

PRÁTICA 6

Objetivo: Aplicar os conceitos de modulação e demodulação.

MODULADOR AM-DSB

Objetivos:

- Observar na prática os conceitos da modulação AM-DSB.
- Verificar experimentalmente o funcionamento de um modulador AM-DSB síncrono a diodo.

OBJETIVOS

• Observar na prática os conceitos da modulação AM-DSB.

• Verificar experimentalmente o funcionamento de um modulador AM-DSB síncrono a diodo.

TEORIA

Noções sobre modulação

A capacidade do ser humano de ouvir ou captar ondas sonoras está limitada a uma faixa que vai de 20 Hz a 20 kHz. Fisicamente, seria impossível transmitir sinais nessa faixa de frequência por antenas e/ou fibras ópticas. Tomando como exemplo a antena, tem-se que as dimensões físicas da mesma são proporcionais ao comprimento de onda do sinal a ser transmitido, que é dado pela Equação 9.1:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (9.1)$$

em que λ é o comprimento de onda do sinal, c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) e f é a frequência do sinal.

Suponha que se deseja transmitir um sinal de 100 kHz. O comprimento de onda desse sinal é de 3 km. Fisicamente, seria impossível a construção de uma antena dessa ordem de grandeza. Dessa forma, pode-se ver a impossibilidade da transmissão direta.

A transmissão de um sinal elétrico de baixa frequência acarreta um grande comprimento de onda, impossibilitando a transmissão desse sinal por ondas de rádio. Para diminuir o comprimento de onda basta aumentar sua frequência. Isso é possível utilizando-se outro sinal elétrico de frequência elevada, mediante a alteração de algumas de suas características, o que permitirá o transporte do sinal de informação.

O sinal de informação é chamado de sinal modulante, e o sinal de alta frequência é chamado de portadora. O resultado da modificação da portadora de maneira

proporcional à informação é chamado de sinal modulado, e o processo que envolve a geração desse sinal é conhecido por modulação.

Modulação é um processo que consiste em alterar uma ou mais características da onda portadora, proporcionalmente ao sinal modulante, sendo a amplitude, a frequência ou a fase as características que podem ser modificadas.

Um dos primeiros métodos de modulação foi a modulação em amplitude (Amplitude Modulation – AM). A modulação AM se divide em quatro tipos principais:

- AM-DSB (Amplitude Modulation – Double side band) — Modulação em amplitude com banda lateral dupla.
- AM-DSB/SC (Amplitude Modulation – Double side band/suppressed carrier) — Modulação em amplitude com banda lateral dupla e portadora suprimida.
- AM-SSB (Amplitude Modulation – Single side band) — Modulação em amplitude com banda lateral única.
- AM-VSB (Amplitude Modulation – Vestigial side band) — Modulação em amplitude com banda lateral em vestígio.

O princípio da modulação AM-DSB consiste no fato de que o sinal modulante interfere exclusiva e diretamente na amplitude da portadora. Considere que a portadora será dada por:

$$e_0 = E_0 \cos(\omega_0 t) \quad (9.2)$$

Enquanto o sinal modulante será:

$$e_m = E_m \cos(\omega_m t) \quad (9.3)$$

O sinal modulado será dado por:

$$e(t) = [E_0 + e_m(t)] \cos(\omega_0 t) \quad (9.4)$$

Substituindo a Equação 9.3 na Equação 9.4, tem-se:

$$e(t) = E_0 \left[1 + \frac{E_m}{E_0} \cos(\omega_m t) \right] \cos(\omega_0 t) \quad (9.5)$$

A relação E_m/E_0 é chamada de índice de modulação e simbolizada por m . Assim:

$$e(t) = E_0 [1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_0 t) \quad (9.6)$$

A Equação 9.6 pode ser reescrita como:

$$e(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{mE_0}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_m)t] + \frac{mE_0}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_m)t] \quad (9.7)$$

em que, $E_0 \cos(\omega_0 t)$ é a portadora, $\frac{mE_0}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_m)t]$ é a banda lateral superior, e $\frac{mE_0}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_m)t]$ é a banda lateral inferior para $f_0 >> f_m$.

O sinal modulante e a portadora têm formas de onda conhecidas, que são mostradas na Figura 9.1.

A forma de onda do sinal modulado pode ser facilmente obtida mediante uma análise da Equação 9.4. No instante $t = 0$, tem-se que $e_m(t) = E_m \cos(\omega_m t)$, assim, $e(t) = E_0 + E_m \cos(\omega_m t)$. Na medida em que o tempo vai passando, o valor instantâneo da amplitude varia com a frequência f_m e o valor da função $e(t)$ varia com a frequência f_0 . O sinal modulado tem a forma de onda ilustrada na Figura 9.2.

O sinal modulante e a portadora são sinais cossenoideais; logo, seus espectros de amplitude são raias simples, como mostra a Figura 9.3.

A partir da Equação 9.7 podemos obter o espectro de amplitudes do sinal modulado. Pode-se observar que o sinal modulado é formado por três sinais cossenoideais, apresentando três raias no domínio da frequência, conforme ilustra a Figura 9.4.

O índice de modulação é a relação entre as amplitudes do sinal modulante e da portadora. As amplitudes do sinal modulado são funções dessas duas amplitudes. Desta forma, a relação dada pelo índice de modulação é extremamente importante na determinação da forma de onda do sinal modulado.

O índice de modulação é dado por:

$$(9.8) \quad m = \frac{E_m}{E_0}$$

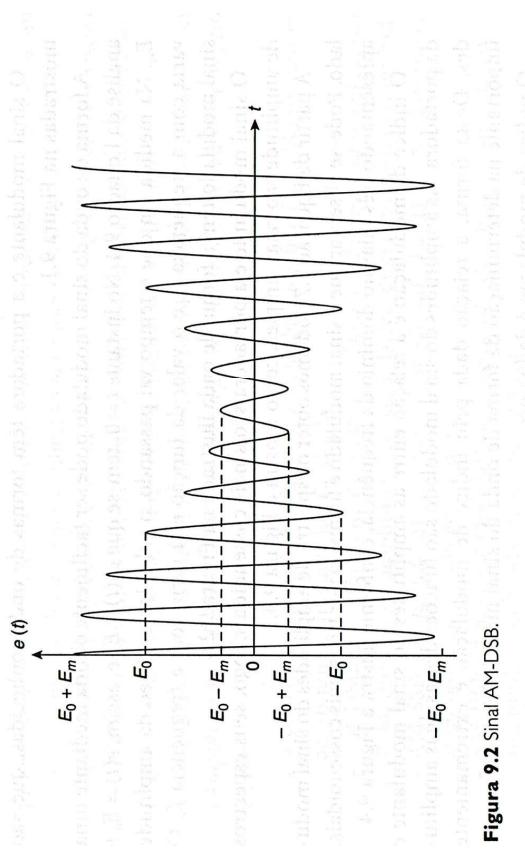
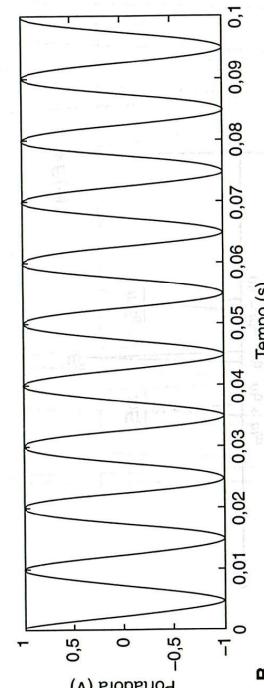
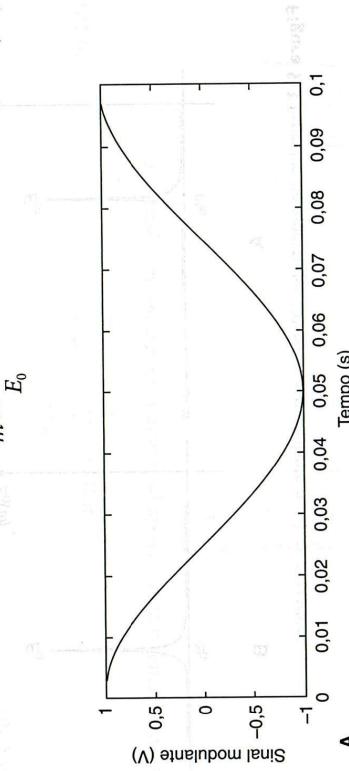


Figura 9.2 Sinal AM-DSB.

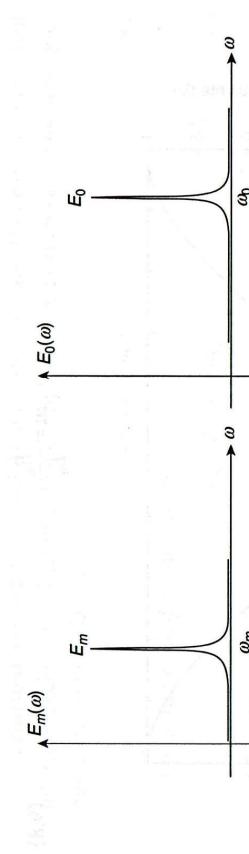


Figura 9.3 Espectro de amplitudes (a) do sinal modulante e (b) da portadora.

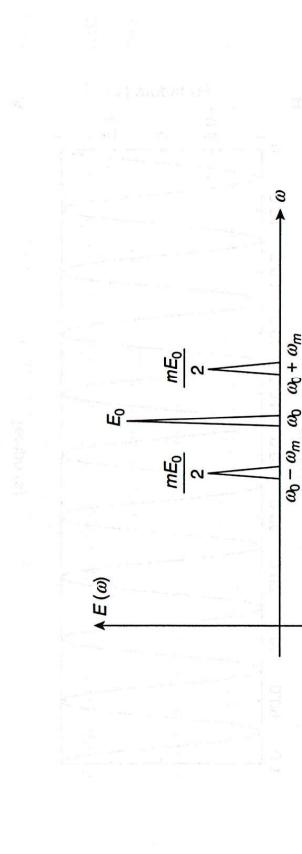


Figura 9.4 Espectro de amplitudes do sinal AM-DSB.

Assim, se $0 < m < 1$, $E_0 - E_m > 0$, e a forma de onda é aquela vista na Figura 9.3.

Esse é o caso mais comum na transmissão de sinais AM-DSB.

Se $m = 1$, $E_0 - E_m = 0$, e o sinal modulado assume a forma de onda vista na Figura 9.5. Pode-se perceber que a envoltória tangencia o eixo do tempo.

Se $m > 1$, $E_0 - E_m < 0$ e ocorre uma passagem da envoltória para a região oposta em relação ao eixo temporal, como mostra a Figura 9.6.

Visualizando a forma de onda da Figura 9.6 mais de perto, pode-se observar que houve uma inversão de fase da portadora, mostrada pela Figura 9.7, e que representa uma grande distorção no sinal modulado, já que os demoduladores AM-DSB convencionais não seriam capazes de recuperar a informação a partir desse sinal modulado.

O espectro de potência para o espectro de amplitudes da Figura 9.5 pode ser obtido como é demonstrado a seguir.

A potência da portadora é

$$P_0 = \frac{E_0^2}{2} \quad (9.9)$$

As potências das bandas laterais (PBL) inferior e superior são idênticas e calculadas como

$$PBL = \frac{\left(\frac{mE_0}{2}\right)^2}{2} = \frac{m^2E_0^2}{8} \quad (9.10)$$

Dessa forma, o espectro de potência é mostrado na Figura 9.8.

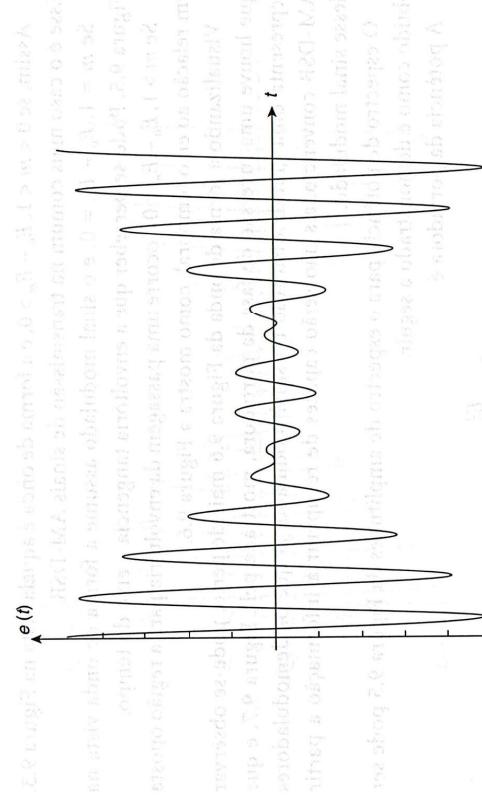


Figura 9.5 Portadora totalmente modulada.

Assim, se $0 < m < 1$, $E_0 - E_m > 0$, e a forma de onda é aquela vista na Figura 9.3.

Esse é o caso mais comum na transmissão de sinais AM-DSB.

Se $m = 1$, $E_0 - E_m = 0$, e o sinal modulado assume a forma de onda vista na Figura 9.5. Pode-se perceber que a envoltória tangencia o eixo do tempo.

Se $m > 1$, $E_0 - E_m < 0$ e ocorre uma passagem da envoltória para a região oposta em relação ao eixo temporal, como mostra a Figura 9.6.

Visualizando a forma de onda da Figura 9.6 mais de perto, pode-se observar que houve uma inversão de fase da portadora, mostrada pela Figura 9.7, e que representa uma grande distorção no sinal modulado, já que os demoduladores AM-DSB convencionais não seriam capazes de recuperar a informação a partir desse sinal modulado.

O espectro de potência para o espectro de amplitudes da Figura 9.5 pode ser obtido como é demonstrado a seguir.

A potência da portadora é

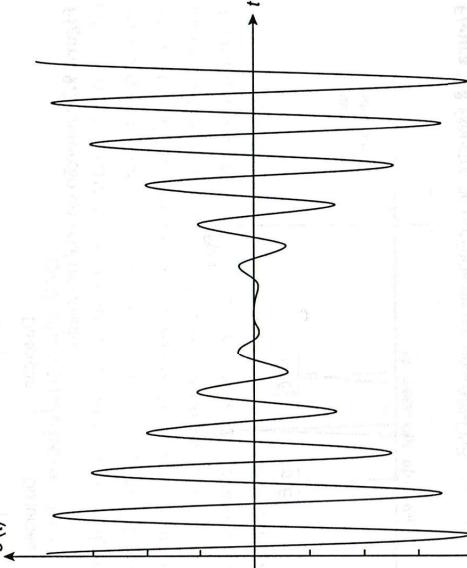


Figura 9.5 Portadora totalmente modulada.

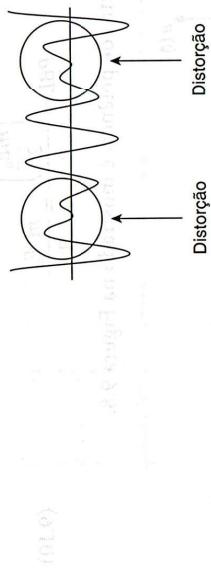


Figura 9.6 Portadora sobremodulada.

Assim, se $0 < m < 1$, $E_0 - E_m > 0$, e a forma de onda é aquela vista na Figura 9.3.

Esse é o caso mais comum na transmissão de sinais AM-DSB.

Se $m = 1$, $E_0 - E_m = 0$, e o sinal modulado assume a forma de onda vista na Figura 9.5. Pode-se perceber que a envoltória tangencia o eixo do tempo.

Se $m > 1$, $E_0 - E_m < 0$ e ocorre uma passagem da envoltória para a região oposta em relação ao eixo temporal, como mostra a Figura 9.6.

Visualizando a forma de onda da Figura 9.6 mais de perto, pode-se observar que houve uma inversão de fase da portadora, mostrada pela Figura 9.7, e que representa uma grande distorção no sinal modulado, já que os demoduladores AM-DSB convencionais não seriam capazes de recuperar a informação a partir desse sinal modulado.

O espectro de potência para o espectro de amplitudes da Figura 9.5 pode ser obtido como é demonstrado a seguir.

A potência da portadora é

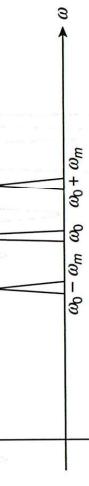


Figura 9.6 Portadora sobremodulada.

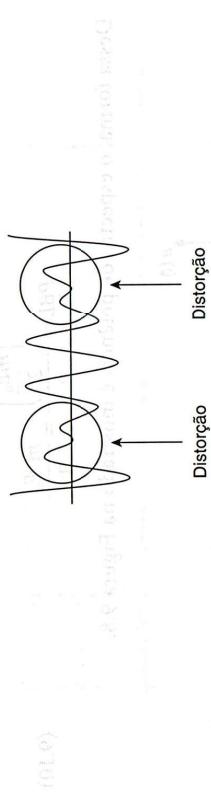


Figura 9.7 Distorção.

Assim, se $0 < m < 1$, $E_0 - E_m > 0$, e a forma de onda é aquela vista na Figura 9.3.

Esse é o caso mais comum na transmissão de sinais AM-DSB.

Se $m = 1$, $E_0 - E_m = 0$, e o sinal modulado assume a forma de onda vista na Figura 9.5. Pode-se perceber que a envoltória tangencia o eixo do tempo.

Se $m > 1$, $E_0 - E_m < 0$ e ocorre uma passagem da envoltória para a região oposta em relação ao eixo temporal, como mostra a Figura 9.6.

Visualizando a forma de onda da Figura 9.6 mais de perto, pode-se observar que houve uma inversão de fase da portadora, mostrada pela Figura 9.7, e que representa uma grande distorção no sinal modulado, já que os demoduladores AM-DSB convencionais não seriam capazes de recuperar a informação a partir desse sinal modulado.

O espectro de potência para o espectro de amplitudes da Figura 9.5 pode ser obtido como é demonstrado a seguir.

A potência da portadora é

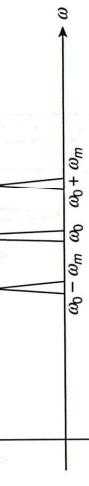


Figura 9.7 Distorção.

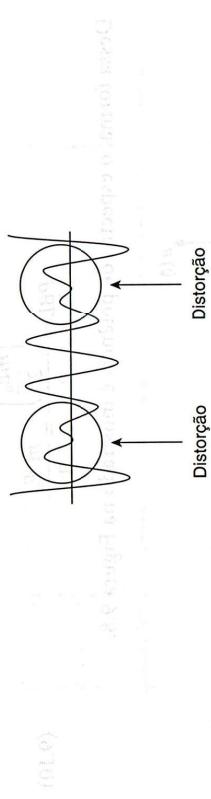


Figura 9.8 Espectro de potência de um sinal AM-DSB.

A potência média do sinal modulado será

$$P_m = P_0 + PBLL + PBLS = \frac{E_0^2}{2} + \frac{m^2 E_0^2}{4} \quad (9.11)$$

É possível determinar o percentual total de potência média utilizado na transmissão da portadora e isso se justifica na medida em que sua amplitude é fixa, e, consequentemente, não transporta informação alguma.

Admita o caso mais favorável para as raias que transportam informação, aquele em que o índice de modulação é unitário. A potência média nesse caso será $P_m = \frac{3E_0^2}{4}$.

A potência utilizada na transmissão da portadora é $P_0 = \frac{E_0^2}{2}$. Para esse caso, a relação entre potência da portadora e potência total transmitida é

$$\eta_p = \frac{P_0}{P_m} \cdot 100\% = \frac{E_0^2}{2} \cdot \frac{4}{3E_0^2} \cdot 100\% = 66,7\%, \quad (9.12)$$

o que equivale a dizer que, no mínimo, a transmissão da portadora exige, aproximadamente, 67% da potência média total do sinal. Uma expressão geral para o rendimento de transmissão de um sinal AM-DSB pode ser obtida como $1 - \eta_p$, vista na Equação 9.13, sendo fácil notar que a variação do índice de modulação faz variar o rendimento do sistema.

$$\eta = \frac{m^2}{2 + m^2} \cdot 100\% \quad (9.13)$$

Implementação prática de um modulador AM-DSB

Moduladores AM-DSB podem ser do tipo síncrono ou quadrático. O modulador síncrono aproveita as características de um elemento não linear, para produzir intermodulação quando injetarmos dois sinais de frequências diferentes. Os moduladores síncronos funcionam como se fossem chaves que abrem e fecham com a mesma frequência da onda portadora. A Figura 9.9 ilustra o diagrama de blocos de um modulador síncrono.



Figura 9.9 Diagrama de blocos de um modulador síncrono.

A saída obtida é o sinal e_2 que é obtido através da função:



Figura 9.10 Elemento não linear: (a) bloco representativo e (b) função de transferência.

O circuito somador pode ser implementado apenas com resistores. A chave síncrona deve ser implementada com algum elemento não linear, como diodos ou transistores. O elemento não linear tem uma resposta quase quadrática, e seu bloco representativo e sua função de transferência são ilustrados na Figura 9.10.

A relação entre as tensões e_2 e e_1 é

$$e_2(t) = b_1 e_1(t) + b_2 e_1^2(t) \quad (9.14)$$

Sendo $e_1(t)$ dada por

$$e_1(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) + E_m \cos(\omega_m t) \quad (9.15)$$

Substituindo 9.15 em 9.14, temos:

$$e_2(t) = b_1 [E_0 \cos(\omega_0 t) + E_m \cos(\omega_m t)] + b_2 [E_0 \cos(\omega_0 t) + E_m \cos(\omega_m t)]^2 \quad (9.16)$$

Desenvolvendo a Equação 9.16, de $e_2(t)$, obtem-se:

$$\begin{aligned} e_2(t) &= b_1 E_0 \cos(\omega_0 t) + b_1 E_m \cos(\omega_m t) + \frac{b_2 E_0^2}{2} + \frac{b_2 E_m^2}{2} \cos(2\omega_0 t) \\ &\quad + b_2 E_0 E_m \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \frac{b_2 E_m^2}{2} + \frac{b_2 E_m^2}{2} \cos(2\omega_m t) \end{aligned} \quad (9.17)$$

Da Equação 9.17 pode-se notar que estão presentes: o sinal modulante [$b_1 E_m \cos(\omega_m t)$], a portadora [$b_1 E_0 \cos(\omega_0 t)$], uma componente de corrente contínua ($\frac{b_2 E_0^2}{2} + \frac{b_2 E_m^2}{2}$) as bandas laterais [$b_2 E_0 E_m \cos(\omega_0 + \omega_m)t$ e $b_2 E_0 E_m \cos(\omega_0 - \omega_m)t$] e componentes de segunda harmônica de f_0 e de f_m e de f_m e $b_2 E_m^2 \cos(2\omega_m t)$.

O espectro desse sinal é ilustrado na Figura 9.11.

Para obter um sinal AM-DSB, basta aplicar uma filtragem passa-faixa usando um filtro com frequência central igual à frequência da portadora (f_0). O filtro passa-faixa deve ser um circuito ressonante LC.

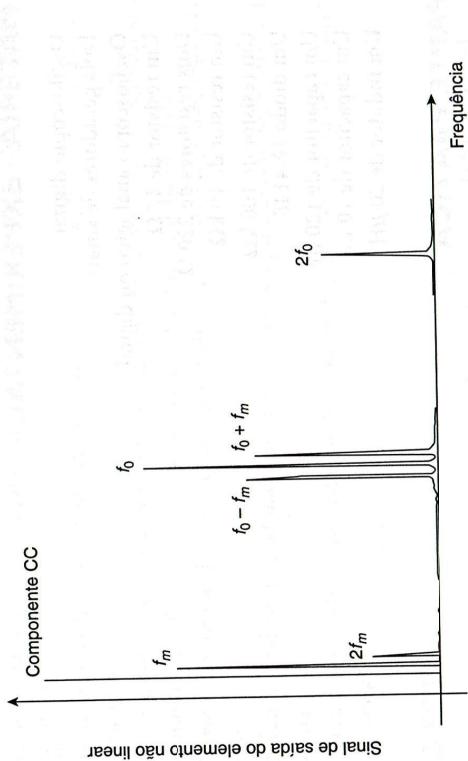


Figura 9.11 Espectro de saída do elemento quadrático.

Um circuito modulador AM-DSB pode ser implementado como o da Figura 9.12. Esse circuito utiliza um diodo como elemento quadrático e um circuito LC em paralelo como filtro passa-faixa.

Como qualquer circuito eletrônico, o modulador AM-DSB pode apresentar distorções. Uma dessas distorções é a distorção linear. A distorção linear que pode ocorrer na modulação AM-DSB está relacionada diretamente com a distorção linear presente em cada bloco do circuito modulador, nas respectivas faixas de freqüência de atuação. Os blocos mais críticos são os filtros, já que para exercer sua finalidade devem apresentar variação em freqüência do módulo do coeficiente de transmissão. Sempre há um compromisso entre faixa de transição e distorção linear quando as faixas de passagem e de rejeição encontram-se muito próximas.

MATERIAL EXPERIMENTAL

- Osciloscópio digital
- Dois geradores de sinais
- Osciloscópio analógico ou digital
- Um resistor de 47 Ω
- Dois resistores de 220 Ω
- Um resistor de 10 k Ω
- Um resistor de 100 k Ω
- Um diodo IN4148
- Um capacitor de 120 nF
- Um capacitor de 10 nF
- Um indutor de 20 μ H

PARTE PRÁTICA

- Monte o circuito da Figura 9.13:

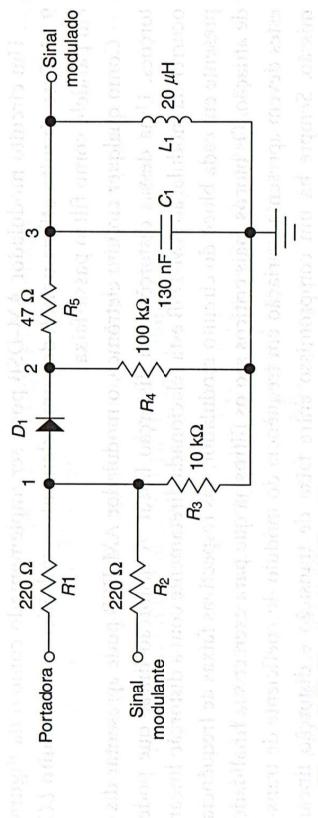


Figura 9.13 Circuito AM-DSB prático. Verifique a descrição da literatura, a tabela de componentes e a figura 9.12 para auxiliar no projeto.

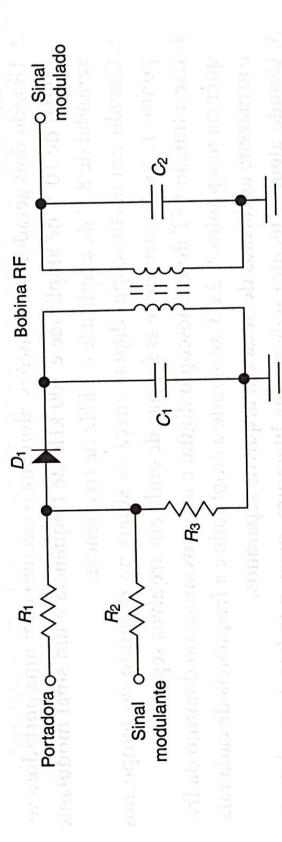


Figura 9.12 Circuito modulador AM-DSB a diodo.

- Usando dois geradores de funções, alimente o circuito com uma portadora senoidal de 10 V de amplitude e 100 kHz de freqüência e um sinal modulante senoidal de 8 V de amplitude e 5 kHz de freqüência.
- Usando um osciloscópio digital, meça os sinais no domínio do tempo nos pontos 1, 2 e 3 e armazene as formas de onda em arquivos separados.
- Usando FFT do osciloscópio digital e meça os sinais no domínio da freqüência nos pontos 1, 2 e 3, anotando a amplitude e a freqüência de cada raia, e armazene as formas de onda em arquivos separados.
- Usando alguma técnica indicada na literatura, meça o índice de modulação do sinal modulado.

6. Varie a amplitude do sinal modulante até obter um índice de modulação (m) igual a 1.
7. Meça o sinal modulado no domínio do tempo, para $m = 1$, e armazene a forma de onda.
8. Meça o sinal modulado no domínio da frequência, para $m = 1$, anotando a amplitude e a frequência de cada raia, e armazene a forma de onda.
9. Varie a amplitude do sinal modulante mais uma vez até obter sobremodulação.
10. Meça o sinal sobremodulado no domínio do tempo e armazene a forma de onda.
11. Meça o sinal sobremodulado no domínio da frequência e armazene a forma de onda.

PRÁTICA 7

DEMODULADOR AM-DSB

- QUESTÕES**
1. Explique a função de cada componente no circuito modulador AM-DSB.
 2. Obtenha uma expressão matemática para os sinais dos pontos 1, 2 e 3.
 3. Usando o Matlab ou outro software matemático/científico qualquer, obtenha os gráficos das funções da Questão 2.
 4. Compare os gráficos obtidos com os medidos no Item 3 da Parte Prática.
 5. Usando a decomposição de sinais através de série de Fourier, obtenha os coeficientes da série para os sinais obtidos no domínio do tempo.
 6. Normalize os valores medidos das raias no Item 4 da Parte Prática com relação à maior amplitude.
 7. Para os resultados obtidos nas Questões 5 e 6, compare os valores medidos com os calculados, usando o erro percentual.
 8. Compare o índice de modulação medido com o calculado usando o erro percentual.
 9. Repita as Questões 4 e 5 para o sinal modulado com $m = 1$.
 10. Repita as Questões 4 e 5 para o sinal sobremodulado.
 11. Explique o que ocorre na sobremodulação e como isso pode afetar o sinal demodulado na prática.

OBJETIVOS

- Observar na prática os conceitos da demodulação AM-DSB.
- Verificar experimentalmente o funcionamento de um demodulador AM-DSB síncrono a diodo.

TEORIA

Noções sobre demodulação AM-DSB

Assim como os moduladores AM-DSB podem ser do tipo síncrono ou quadrático, os demoduladores também podem. O princípio de funcionamento do demodulador síncrono é o mesmo do modulador. Ele utiliza uma chave sincronizada com a frequência da portadora. A Figura 10.1 ilustra o diagrama de blocos de um demodulador síncrono.

A chave síncrona deve ser implementada com algum elemento não linear, como diodos ou transistores. O filtro passa-baixas é um circuito RC simples. Se observarmos a forma de onda da Figura 10.2, veremos que o sinal modulante (informação) forma uma envoltória (ou envelope) na portadora. Assim, para recuperarmos o sinal modulante, basta detectarmos uma das duas envoltórias. Talvez essa simplicidade na demodulação seja o motivo do sinal AM-DSB ter se tornado tão popular.

O demodulador AM-DSB pode utilizar um dispositivo eletrônico não linear, que tem uma função de transferência quadrática, conforme ilustrado na Figura 10.3.

A resposta não linear de componentes eletrônicos costuma ser uma exponencial que pode ser aproximada por uma série do tipo:

$$e^x = a + bx + cx^2 + dx^3 \dots \quad (10.1)$$

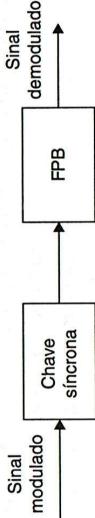


Figura 10.1 Diagrama de blocos de um demodulador síncrono.