

Relatório de Modulação AM

Luiz Felipe Rodrigues e Silva
Universidade de Brasília
Brasília-DF, Brasil
luizrodriguesesilva@outlook.com.br

Resumo—Este trabalho aborda a modulação em amplitude (AM), uma técnica clássica de transmissão de sinais analógicos, e suas variantes: AM convencional e AM com portadora suprimida (SC). São realizados dois experimentos utilizando o GNU Radio, nos quais são implementados e analisados tanto a modulação quanto a demodulação de sinais em ambas as técnicas. O objetivo é compreender, na prática, os conceitos teóricos estudados sobre modulação AM, observando as diferenças de desempenho e características entre os métodos, bem como os desafios envolvidos no processo de demodulação.

Index Terms—component, formatting, style, styling, insert.

I. INTRODUÇÃO

A modulação é um técnica que permite a transmissão de sinais analógicos ou digitais através de um meio físico, como o ar ou cabos. Segundo [1], a modulação AM é um processo que envolve a variação da amplitude de uma portadora de alta frequência em função de um sinal modulante, que contém a informação a ser transmitida. Essa técnica é amplamente utilizada em sistemas de comunicação, como rádio e televisão, devido à sua simplicidade e eficácia na transmissão de sinais analógicos.

A. Modulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

A modulação AM-DSB (Double Sideband) é uma forma de modulação em que a portadora e as duas laterais (superior e inferior) são transmitidas. Esse tipo de modulação consiste em multiplicar o sinal de informação por uma portadora, como o sinal mensagem é de banda limitada, isto é, se o sinal $m(t)$ admite transformada de fourier, então $M(f) = 0$ para $|f| > W$, onde W é a largura de banda do sinal. Como a mensagem tem sua representação espectral, é possível deslocar a mensagem para uma nova frequência utilizando a propriedade de modulação da transformada de Fourier, que nos diz que a multiplicação no domínio do tempo por uma exponencial complexa resulta em um deslocamento espectral no domínio da frequência. Multiplicando o sinal de informação $m(t)$ por uma portadora $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$, temos:

$$s(t) = m(t)c(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

onde A_c é a amplitude da portadora e f_c é a frequência da portadora. Podemos expandir a expressão acima utilizando a identidade trigonométrica $\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$, resultando em:

$$s(t) = \frac{A_c}{2} m(t) e^{j2\pi f_c t} + \frac{A_c}{2} m(t) e^{-j2\pi f_c t} \quad (2)$$

pode-se aplicar a transformada de Fourier em ambos os lados da equação, resultando em:

$$S(f) = \frac{A_c}{2} (M(f - f_c) + M(f + f_c)) \quad (3)$$

Por exemplo, para uma mensagem $\cos(2\pi f_m t)$ com frequência $f_m = 100$ Hz, uma portadora $\cos(2\pi f_c t)$ de $f_c = 1$ kHz com amplitude $A_c = 1$, realizando a modulação AM-DSB, os espectros para a mensagem, portadora e sinal modulado são mostrados nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente. O espectro do sinal modulado AM-DSB apresenta duas bandas laterais, uma superior e outra inferior, que contêm a mesma informação, além da portadora.

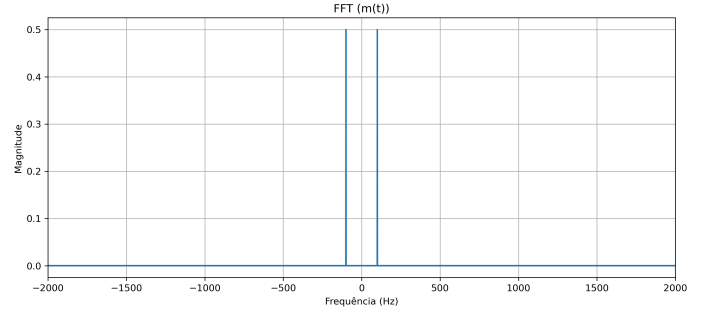


Figura 1. Espectro do sinal de mensagem. Fonte: Autor.

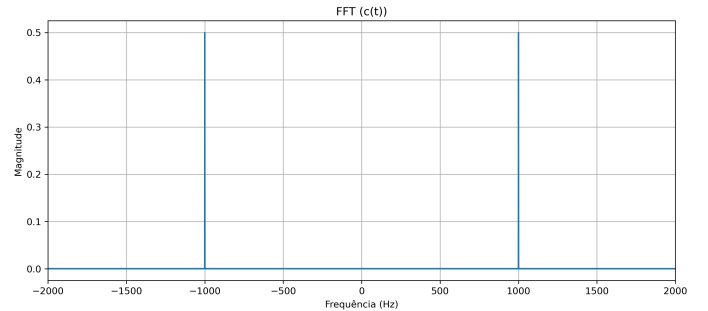


Figura 2. Espectro da portadora. Fonte: Autor.

O diagrama de blocos da modulação AM-DSB é apresentado na Figura 4, onde o sinal de informação $m(t)$ é multiplicado pela portadora $c(t)$, resultando no sinal modulado $s(t)$. A demodulação do sinal AM-DSB pode ser realizada utilizando um detector de envoltória, que recupera o sinal de informação original a partir do sinal modulado.

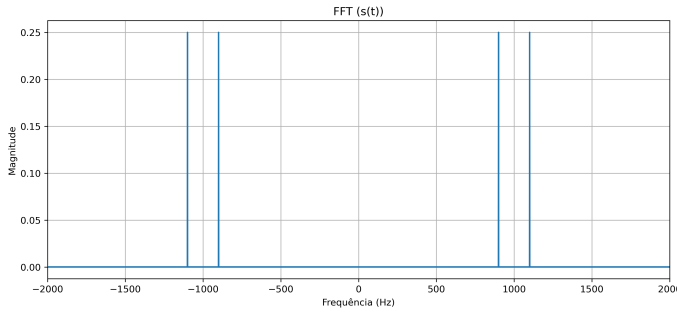


Figura 3. Espectro do sinal modulado AM-DSB. Fonte: Autor.

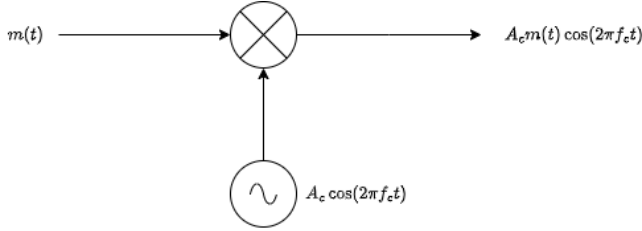


Figura 4. Diagrama de blocos da modulação AM-DSB. Fonte: Autor.

Podemos demonstrar os resultados a partir da transformada de Fourier, onde a transformada de Fourier do sinal modulado $m(t)$ é dada por:

$$M(f) = \frac{1}{2} (\delta(f - 100) + \delta(f + 100)) \quad (4)$$

substituindo na equação (3), temos:

$$S(f) = \frac{1}{4} (\delta(f - 100 - 1000) + \delta(f + 100 - 1000) + \delta(f - 100 + 1000) + \delta(f + 100 + 1000)) \quad (5)$$

Conforme mostrado no espectro 3, a portadora é suprimida.

B. demodulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

A demodulação AM-DSB-SC é um processo que visa recuperar o sinal de informação original a partir do sinal modulado. O método mais comum para realizar essa demodulação é o uso de um multiplicador, que multiplica o sinal modulado por uma cópia da portadora. Esse processo resulta em um sinal que contém a informação original, mas também inclui uma componente de alta frequência que deve ser filtrada.

$$s(t) = m(t)c(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (6)$$

$$y(t) = s(t)c(t) \cos(2\pi f_c t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)^2 \quad (7)$$

Linearizando o coseno, temos:

$$r(t) = \frac{A_c}{2} m(t) + \frac{A_c}{2} m(t) \cos(4\pi f_c t) \quad (8)$$

A transformada de Fourier do sinal demodulado $r(t)$ é dada por:

$$Y(f) = \frac{A_c}{2} M(f) + \frac{A_c}{2} M(f - 2f_c) + \frac{A_c}{2} M(f + 2f_c) \quad (9)$$

Aplicando um filtro passa-baixa com largura de banda W para eliminar a componente de alta frequência, obtemos o sinal de informação original:

$$Y_{LPF}(f) = \frac{A_c}{2} M(f) \quad (10)$$

O sinal é recuperado com uma amplitude reduzida, o que pode ser compensado por um amplificador. O diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC é apresentado na Figura 5, onde o sinal modulado $s(t)$ é multiplicado pela portadora $c(t)$, resultando no sinal demodulado $r(t)$. Em seguida, um filtro passa-baixa é aplicado para recuperar o sinal de informação original.

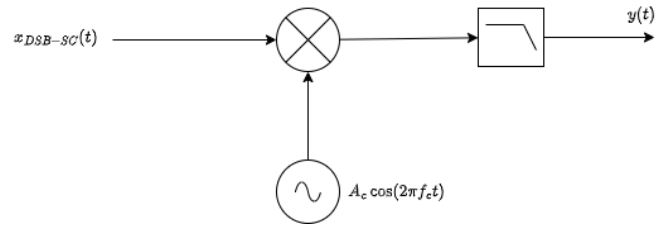


Figura 5. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

Um dos principais desafios da modulação em amplitude com portadora suprimida (DSB-SC) é a necessidade de sincronização de fase entre o sinal modulado e a portadora na demodulação. Caso haja um desvio de fase entre a portadora original e a gerada no receptor, o sinal demodulado apresentará distorções significativas. Para mitigar esse problema, uma abordagem comum é transmitir um tom piloto juntamente com o sinal modulado. Esse tom é uma pequena fração da portadora original, inserida com baixa amplitude, e pode ser isolado no receptor por meio de um filtro de banda estreita. No entanto, a presença do tom piloto implica que a portadora não está totalmente suprimida, o que descaracteriza a modulação como DSB-SC pura.

Outra alternativa mais robusta é o uso de um PLL (Phase-Locked Loop), um circuito que sincroniza automaticamente a fase da portadora local com a fase do sinal modulado recebido. O PLL ajusta continuamente a frequência e a fase do oscilador local, permitindo uma demodulação mais precisa mesmo na presença de ruídos e desvios de fase. A Figura 6 ilustra o esquema de demodulação utilizando PLL.

C. Modulação AM Convencional

Um sinal AM convencional consiste em uma componente portadora de grande amplitude, além do sinal modulado em DSB-AM. O sinal transmitido pode ser expresso matematicamente como:

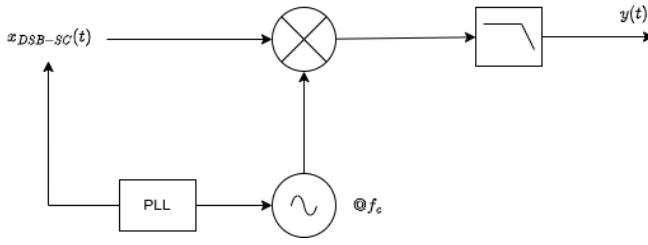


Figura 6. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC com PLL. Fonte: Autor.

$$u(t) = A_c[1 + m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (11)$$

onde $m(t)$ representa o sinal mensagem, o qual deve satisfazer a condição $|m(t)| \leq 1$ para garantir que a envoltória do sinal modulado permaneça sempre positiva. A componente $A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$ constitui o sinal DSB-AM, enquanto $A_c \cos(2\pi f_c t)$ representa a portadora.

A Figura 7 ilustra a envoltória do sinal modulado:

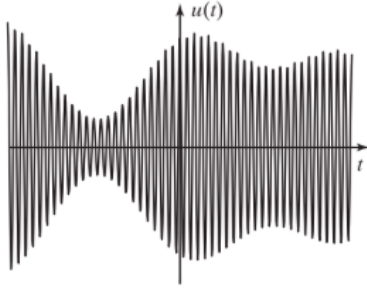


Figura 7. Envoltória do Sinal AM. Fonte: Proakis

Na prática, o sinal $m(t)$ é escalado para garantir que sua magnitude esteja sempre dentro do intervalo desejado. Uma forma conveniente de fazer isso é expressar:

$$m(t) = am_n(t) \quad (12)$$

em que $m_n(t)$ é o sinal normalizado tal que seu valor mínimo é -1 , definido por:

$$m_n(t) = \frac{m(t)}{\max |m(t)|} \quad (13)$$

Nesse caso, o fator de escala a é chamado de índice de modulação, sendo um valor constante geralmente menor que 1. Como $|m_n(t)| \leq 1$ e $0 < a < 1$, tem-se que $1 + am_n(t) > 0$, evitando sobremodulação. Assim, o sinal modulado pode ser reescrito como:

$$u(t) = A_c[1 + am_n(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (14)$$

Espectro do Sinal AM Convencional: Se $m(t)$ possui transformada de Fourier $M(f)$, o espectro do sinal modulado $u(t)$ será:

$$U(f) = \mathcal{F}\{A_c am_n(t) \cos(2\pi f_c t)\} + \mathcal{F}\{A_c \cos(2\pi f_c t)\} \quad (15)$$

$$U(f) = \frac{A_c a}{2} [M_n(f - f_c) + M_n(f + f_c)] + \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] \quad (16)$$

Portanto, o espectro de um sinal AM convencional ocupa uma largura de banda que é o dobro da largura de banda do sinal mensagem. A Figura 8 apresenta o espectro $M(f)$.

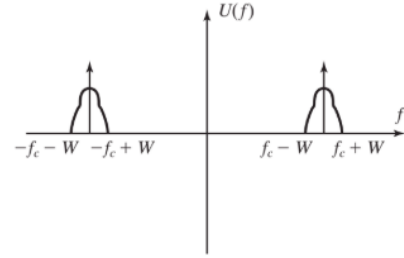


Figura 8. Sinal AM convencional no domínio do tempo e da frequência. Fonte: Proakis

II. METODOLOGIA

A. Modulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

Neste experimento foi utilizado o GNU Radio Companion (GRC) para implementar a modulação AM-DSB-SC. O sinal de mensagem foi gerado utilizando um bloco de fonte de sinal senoidal, com frequência f_m de 1kHz e amplitude de 1. A portadora foi gerada com uma frequência de 5kHz e amplitude de 1. O sinal modulado foi obtido multiplicando o sinal de mensagem pela portadora.

O diagrama de blocos da modulação AM-DSB-SC no GNU Radui é apresentado na Figura 9

Os seguintes blocos foram utilizados:

- **Signal Source:** Gera o sinal de mensagem com frequência de 1000 Hz e amplitude de 1.

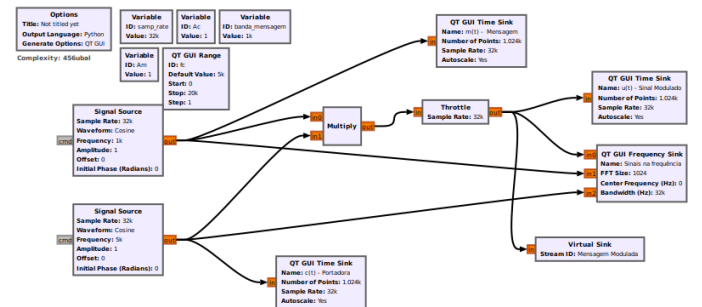


Figura 9. Diagrama de blocos da modulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

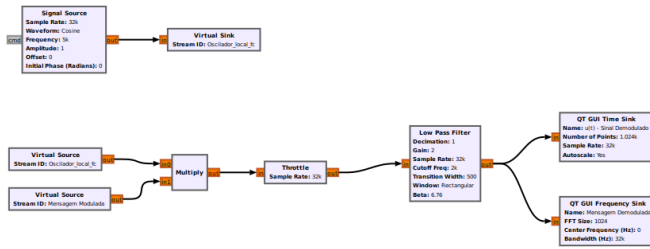


Figura 10. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

- **Signal Source:** Gera a portadora com frequência de 0 a 20kHz, e amplitude de 1 V.
- **Signal Source:** Gera o oscilador local com frequência fixa de 5kHz.
- **QT GUI Range:** Permite ajustar a frequência da portadora. Aqui foi definido entre 0 e 20kHz.
- **Multiply:** Multiplica o sinal de mensagem pela portadora, resultando no sinal modulado AM-DSB-SC.
- **Virtual Sink:** Permite armazenar os sinais e usá-los no bloco Virtual Source.
- **Virtual Source:** Permite usar os sinais armazenados no bloco Virtual Sink.
- **QT GUI Time Sink:** Exibe o sinal modulado no domínio do tempo.
- **QT GUI Frequency Sink:** Exibe o espectro do sinal modulado no domínio da frequência.

Para mostrar a perda da mensagem pela falta de sincronismo, foi ajustado a frequência da portadora para uma frequência de 10Khz.

B. Demodulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

De maneira semelhante, foi implementada a demodulação do sinal AM-DSB-SC utilizando o GNU Radio Companion. O sinal modulado foi multiplicado novamente por um sinal da portadora (oscilador local) com a mesma frequência e fase da portadora original, seguido de um filtro passa-baixas para recuperar o sinal de mensagem.

O diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC no GNU Radio é apresentado na Figura 10.

Os seguintes blocos foram utilizados:

- **Virtual Source:** Recebe o sinal modulado armazenado anteriormente.
- **Signal Source:** Gera o oscilador local com frequência igual à portadora (5kHz).
- **Multiply:** Multiplica o sinal modulado pelo oscilador local.
- **Throttle:** Controla a taxa de amostragem do fluxo de dados, evitando sobrecarga do processamento durante a simulação.
- **Low Pass Filter:** Frequência de corte em 2kHz, com ganho de 2 e a janela na forma retangular.
- **QT GUI Time Sink:** Exibe o sinal demodulado no domínio do tempo.

- **QT GUI Frequency Sink:** Exibe o espectro do sinal demodulado no domínio da frequência.

Para demonstrar a importância do sincronismo, foi realizada a demodulação com o oscilador local defasado ou com frequência diferente, observando a distorção ou perda do sinal de mensagem.

III. EXPERIMENTOS

IV. RESULTADOS

A. Modulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

Na modulação AM-DSB-SC, espera-se observar o espectro da mensagem deslocado para as frequências laterais em torno da frequência da portadora, conforme ilustrado na Figura 11. Como pode ser visualizado, a mensagem original, que é uma senoide de 1 kHz, aparece como dois impulsos simétricos em torno da portadora de 5 kHz, definida pelo QT GUI Range. Isso ocorre devido à propriedade da modulação, que desloca o espectro da mensagem para as frequências $f_c + f_m$ e $f_c - f_m$, onde f_c é a frequência da portadora e f_m a frequência da mensagem.

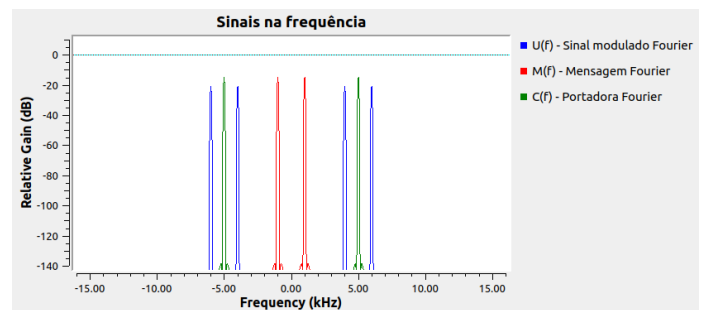


Figura 11. Sinais no domínio da frequência. Fonte: Autor.

B. Demodulação AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

Os resultados da demodulação também estão de acordo com o esperado. Ao utilizar um filtro passa-baixa com frequência de corte superior à largura de banda da mensagem, é possível recuperar o sinal original. A Figura 12 mostra o espectro do sinal após a demodulação, evidenciando a recuperação da senoide de 1 kHz.

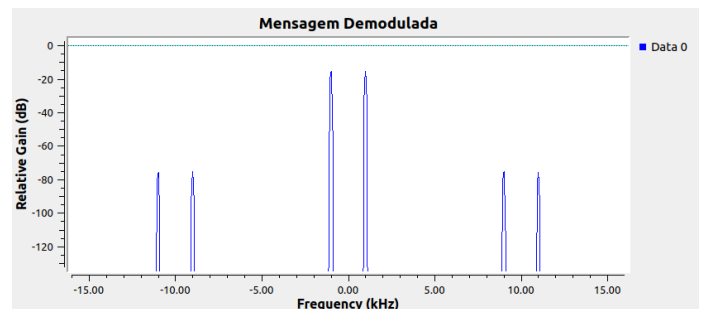


Figura 12. Demodulação do sinal AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

C. Falta de Sincronismo

Para demonstrar que a demodulação AM-DSB-SC exige sincronismo entre a portadora do transmissor e do receptor, foi alterada a frequência da portadora local no receptor para 10 kHz utilizando o QT GUI Range, simulando uma perda de sincronismo de frequência. A Figura 13 mostra o espectro do sinal demodulado sob essa condição, evidenciando distorções e a impossibilidade de recuperar corretamente a mensagem original.

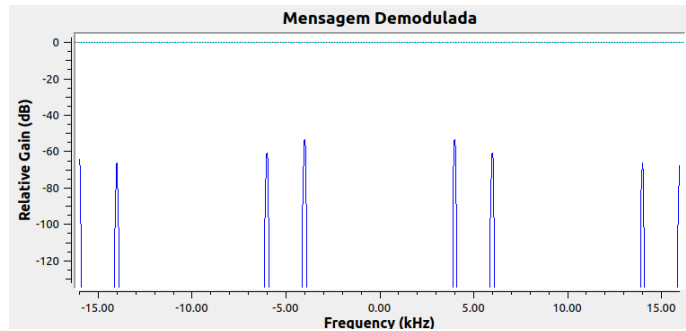


Figura 13. Simulação de falta de sincronismo na demodulação AM-DSB-SC.
Fonte: Autor.

V. DISCUSSÃO

REFERÊNCIAS

- [1] NETO, Vicente S. Sistemas de Comunicação - Serviços, Modulação e Meios de Transmissão. Rio de Janeiro: Érica, 2015. E-book. p.44. ISBN 9788536522098. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536522098/>. Acesso em: 17 mai. 2025.
- [2] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2005). Fundamentals of Communication Systems. McGraw-Hill.