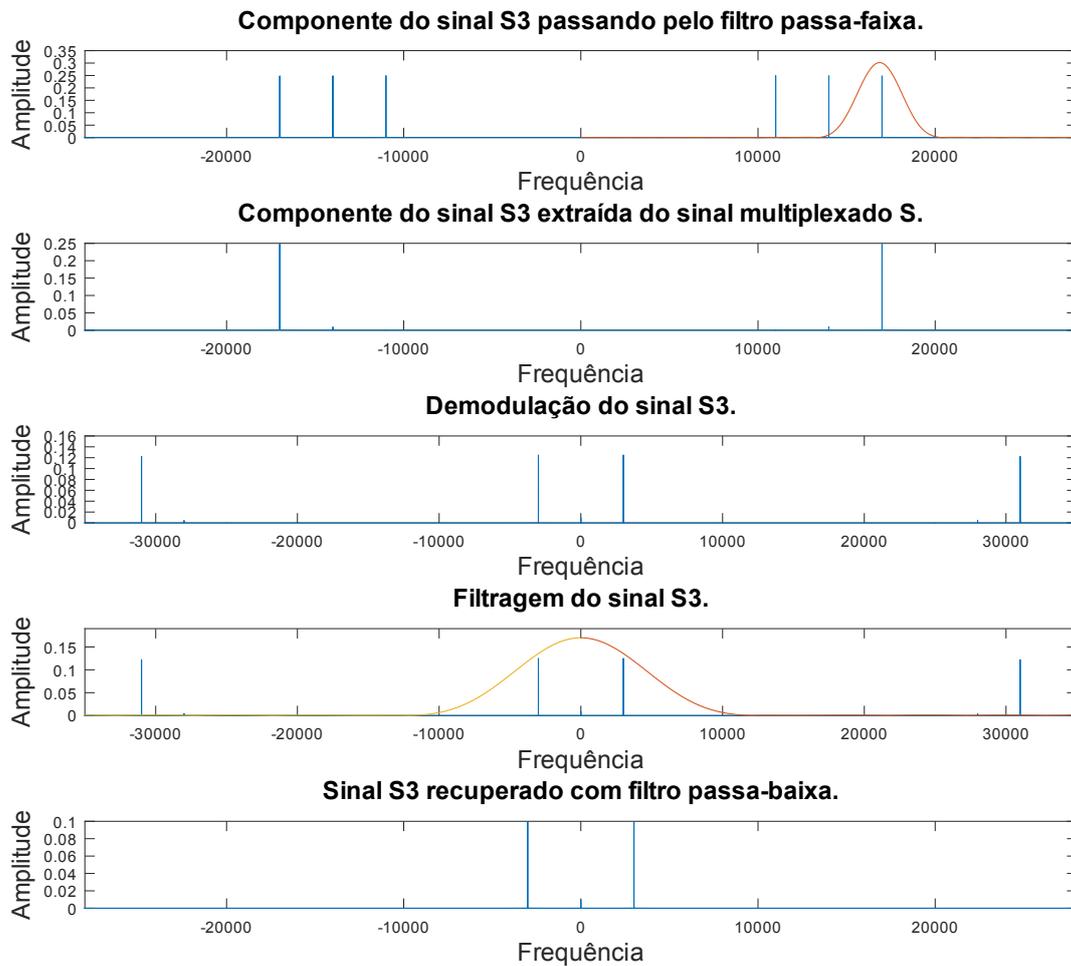
Assim como no quarto gráfico da Fig. 25, a amplitude da resposta em frequência do filtro passa-baixa foi reduzida apenas para melhor representação visual, ou seja, tal amplitude encontra-se com valor menor que 1 apenas na representação visual. O filtro passa-baixa não ideal possui frequência de corte de 2,5 kHz e ordem 50.

No quinto gráfico da Fig. 26, é possível observar o sinal recuperado, possuindo as componentes de 2 kHz.

Por fim, o mesmo processo foi repetido na recuperação do sinal  $\cos(6000\pi t)$ .

No primeiro gráfico da Fig. 26 a seguir, é mostrado o filtro passa-faixa, de banda passante entre 13 kHz e 15 kHz, filtrando o sinal multiplexado e extraíndo apenas a componente de 14 kHz.

Figura 27: Representação no domínio da frequência do processo de demultiplexação e demodulação do sinal S3 ( $\cos(6000\pi t)$ )



Fonte: Autoria própria.

Novamente, para melhor representação visual, a amplitude da resposta em frequência do filtro passa-faixa, mostrada no primeiro gráfico da Fig. 27, foi reduzida. A amplitude original tem valor 1 e não altera a amplitude da componente de frequência extraída.

Já no segundo gráfico da Fig. 27, é mostrada que a apenas a componente de 17 kHz foi extraída.

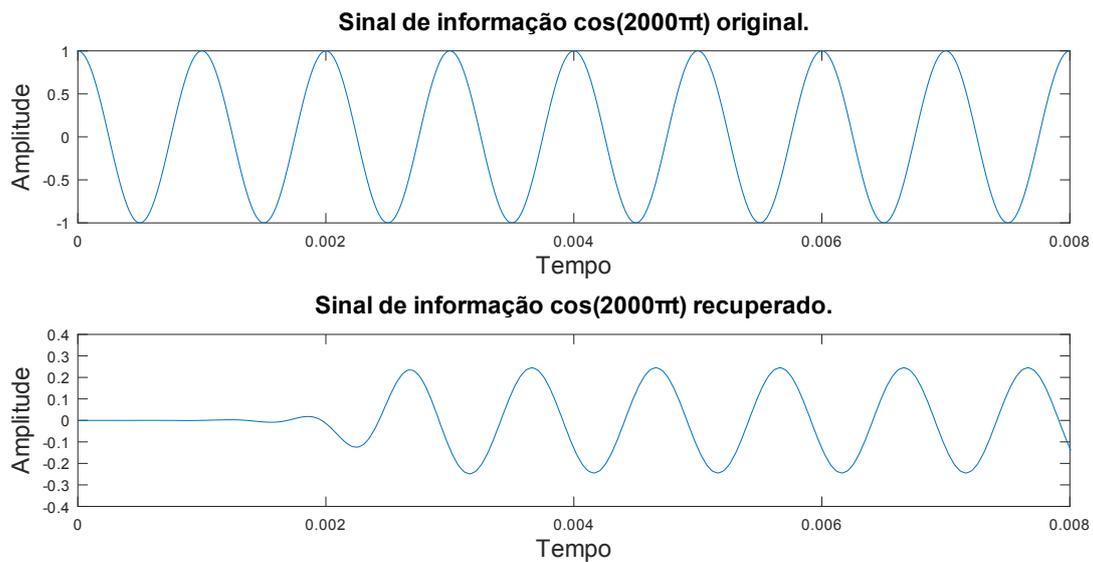
No terceiro gráfico dessa mesma figura, observa-se o resultado do processo de demodulação, o qual a portadora  $\cos(28000\pi t)$  foi convolucionada com o sinal modulado, causando o deslocamento das frequências e preparando o sinal para a filtragem passa-baixa, mostrada no quarto gráfico.

Assim como no quarto gráfico da Fig. 26, o filtro passa-baixa passou pelos mesmos ajustes de representação gráfica. O filtro passa-baixa não ideal possui frequência de corte de 3,5 kHz e ordem 50.

No quinto gráfico da Fig. 27, é possível observar o sinal recuperado, possuindo as componentes de 3 kHz.

Para finalizar, após todo esse processo de multiplexação e demultiplexação, é possível comparar os sinais de entrada e saída no domínio do tempo. Abaixo, é mostrado o comparativo referente ao sinal  $\cos(2000\pi t)$ :

Figura 28: Representação no domínio do tempo do sinal ( $\cos(2000\pi t)$ ) antes e depois de passar pelo processo de multiplexação e demultiplexação.

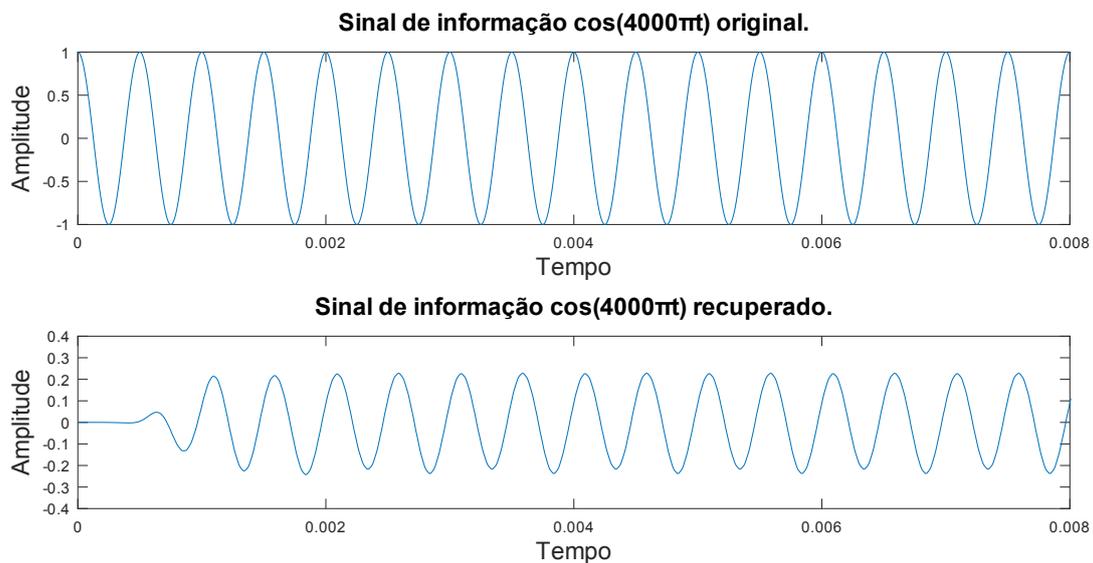


Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 28, é possível notar o atraso gerado por todo o processo de multiplexação e demultiplexação. Nas comparativos seguintes, será possível analisar a diferença no tempo de atraso conforme a frequência de cada sinal. Nesse primeiro caso, é possível observar um atraso próximo a 0,002 segundos.

Na próxima figura, há o comparativo do sinal  $\cos(4000\pi t)$  antes e depois de passar pelo sistema:

Figura 29: Representação no domínio do tempo do sinal ( $\cos(4000\pi t)$ ) antes e depois de passar pelo processo de multiplexação e demultiplexação.

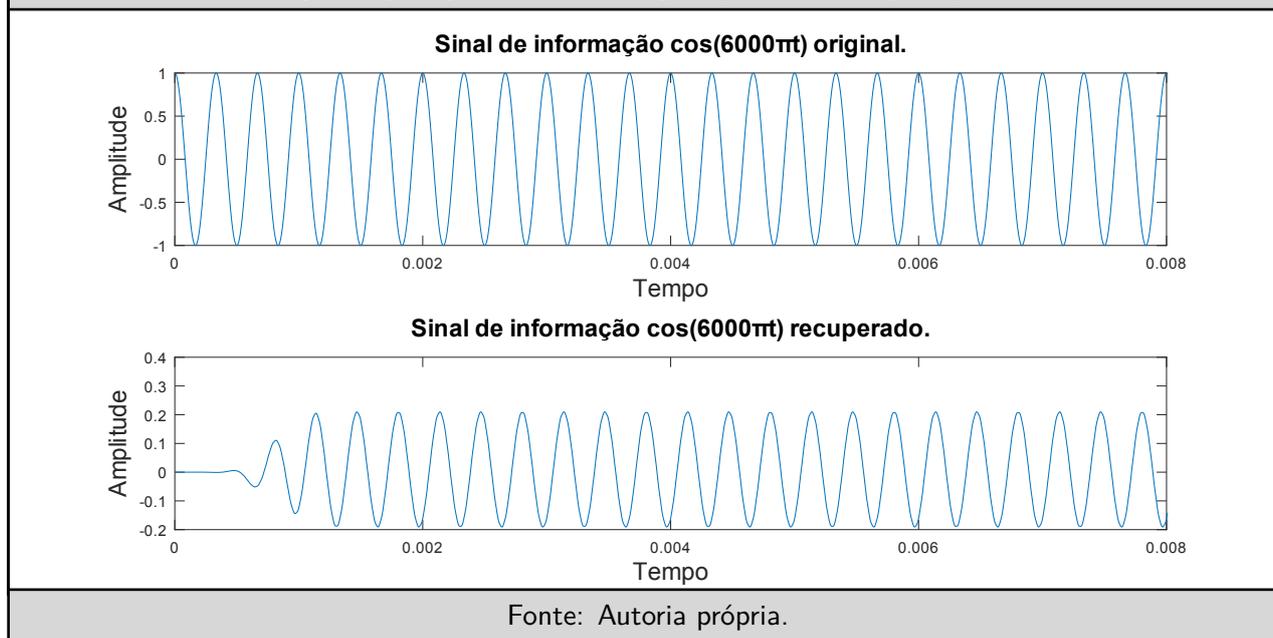


Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 29, é possível notar que o atraso do sinal  $\cos(4000\pi t)$  diminuiu em relação ao sinal  $\cos(2000\pi t)$ . Nesse segundo caso, é possível observar um atraso próximo a 0,001 segundos, ou seja, quase metade do verificado no sinal de 1 kHz.

Por fim, o comparação entre o sinal  $\cos(6000\pi t)$  original e após processado no sistema:

Figura 30: Representação no domínio do tempo do sinal ( $\cos(6000\pi t)$ ) antes e depois de passar pelo processo de multiplexação e demultiplexação.



Na Fig. 30, é possível notar que o atraso do sinal  $\cos(6000\pi t)$  reduziu em relação ao do sinal  $\cos(4000\pi t)$ . Nesse terceiro caso, é possível observar um atraso próximo a 0,0005 segundos, ou seja, metade do que foi verificado no sinal anterior de 2 kHz.

Isso ocorre porque o atraso é inversamente proporcional à frequência, ou seja, quanto maior for a frequência do sinal, menor será o atraso. Este é observado em decorrência do próprio processamento envolvido no processo de multiplexação e demultiplexação.

## 4 Conclusão

No primeiro experimento realizado foi possível compreender melhor os processos de modulação AM DSB e AM DSB-SC, de forma que aquela possui o sinal da portadora junto ao sinal modulado, gastando mais potência na transmissão. Entretanto, a presença da portadora pode ser benéfica pois permite que uma quantidade maior de informação seja transmitida. Ou item que foi observado, é o fator de modulação que permite ajustar a relação de potência da portadora para com o sinal, o qual quanto maior for o fator de modulação, maior será a potência da portadora e mais informações poderão ser transmitidas, porém, maior será a distorção do sinal e, por consequência, maiores os erros na demodulação.

Ainda no primeiro experimento, foi observado o processo de demodulação, que consistiu em convolucionar o sinal modulado com sua portadora de forma que seja possível utilizar um filtro passa-baixa para recuperar as componentes do sinal. Também foi observada a atuação que ocorre durante o processo de modulação e demodulação.

No segundo experimento, foi possível compreender o processo de multiplexação e demultiplexação. O primeiro permite que diferentes sinais modulados sejam combinados para que possam ser transmitidos por um canal de comunicação único. Foi realizada a multiplexação por divisão de frequência, a qual cada sinal é modulado com uma portadora diferente. Antes dos sinais serem multiplexados, para economizar banda, realiza a filtragem de uma das componentes frequenciais do sinal. Após esse passo, os sinais são somados no tempo.

Na parte da demultiplexação, ocorre o processo contrário. Primeiramente, a componente de cada sinal é extraída com a utilização de um filtro passa-faixa. Em seguida, demodulada. Esse mesmo processo pode ser observado nos aparelhos de rádio, por exemplo. No caso, o canal de comunicação comum dos sinais é o ar.

Por fim, foi observado o atraso dos sinais após o processo e chegou-se a conclusão de que frequências mais altas geram menor atraso, e isso pode ser um fator importante em algumas aplicações.