

## Trabalho 1: Projeto de um sistema de comunicação em amplitude modulada

**Aluno:** Vitor Eduardo Schuh  
**Número de matrícula:** 19100591

Data: 09/09/2021

### 1 Introdução

O advento do processo de modulação é, até os dias atuais, um dos maiores feitos da teoria de sistemas de comunicação. Modular um sinal significa modificar uma ou mais características de uma portadora de acordo com as características de uma mensagem visando a sua posterior transmissão.

Este trabalho consiste no projeto de um sistema de comunicação em amplitude modulada, isto é, um sistema onde um conjunto de mensagens  $m_n(t)$  é inserido na entrada, modulado em amplitude, transmitido através de um canal de comunicação hipotético compartilhado, demodulado em amplitude e recuperado na saída com fidelidade às características originais das mensagens no domínio tempo e no domínio frequência.

Para que os requisitos do trabalho fossem atingidos foi utilizada a técnica de modulação AM DSB-SC (*double-sideband suppressed carrier*). A técnica foi escolhida pela sua eficiência em termos de potência, uma vez que o termo *suppressed carrier* se refere ao fato de que a onda portadora não é enviada junto com a mensagem durante a transmissão. Esta decisão de projeto implicou em uma estratégia de demodulação mais robusta, visto que é necessária uma osciladora local para retirar a portadora da mensagem no processo de demodulação AM DSB-SC.

### 2 Discussão

O ponto de partida do projeto foi a instância das mensagens, isto é, os sinais modulantes que carregam as informações. Neste trabalho as mensagens  $m_1(t)$ ,  $m_2(t)$  e  $m_3(t)$ , seguem as relações:

$$\begin{aligned}m_1(t) &= 2 + A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t) + A_3 \cos(\omega_3 t) + A_4 \cos(\omega_4 t) + A_5 \cos(\omega_5 t) + A_6 \cos(\omega_6 t) + \\ &\quad A_7 \cos(\omega_7 t) + A_8 \cos(\omega_8 t) \\ m_2(t) &= 6 + A_8 \cos(\omega_1 t) + A_7 \cos(\omega_2 t) + A_6 \cos(\omega_3 t) + A_5 \cos(\omega_4 t) + A_4 \cos(\omega_5 t) + A_3 \cos(\omega_6 t) + \\ &\quad A_2 \cos(\omega_7 t) + A_1 \cos(\omega_8 t) \\ m_3(t) &= 3 + \cos(\omega_1 t) + 4 \cos(\omega_2 t) + 9 \cos(\omega_3 t) + 6 \cos(\omega_4 t) + 3 \cos(\omega_5 t) + 5 \cos(\omega_6 t) + \\ &\quad \cos(\omega_7 t) + 5 \cos(\omega_8 t)\end{aligned}$$

cujos coeficientes  $A_n$  e frequências  $\omega_n$  são dados pelas tabelas 1 e 2.

Parâmetro	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$	$\omega_8$
Valor [rad/s]	$600\pi$	$900\pi$	$1500\pi$	$2400\pi$	$3200\pi$	$4200\pi$	$5400\pi$	$6800\pi$

Tabela 1: Frequências angulares dos cossenos das mensagens.

Parâmetro	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$
Matrícula	1	9	1	0	0	5	9	1

Tabela 2: Coeficientes dos cossenos das mensagens.

Substituindo os coeficientes e as frequências angulares das tabelas nas equações das mensagens, obtemos:

$$\begin{aligned}m_1(t) &= 2 + \cos(600\pi t) + 9\cos(900\pi t) + 1\cos(1500\pi t) + 5\cos(4200\pi t) + 9\cos(5400\pi t) + \cos(6800\pi t) \\m_2(t) &= 6 + \cos(600\pi t) + 9\cos(900\pi t) + 5\cos(1500\pi t) + \cos(4200\pi t) + 9\cos(5400\pi t) + \cos(6800\pi t) \\m_3(t) &= 3 + \cos(600\pi t) + 4\cos(900\pi t) + 9\cos(1500\pi t) + 6\cos(2400\pi t) + 3\cos(3200\pi t) + 5\cos(4200\pi t) + \\&\quad \cos(5400\pi t) + 5\cos(6800\pi t)\end{aligned}$$

As mensagens acima no domínio tempo e no domínio frequência se encontram nas figuras 1 e 2, respectivamente. Para a obtenção do espectro da mensagem no domínio frequência foi utilizada a transformada rápida de Fourier, um método amplamente utilizado em sinais de áudio (tipo de informação que tipicamente pode ser o conteúdo dos sinais modulantes) que amostra o sinal de tempo contínuo com uma frequência de amostragem relativamente alta e converte o mesmo em componentes espectrais individuais, fornecendo ao final a representação em frequência do sinal.

Após a instância e a representação dos sinais modulantes, foi realizado o projeto das portadoras, isto é, ondas sinusoidais que "envelopam" o sinal e permitem que o mesmo seja transmitido em faixas de frequência distintas da faixa frequência original da mensagem. Como a largura de banda disponível para a transmissão das mensagens é de  $30 \text{ kHz}$  e a frequência angular máxima de ambas as mensagens é a mesma ( $6800\pi \text{ rad/s}$ ), é plausível dedicar uma largura de banda igual para cada uma das mensagens no canal de comunicação, i.e,  $bw = 10 \text{ kHz}$  para cada mensagem.

Partindo dessa decisão de projeto, as portadoras foram projetadas com a frequência central  $f_c$  localizadas no centro da largura de banda dedicada a cada mensagem. Como a banda total disponível no canal é delimitada pela frequência mínima  $f_l = 425 \text{ kHz}$  e pela frequência máxima  $f_h = 455 \text{ kHz}$ , ficamos com as frequências centrais  $f_{c1} = 430 \text{ kHz}$ ,  $f_{c2} = 440 \text{ kHz}$  e  $f_{c3} = 450 \text{ kHz}$ .

Com as frequências centrais definidas, projetamos as três portadoras como:

$$p_n(t) = \cos(2\pi f_{cn}t)$$

A representação visual no domínio tempo e no domínio frequência das portadoras projetadas encontram-se nas figuras 3 e 4.

Em posse das mensagens  $m_n(t)$  e das portadoras  $p_n(t)$  é possível realizar a modulação AM DSB-SC. No caso particular das especificações deste sistema de comunicação, poderiam ser utilizadas outras técnicas de modulação vistas na disciplina, uma vez que a largura de banda disponível é superior ao dobro da largura necessária para transmitir as mensagens. O processo de modulação ocorre em um módulo modulador multiplicador, cujas entradas são a mensagem  $m_n(t)$  e a portadora  $p_n(t)$ :

$$xm_n(t) = m_n(t) \cdot p_n(t)$$

cuja representação na frequência é dada por:

$$XM_n(f) = \frac{1}{2}M_n(f + f_{cn}) + \frac{1}{2}M_n(f - f_{cn})$$

onde  $M_n(f)$  é a transformada rápida de Fourier de uma mensagem  $m_n(t)$ .

A saída deste módulo é a mensagem modulada em amplitude pronta para ser transmitida. Na representação dos sinais  $xm_n$  no domínio tempo (figura 5) é possível perceber que a portadora teve sua amplitude multiplicada pela amplitude da mensagem ponto a ponto, mantendo a fase e a frequência original constantes. Analisando as transformadas  $XM_n$  dos sinais modulados (figura 6) é possível verificar que tal operação faz com que o espectro de frequência original da mensagem seja deslocado para a frequência central da portadora, permitindo assim que as mensagens dividam um mesmo canal de comunicação sem sobrescrever umas às outras.

Após a modulação individual de cada mensagem com sua respectiva onda portadora é possível projetar o transmissor do sinal AM DSB-SC. Com as mensagens já moduladas, o transmissor corresponderá a soma simples das saídas dos módulos moduladores multiplicadores, dada por:

$$xm(t) = xm_1(t) + xm_2(t) + xm_3(t)$$

Avaliando a mensagem final transmitida no domínio tempo (figura 7) parece que os sinais simplesmente foram sobrescritos de maneira aleatória, porém avaliando o espectro da mensagem transmitida (figura 8) vemos que as três mensagens estão devidamente organizadas na banda disponível do canal sem compartilhar frequências entre si, uma vez que a banda total disponível foi pré-dividida entre as mesmas.

Após a modulação e a transmissão das mensagens pelo canal damos início ao processo de demodulação em amplitude. Este processo pode ser descrito em três etapas: passagem do sinal transmitido por um filtro passa-faixa visando selecionar a mensagem de interesse, demodulação AM do sinal selecionado pelo passa-faixa e passagem do sinal demodulado por um filtro passa-baixa, para limpar as altas frequências residuais da mensagem e aproximá-la ao máximo da mensagem originalmente emitida.

Ambos os filtros projetados e utilizados no processo de demodulação foram do tipo *butterworth*, como sugerido em vídeoaula. Tais filtros tem como característica a ausência de *ripples* na banda passante, apresentado uma resposta em frequência o mais plana possível na mesma.

O primeiro filtro utilizado na demodulação das mensagens é um filtro passa-faixa de terceira ordem cuja frequência de faixa passante é igual a frequência da onda portadora da mensagem de interesse. Filtros de ordens maiores possuem custos de implementação significativamente mais altos, portando a ordem foi escolhida visando um custo equilibrado. Quando a informação do canal (figura 7) passa por esse filtro apenas uma das mensagens é captada, possibilitando que a mesma possa ser individualmente demodulada.

Após a filtragem passa-faixa a mensagem passa por um módulo demodulador multiplicador (similar ao módulo modulador multiplicador utilizado para modular a mensagem). Como as mensagens foram multiplicadas por portadoras sinusoidais para que pudessem compartilhar o canal de comunicação corretamente, no processo de demodulação as mesmas devem ser multiplicadas por uma osciladora local sincronizada com a onda portadora para retirada das componentes não pertencentes a mensagem original. A operação realizada no módulo demodulador multiplicador é descrita por:

$$m_n(t) = fbpm_n(t) \cdot 2\cos(2\pi f_{cn}t)$$

onde  $fbpm_n$  é a saída do filtro passa-faixas dedicado a mensagem  $m_n(t)$  e  $f_{cn}$  é a frequência central da portadora  $p_n(t)$ .

Por fim, cada mensagem passa individualmente por um filtro passa-baixa para que componentes residuais de altas frequências sejam retiradas do sinal. A saída desta última filtragem é uma onda muito próxima a onda modulante transmitida originalmente. A figura 11 mostra as mensagens recuperadas no domínio tempo e a figura 12 mostra o espectro das mensagens recuperadas no domínio frequência.

### 3 Conclusão

Através do desenvolvimento deste trabalho foi possível projetar um sistema de comunicação completo para a transmissão de mensagens em amplitude modulada. A dinamicidade do *software* MATLAB auxiliou significativamente nas decisões ao longo do projeto, visto que através do mesmo é possível visualizar rapidamente o comportamento do sistema utilizando diferentes frequências de amostragem  $F_s$  na transformada rápida de Fourier, o impacto de diferentes ordens de filtros passa-faixa e passa-baixa, o resultado da utilização de diferentes frequências de passagem e corte nos filtros, etc.

Além de experienciar os desafios de projeto de um sistema de comunicação hipotético, este trabalho serviu muito bem para fixação dos conteúdos iniciais da disciplina de princípios de comunicação, servindo portanto não apenas como uma ferramenta avaliativa mas também como uma oportunidade de solidificar o conhecimento acerca dos conceitos envolvidos nos processos de modulação, transmissão e demodulação de mensagens.

Ao final, as mensagens recuperadas foram consideravelmente fiéis as mensagens emitidas originalmente no sistema, com leves variações nos domínios tempo e frequência. Para que as mensagens recuperadas fossem mais próximas das mensagens emitidas deveriam ser utilizados filtros de ordens maiores (idealmente com ordem tendendo ao infinito), porém tal técnica não tem aplicabilidade prática e portanto não há embasamento para tal abordagem em um projeto hipotético.

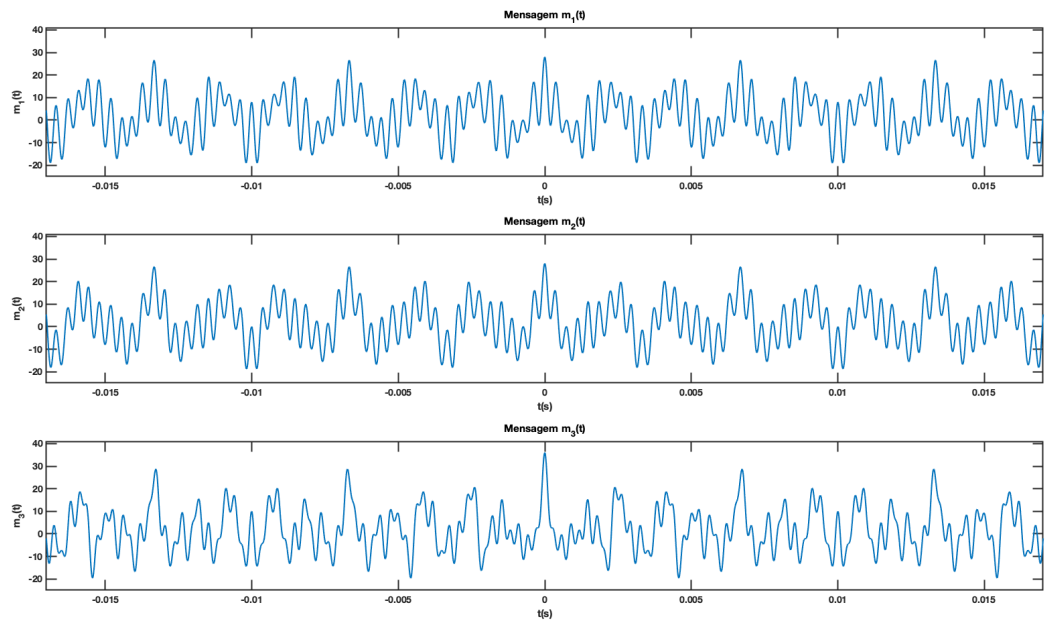


Figura 1: Mensagens no domínio tempo.

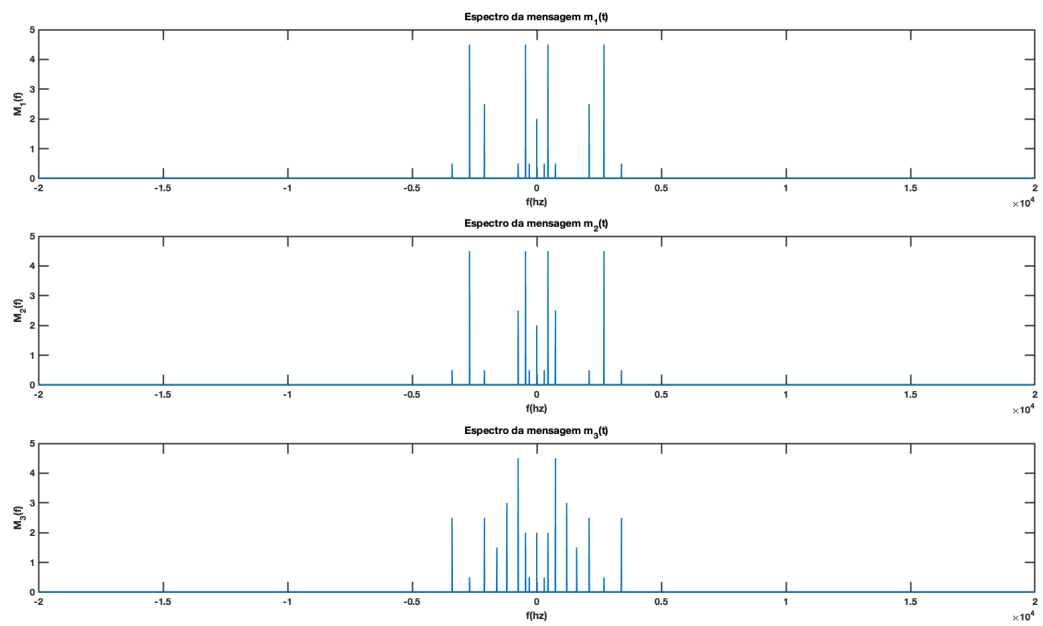


Figura 2: Espectro das mensagens no domínio frequência.

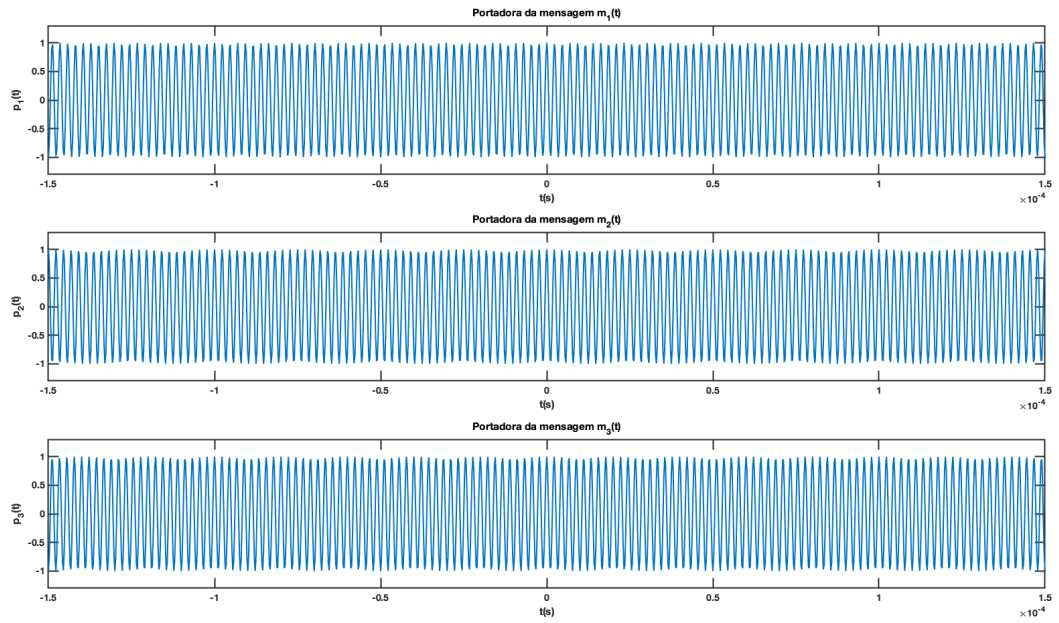


Figura 3: Portadoras das mensagens no domínio tempo.

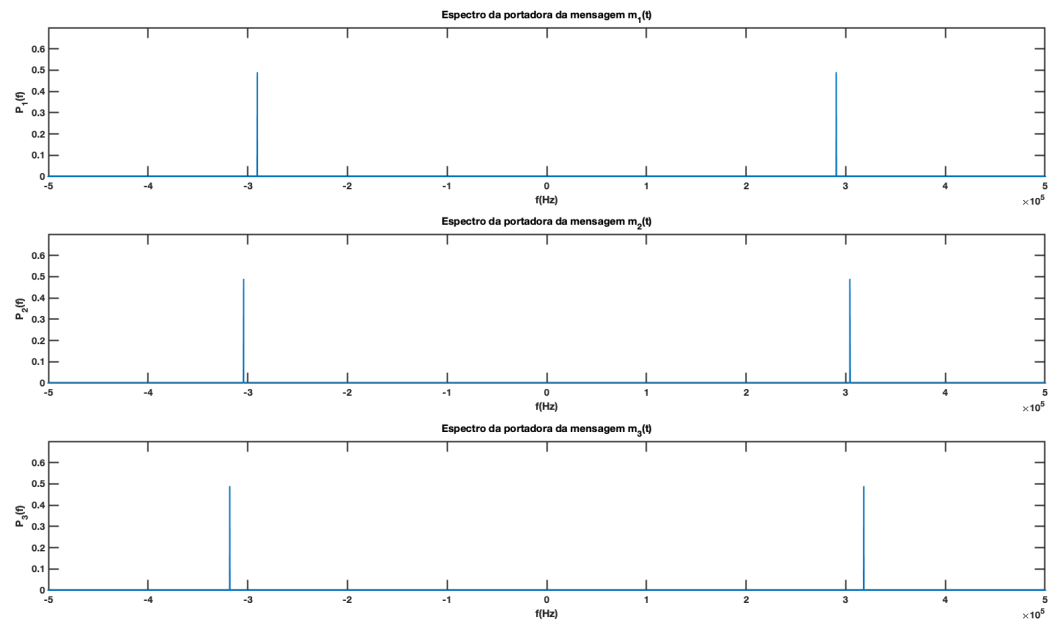


Figura 4: Espectro das portadoras no domínio frequência.

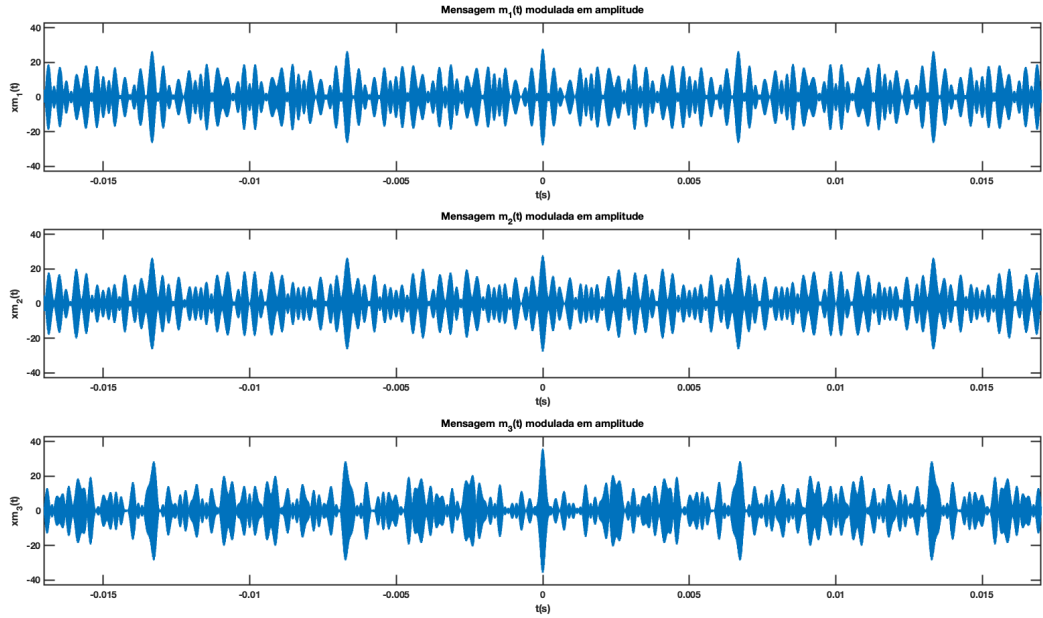


Figura 5: Mensagens moduladas em AM DSB-SC no domínio tempo.

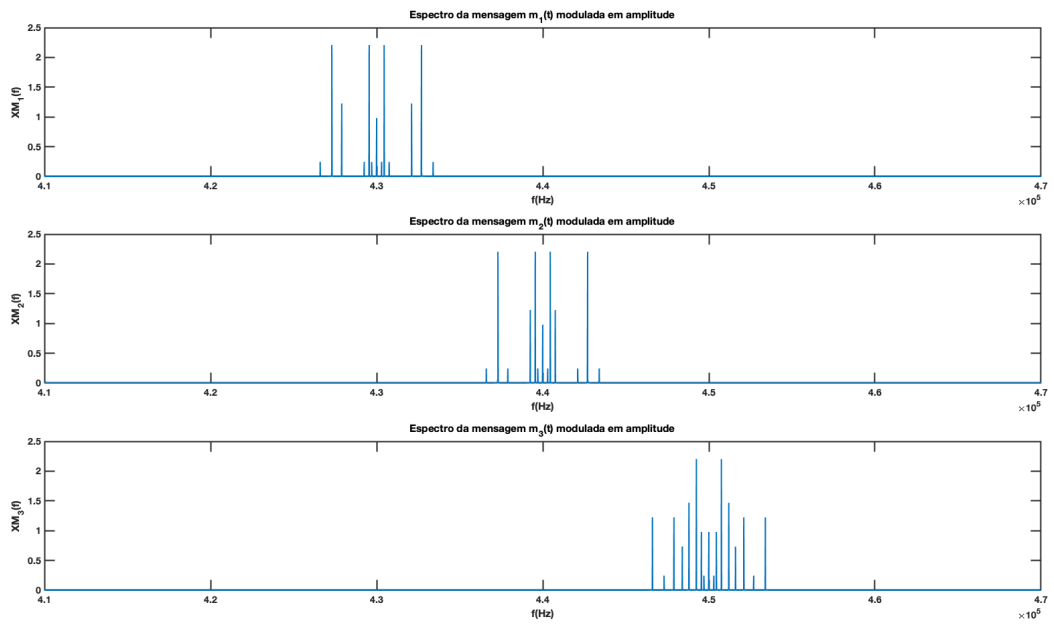


Figura 6: Espectro das mensagens moduladas no eixo positivo do domínio frequência.

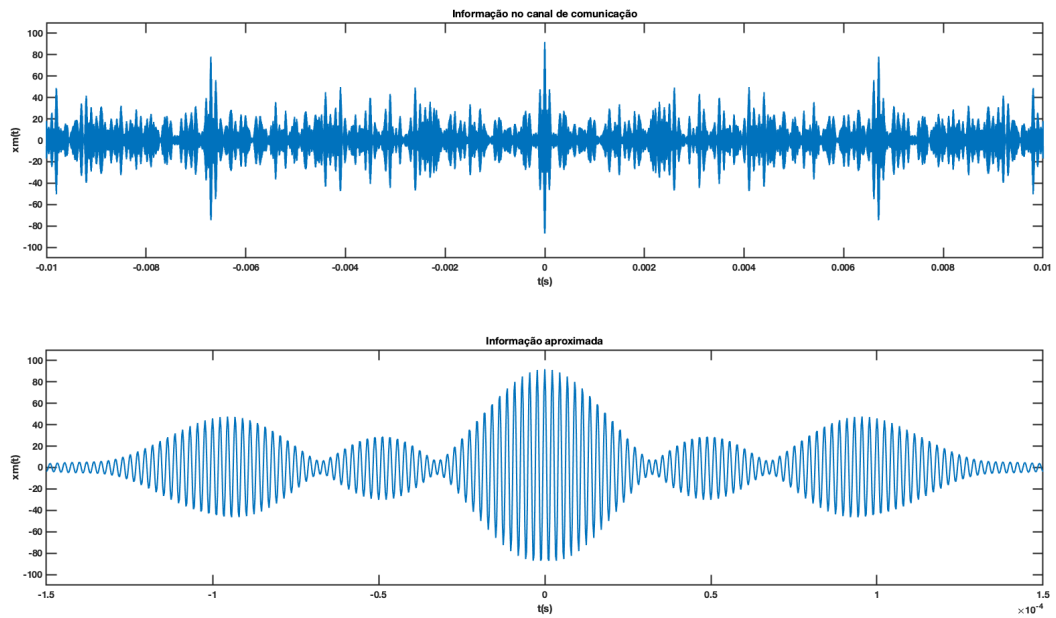


Figura 7: Mensagens transmitidas no canal de comunicação hipotético no domínio tempo.

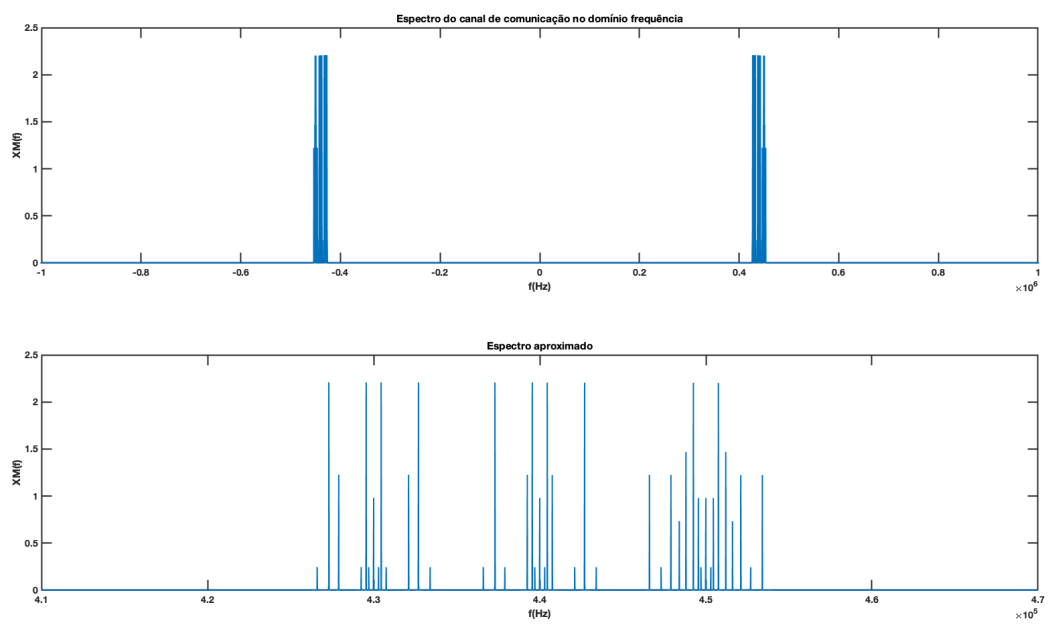


Figura 8: Espectro das mensagens no canal de comunicação no domínio frequência.



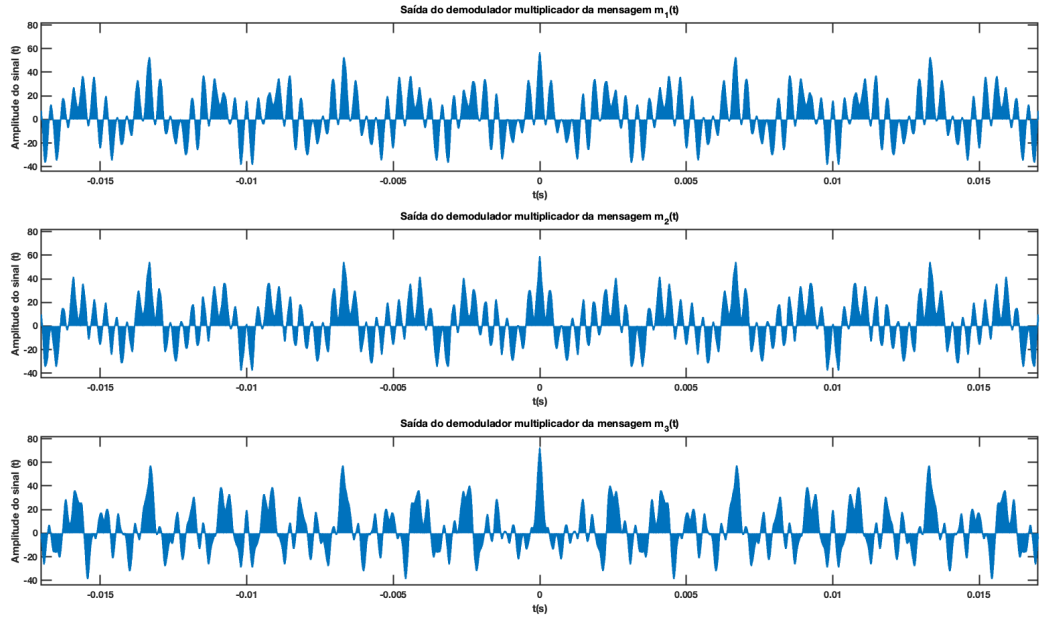


Figura 9: Sinais de saída dos módulos de demodulação AM DSB-SC.

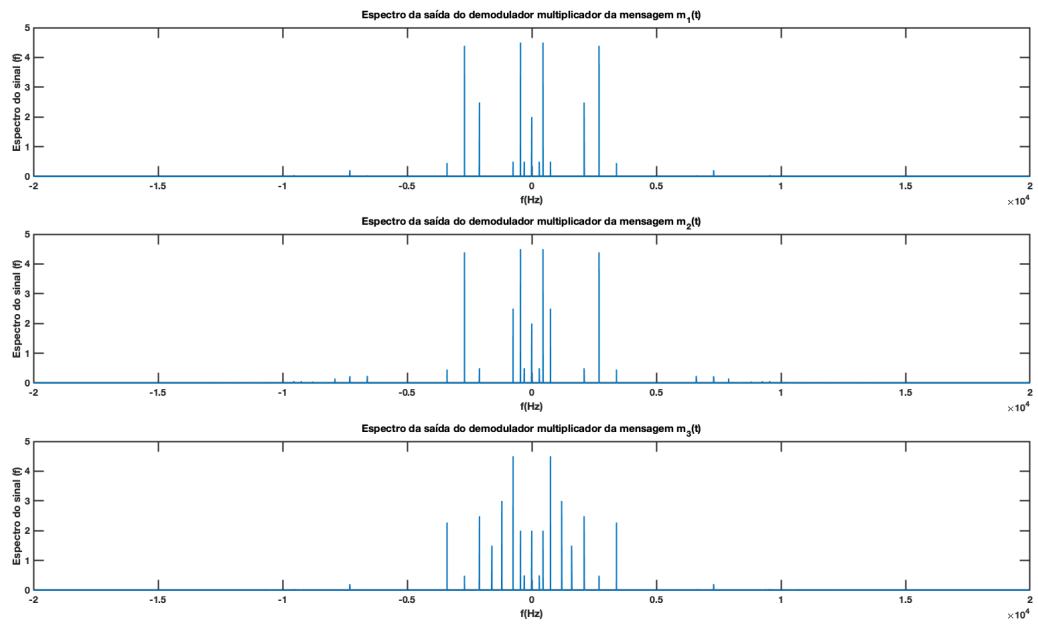


Figura 10: Espectro dos sinais de saída dos módulos de demodulação.

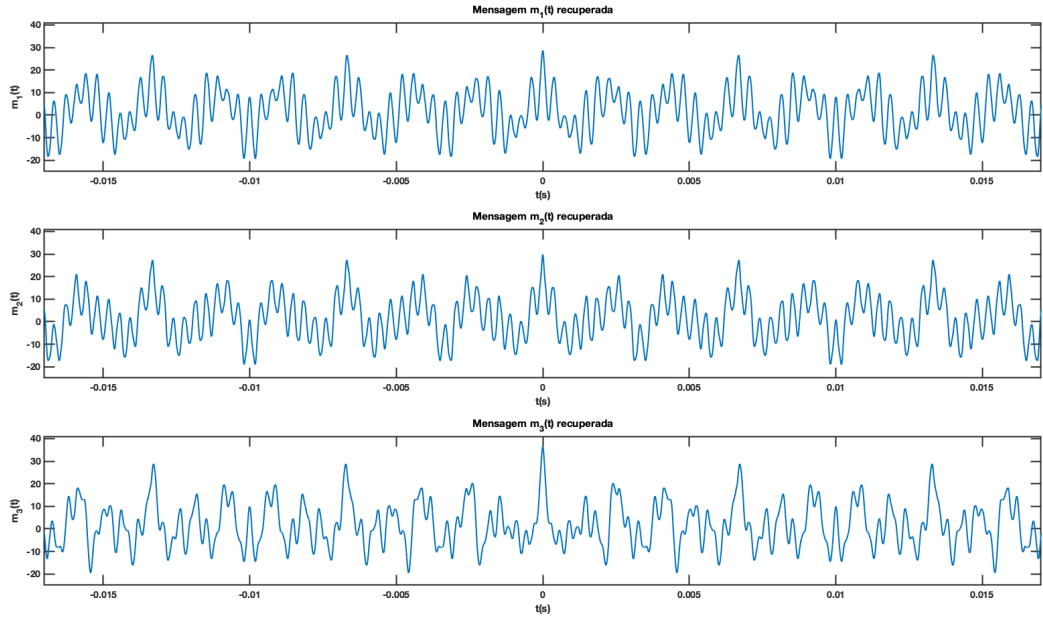


Figura 11: Mensagens recuperadas no domínio tempo.

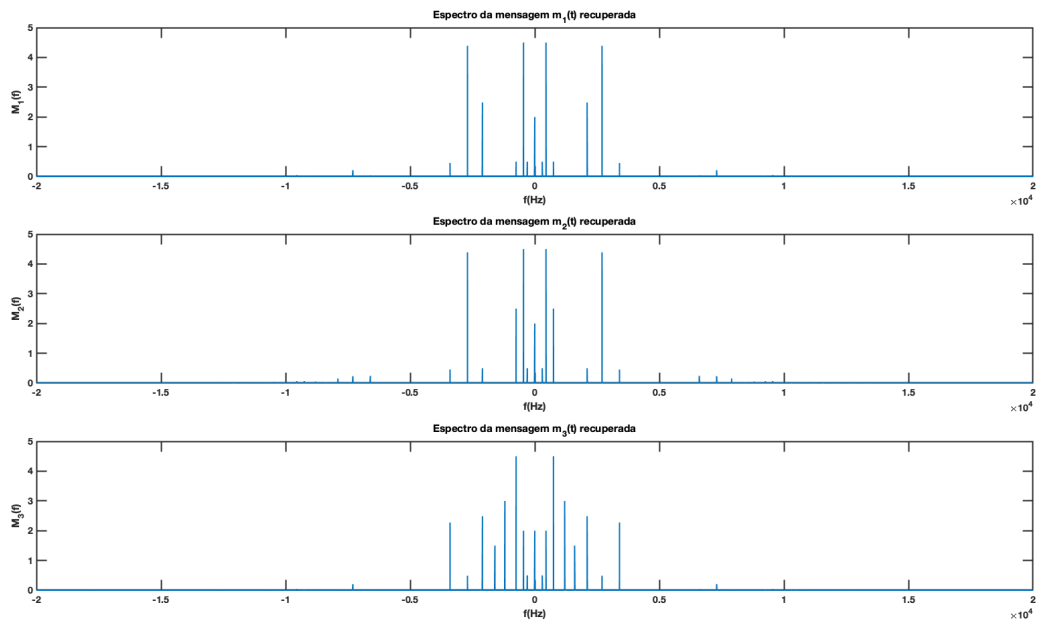


Figura 12: Espectro das mensagens recuperadas no domínio frequência.