

# 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**—modulação em amplitude, AM, portadora suprimida, SC, GNU Radio, transmissão analógica, demodulação, análise de sinais.

## 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.

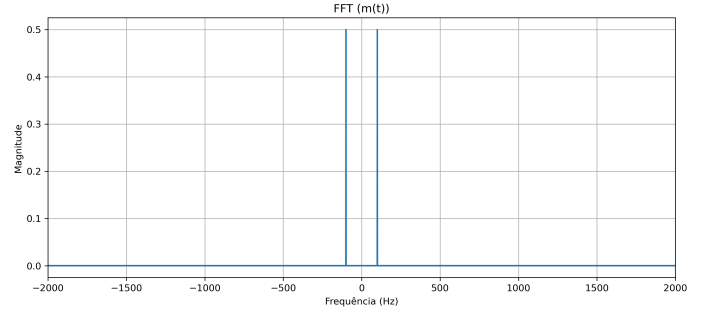


Figura 1. Espectro do sinal de mensagem. Fonte: Autor.

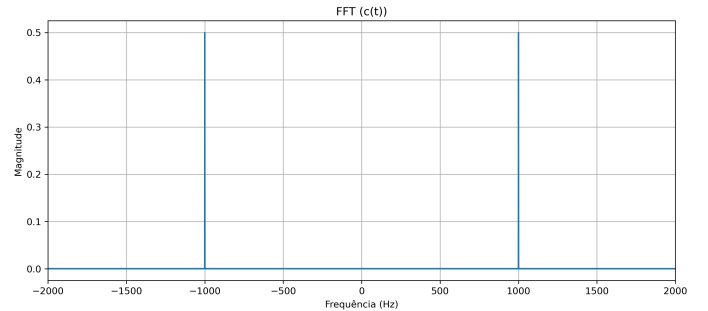


Figura 2. Espectro da portadora. Fonte: Autor.

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.

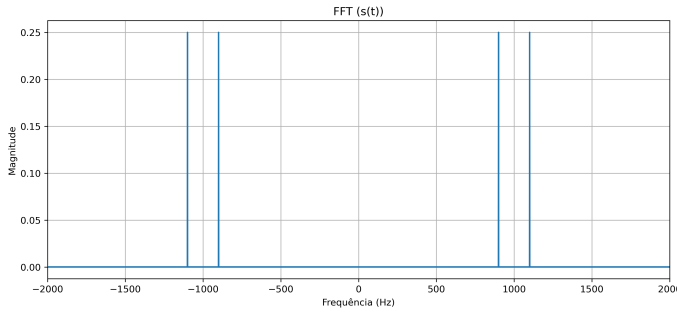


Figura 3. Espectro do sinal modulado AM-DSB. Fonte: Autor.

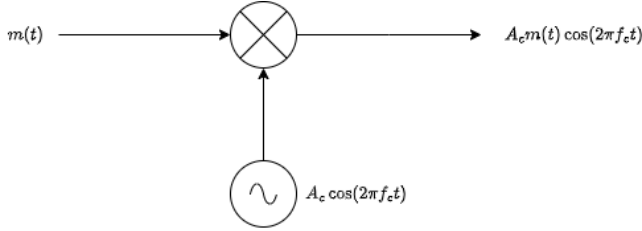


Figura 4. Diagrama de blocos da modulação AM-DSB. Fonte: Autor.

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.

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

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

Linarizando 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.

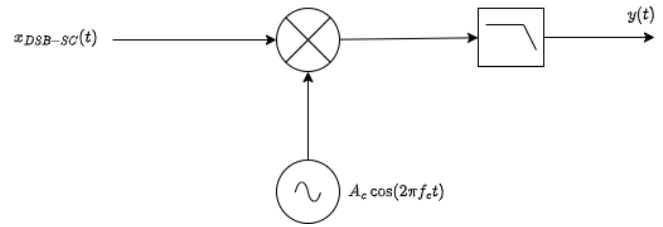


Figura 5. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

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:

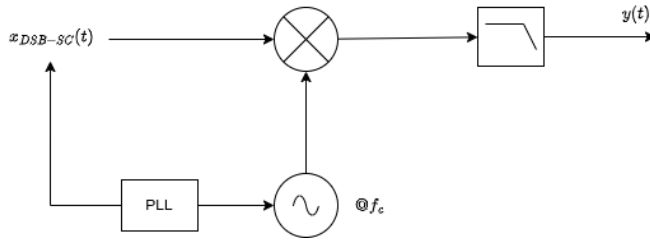


Figura 6. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC com PLL. Fonte: Autor.

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

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:

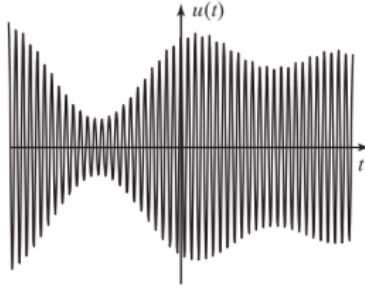


Figura 7. Envoltória do Sinal AM. Fonte: Proakis

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  $M(f)$ .

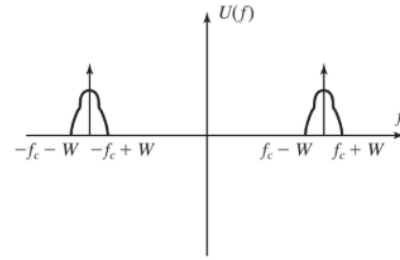


Figura 8. Sinal AM convencional no domínio do tempo e da frequência. Fonte: Proakis

A geração de um sinal AM pode ser feita utilizando um gerador de onda quadrada e um filtro passa banda

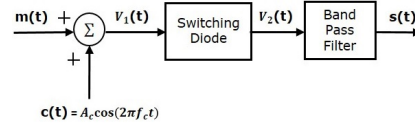


Figura 9. Sinal no domínio da frequência. Fonte: Tutorialspoint

#### D. Demodulação AM

A demodulação de sinais AM convencionais pode ser realizada de forma simples utilizando um detector de envoltória, dispensando a necessidade de demodulação síncrona. O detector de envoltória é composto basicamente por um diodo e um circuito RC (filtro passa-baixa), como ilustrado na Figura 10.

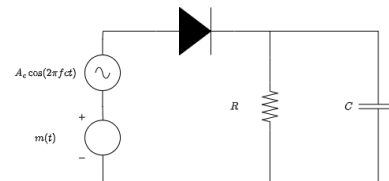


Figura 10. Circuito do detector de envoltória para demodulação AM. Fonte: Autor

O funcionamento é simples: durante o semiciclo positivo do sinal de entrada, o diodo conduz e o capacitor carrega até o

valor de pico do sinal. Quando o sinal cai abaixo da tensão do capacitor, o diodo se bloqueia e o capacitor descarrega lentamente pelo resistor, acompanhando a envoltória do sinal modulado. O filtro RC elimina as componentes de alta frequência, recuperando o sinal mensagem. Para remover a componente DC basta usar um transformador.

A escolha do valor da constante de tempo  $RC$  é fundamental: se  $RC$  for muito pequeno, o capacitor descarrega rapidamente e não acompanha a envoltória; se for muito grande, a descarga é lenta e o sinal fica distorcido. O valor ideal de  $RC$  deve satisfazer:

$$\frac{1}{f_c} \ll RC \ll \frac{1}{W}$$

onde  $f_c$  é a frequência da portadora e  $W$  a largura de banda do sinal mensagem. A Figura 11 mostra o efeito de um  $RC$  inadequado, enquanto a Figura 12 ilustra o funcionamento correto.

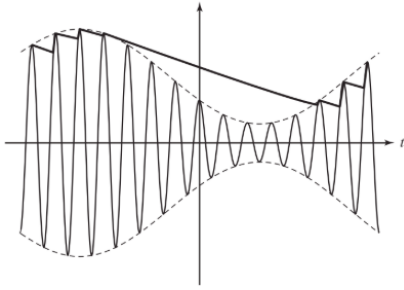


Figura 11. Envoltória para um RC fora do intervalo ideal. Fonte: [2]

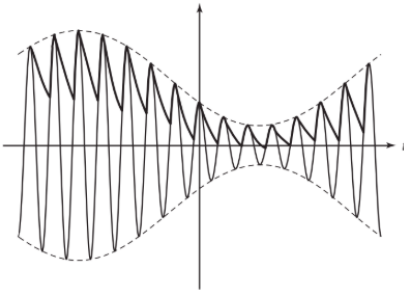


Figura 12. Envoltória para um RC dentro do intervalo ideal. Fonte: [2]

## II. SINCRONISMO DE FASE EM AM-DSB-SC

A demodulação coerente do sinal AM-DSB-SC exige perfeito sincronismo entre a fase da portadora do transmissor ( $\phi_c$ ) e do oscilador local no receptor ( $\hat{\phi}_c$ ). O processo pode ser descrito por:

### A. Modulação

O sinal modulado é gerado por:

$$s(t) = m(t) \cdot A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (17)$$

onde:

- $m(t)$ : sinal da mensagem

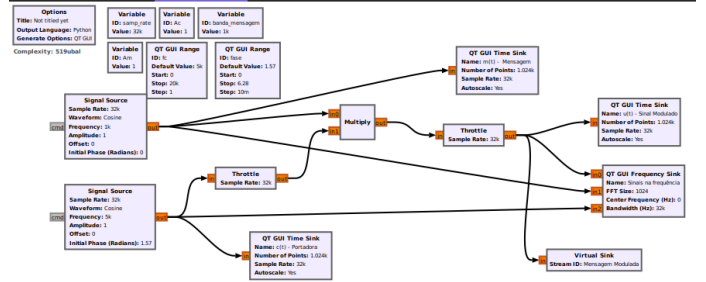


Figura 13. Diagrama de blocos da modulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

- $A_c$ : amplitude da portadora
- $f_c$ : frequência da portadora
- $\phi_c$ : fase da portadora no transmissor

### B. Demodulação

O receptor multiplica pelo oscilador local:

$$\hat{c}(t) = \cos(2\pi f_c t + \hat{\phi}_c) \quad (18)$$

Resultando em:

$$y(t) = s(t) \cdot \hat{c}(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \left[ \cos(\phi_c - \hat{\phi}_c) + \cos(4\pi f_c t + \phi_c + \hat{\phi}_c) \right] \quad (19)$$

Após filtragem passa-baixa:

$$y_{\text{final}}(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \cos(\Delta\phi) \quad (20)$$

onde  $\Delta\phi = \phi_c - \hat{\phi}_c$  é o erro de fase.

### C. Efeitos do Erro de Fase

- **Sincronismo perfeito** ( $\Delta\phi = 0^\circ$ ):

$$y_{\text{final}}(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \quad (21)$$

- **Erro de fase genérico:**

$$y_{\text{final}}(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \cos(\Delta\phi) \quad (22)$$

- **Caso crítico** ( $\Delta\phi = 90^\circ$ ):

$$y_{\text{final}}(t) = 0 \quad (23)$$

## III. METODOLOGIA

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

Neste experimento, utilizou-se 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 1 kHz e amplitude de 1. A portadora foi gerada com frequência de 5 kHz 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 Radio é apresentado na Figura 13.

Os seguintes blocos foram utilizados:

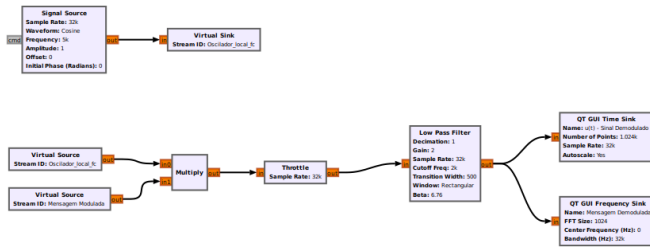


Figura 14. Diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

- **Signal Source:** Gera o sinal de mensagem com frequência de 1000 Hz e amplitude de 1.
- **Signal Source:** Gera a portadora com frequência variável de 0 a 20 kHz e amplitude de 1 V.
- **Signal Source:** Gera o oscilador local com frequência fixa de 5 kHz.
- **QT GUI Range:** Permite ajustar a frequência da portadora entre 0 e 20 kHz.
- **Multiply:** Multiplica o sinal de mensagem pela portadora, resultando no sinal modulado AM-DSB-SC.
- **Virtual Sink:** Armazena os sinais para uso no bloco Virtual Source.
- **Virtual Source:** Utiliza 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 demonstrar a perda da mensagem devido à falta de sincronismo, ajustou-se a frequência da portadora para 10 kHz e modificou-se a fase do sinal para 1,57 radianos ( $90^\circ$ ) através do QT GUI Range. Com esses valores, espera-se que na demodulação a mensagem seja completamente comprometida.

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

Implementou-se a demodulação do sinal AM-DSB-SC multiplicando o sinal modulado por um oscilador local com a mesma frequência e fase da portadora original, seguido de um filtro passa-baixas.

O diagrama de blocos da demodulação AM-DSB-SC no GNU Radio é apresentado na Figura 14.

Os blocos utilizados foram:

- **Virtual Source:** Recebe o sinal modulado armazenado.
- **Signal Source:** Gera o oscilador local com frequência igual à portadora (5 kHz).
- **Multiply:** Multiplica o sinal modulado pelo oscilador local.
- **Throttle:** Controla a taxa de amostragem.
- **Low Pass Filter:** Filtro passa-baixas com frequência de corte em 2 kHz, ganho de 2 e janela retangular.
- **QT GUI Time Sink:** Exibe o sinal demodulado no tempo.

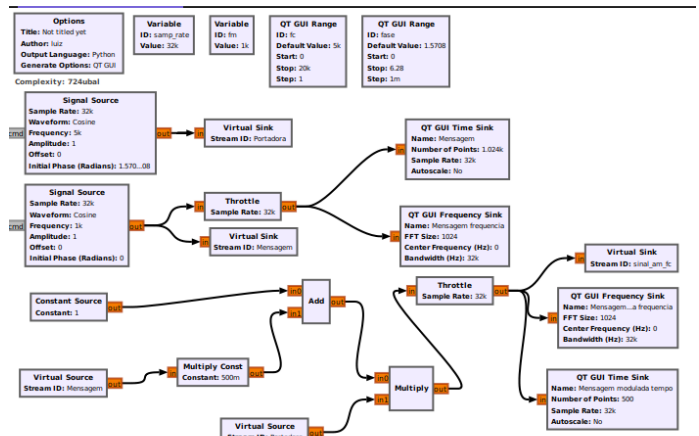


Figura 15. Diagrama de blocos da modulação AM convencional. Fonte: Autor.

- **QT GUI Frequency Sink:** Exibe o espectro demodulado.

Para demonstrar a importância do sincronismo, utilizou-se uma portadora com frequência diferente da do oscilador local no receptor.

#### C. Modulação AM Convencional

Para gerar o sinal AM convencional, adicionou-se uma constante ao sinal de mensagem antes da multiplicação pela portadora. Mantiveram-se os controles de frequência para demonstrar a insensibilidade à fase na demodulação por detector de envoltória.

Os parâmetros e blocos utilizados foram:

- **Signal Source:** Gera o sinal de mensagem (1 kHz, amplitude 1).
- **QT GUI Range:** Ajusta a frequência da portadora (50 Hz a 20 kHz).
- **Add:** Soma uma constante DC de 1 ao sinal de mensagem.
- **Multiply:** Multiplica pelo sinal da portadora.
- **Multiply Const:** Ajusta a amplitude do sinal mensagem (500 mV).
- **Virtual Sink/Source:** Armazena e recupera os sinais.
- **Throttle:** Controla a taxa de amostragem.
- **QT GUI Time/Frequency Sink:** Visualização dos sinais.

O diagrama de blocos é mostrado na Figura 15.

#### D. Demodulação AM Convencional

A demodulação por detector de envoltória foi implementada conforme a Figura 16, utilizando:

- **Virtual Source:** Recebe o sinal modulado.
- **Low Pass Filter:** Filtra o sinal demodulado.
- **Python Block (Retificador):** Implementa a retificação de meia-onda.
- **DC BlockR:** Remove a componente DC.
- **QT GUI Time/Frequency Sink:** Visualização dos resultados.



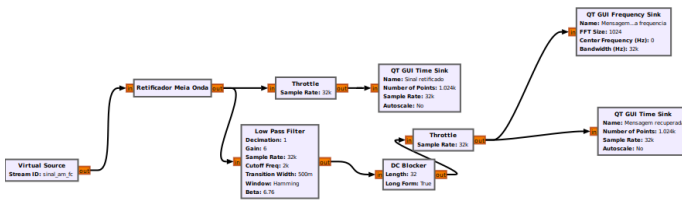


Figura 16. Diagrama de blocos da demodulação AM convencional. Fonte: Autor.

*Implementação em GNU Radio: Retificador de Meia Onda:*  
A seguir, apresenta-se uma implementação em Python de um bloco de retificação de meia onda para sinais reais, utilizando GNU Radio:

```
1 import numpy as np
2 from gnuradio import gr
3
4 class blk(gr.sync_block):
5     """Retificador de meia onda (sinal real)"""
6
7     def __init__(self):
8         gr.sync_block.__init__(
9             self,
10            name='Retificador Meia Onda',
11            in_sig=[np.float32],
12            out_sig=[np.float32]
13        )
14
15     def work(self, input_items, output_items):
16         # zera os valores negativos
17         output_items[0][:] = np.maximum(input_items
18 [0], 0)
19         return len(output_items[0])
```

Código 1. Implementação do retificador de meia onda

#### E. Efeitos da Fase na Demodulação AM Convencional

Ao contrário da modulação DSB-SC, na demodulação AM convencional por detector de envoltória:

- A fase da portadora **não afeta** a demodulação, pois o detector extrai apenas a envoltória do sinal.
- Mesmo com variações de fase na portadora, a mensagem é recuperada sem distorção.
- O detector é insensível à frequência exata da portadora, desde que esta seja suficientemente alta em relação à largura de banda do sinal modulante.

Para demonstrar essa característica:

- Variou-se a fase da portadora através do QT GUI Range.
- Ajustou-se a frequência da portadora para valores diferentes da original.
- Observou-se que a mensagem demodulada mantém sua forma de onda independentemente desses parâmetros.

Esta insensibilidade à fase comprova a vantagem do detector de envoltória em aplicações onde o sincronismo preciso não é viável.

## 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 17. 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.

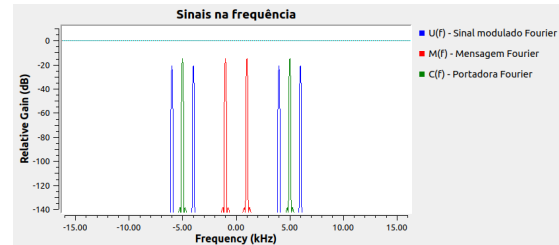


Figura 17. Sinais no domínio da frequência. Fonte: Autor.

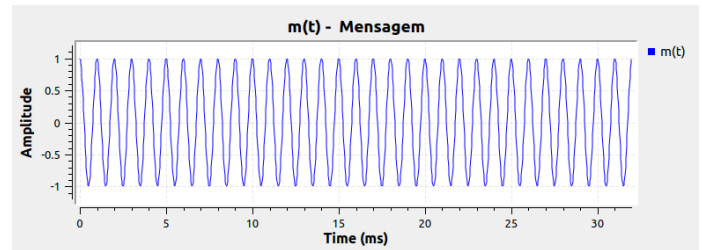


Figura 18. Mensagem no tempo. Fonte: Autor.

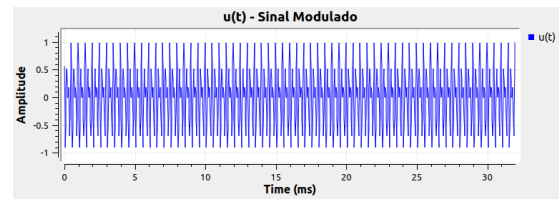


Figura 19. Mensagem modulada DSB-SC. Fonte: Autor.

### 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 para filtrar as componentes de alta frequência geradas pela multiplicação do oscilador local, é possível recuperar o sinal original. A Figura 20 mostra o espectro do sinal após a demodulação, evidenciando a recuperação da senoide de 1 kHz.

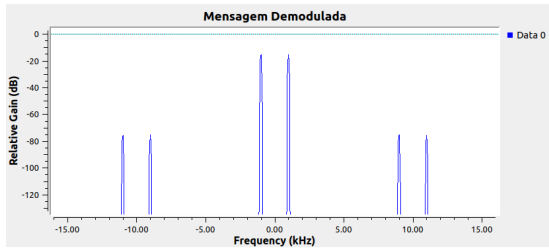


Figura 20. Demodulação do sinal AM-DSB-SC. Fonte: Autor.

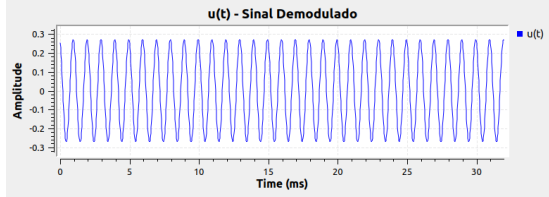


Figura 21. Mensagem no tempo após demodulação. Fonte: Autor.

### C. Falta de Sincronismo e Fase de 90 Graus

Para demonstrar que a demodulação AM-DSB-SC exige sincronismo de fase entre a portadora do transmissor e o oscilador local do receptor, a fase da portadora foi alterada para  $\pi/2$ , evidenciando a perda de informação no espectro. Em seguida, a frequência da portadora foi modificada para 10 kHz, mostrando a necessidade de sincronismo entre os osciladores. A Figura 22 mostra a primeira situação quando deslocamos a fase do oscilador local para  $\pi/2$ , a mensagem é praticamente perdida.

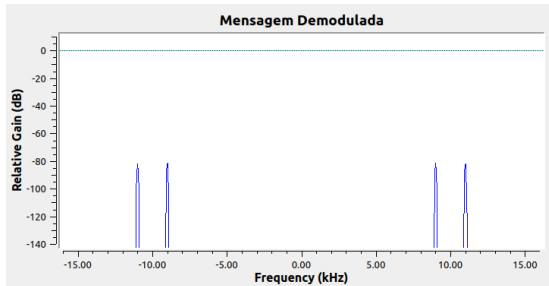


Figura 22. Espectro da mensagem quando não há de sincronismo de fase. Fonte: Autor.

Também temos a perda da informação quando não há o sincronismo de frequência entre a portadora e o oscilador local Figura 23.

Quando temos uma fase diferente de  $90^\circ$ , o sinal da mensagem fica distorcido Figura 24, mesmo que a frequência da portadora seja igual.

### D. Modulação AM

A mensagem enviada corresponde a um cosseno de frequência 1 kHz. Foi colocado uma fase de 90 graus na portadora para evidenciar também que não é necessário sincronismo de fase.

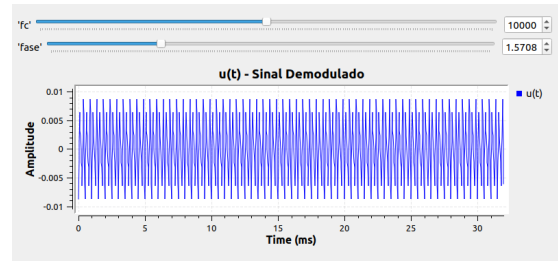


Figura 23. Sinal demodulado sem sincronismo de frequência e fase. Fonte: Autor.

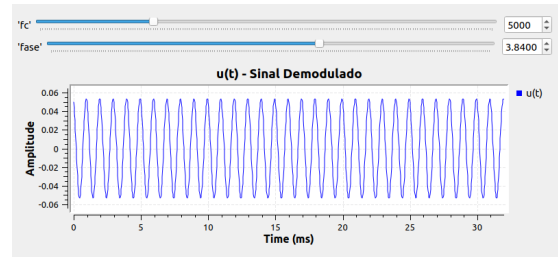


Figura 24. Distorção do sinal quando a frequência é igual à da portadora, mas a fase é diferente de 90 graus. Fonte: Autor.

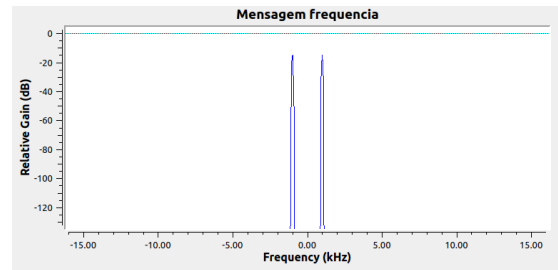


Figura 25. Mensagem transmitida no tempo. Fonte: Autor.

O sinal modulado apresenta uma envoltória correspondente à mensagem, como esperado para modulação AM.

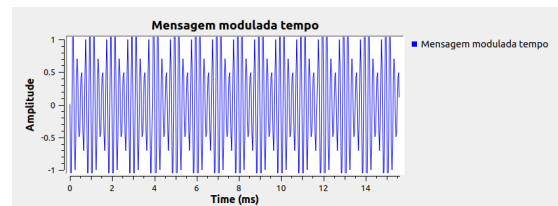


Figura 26. Sinal AM modulado no tempo, mostrando a envoltória. Fonte: Autor.

No domínio da frequência, observa-se um componente em  $f_c$  devido à portadora, além das bandas laterais em torno de  $f_c$  correspondentes à mensagem.

### E. Demodulação AM

A demodulação é realizada inicialmente pela retificação do sinal, obtendo-se um sinal retificado de meia onda.

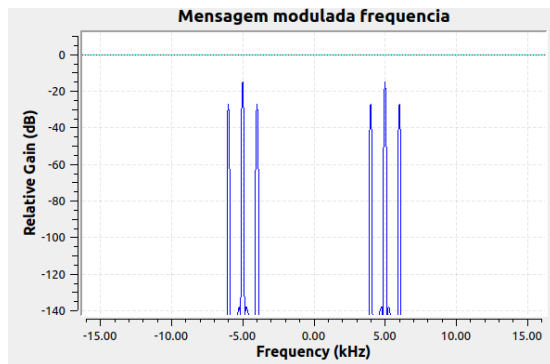


Figura 27. Espectro do sinal AM modulado. Fonte: Autor.

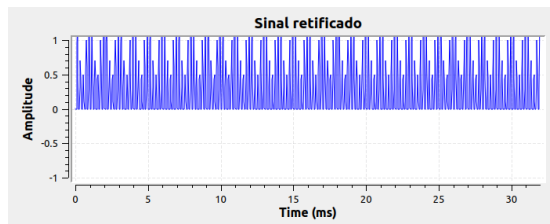


Figura 28. Sinal retificado de meia onda. Fonte: Autor.

Após a filtragem passa-baixa e remoção da componente DC, o espectro do sinal recuperado se assemelha ao da mensagem original.

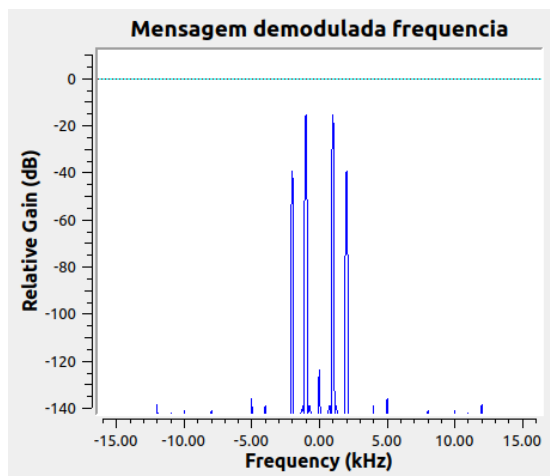


Figura 29. Espectro do sinal demodulado. Fonte: Autor.

A mensagem recuperada pode ser observada no domínio do tempo.

#### F. Falta de Sincronismo em AM

Na demodulação AM por detecção de envoltória, não há problemas relacionados à falta de sincronismo de fase ou frequência, pois o detector de envoltória não depende de oscilador local ou sincronização. Mesmo com alterações na fase ou frequência da portadora, o sinal é recuperado normalmente, conforme mostrado nas figuras anteriores.

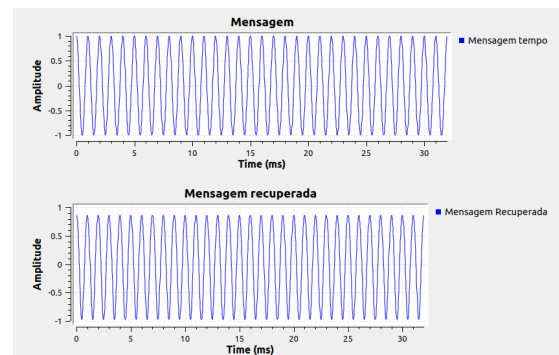


Figura 30. Mensagem recuperada no tempo após demodulação. Fonte: Autor.

## V. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

### A. Discussão

Os resultados obtidos nos experimentos de modulação e demodulação AM-DSB-SC e AM convencional confirmam as expectativas teóricas e destacam as diferenças críticas entre os dois métodos:

- **AM-DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier):**
  - Como demonstrado nas Figuras 17 e 19, a modulação DSB-SC desloca o espectro da mensagem para as bandas laterais em torno da portadora
  - A demodulação coerente (Figuras 20 e 21) exige **sincronismo preciso** de fase e frequência
  - Quando esse sincronismo não é atendido (Figuras 22 e 23), a mensagem é atenuada ou completamente perdida
- **AM Convencional:**
  - Permite demodulação por **detecção de envoltória**
  - O sinal é recuperado mesmo com variações de fase ou frequência da portadora
  - Robustez à falta de sincronismo é uma vantagem em aplicações práticas
- **Eficiência e Aplicações:**
  - O DSB-SC é mais eficiente em potência, mas requer receptores complexos
  - O AM convencional é menos eficiente mas mais simples

### B. Conclusão

Este trabalho demonstrou experimentalmente os princípios da modulação AM-DSB-SC e AM convencional, destacando:

- A **necessidade de sincronismo** na demodulação DSB-SC
- A **insensibilidade à fase** na demodulação AM por detecção de envoltória

As diferenças entre os métodos refletem *trade-offs* entre **eficiência energética** (DSB-SC) e **simplicidade do receptor** (AM convencional).

#### Recomendações para Trabalhos Futuros:

- Implementar um **PLL** no receptor DSB-SC
- Explorar técnicas híbridas (ex.: SSB)



- Avaliar o impacto do ruído na demodulação AM convencional

**Nota Final:** Os resultados validam os fundamentos teóricos e reforçam a importância da escolha do método de modulação com base nas exigências do sistema. O uso do GNU Radio Companion possibilitou uma visualização clara dos efeitos práticos.

#### 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.

#### VI. ARQUIVOS DO PROJETO

Os arquivos utilizados neste projeto podem ser encontrados no seguinte repositório:

- Repositório do Projeto no GitHub