

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E COMPUTAÇÃO

DISCIPLINA: PRINCÍPIOS DE TELECOMUNICAÇÕES

Estudo sobre Modulação de Sinais

Autores: Caio S. Guedes <caio_ee@hotmail.com> Marcelo Brum <marcelobrum.rs@gmail.com>
Renan Birck Pinheiro <renan.ee.ufsm@gmail.com>.

Santa Maria, 30 de Junho de 2012.

Conteúdo

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 2 |
| 2 | Experimento 1: Modulação AM a diodo | 3 |
| 2.1 | Fundamentação Teórica | 3 |
| 2.1.1 | Modulação em Amplitude com Portadora Suprimida (AM-DSB-SC) | 3 |
| 2.1.2 | Modulação em Amplitude com Portadora (AM-DSB) | 4 |
| 2.2 | Procedimento experimental | 4 |
| 2.2.1 | Modulação por diodo | 7 |
| 2.2.2 | Demodulação do sinal | 7 |
| 3 | Experimento 2: Modulação AM a transistor | 8 |
| 4 | Experimento 3: Transmissão e recepção de FM; modulação em fase | 9 |
| 4.1 | Fundamentação teórica | 9 |
| 4.2 | Modulação FM | 9 |
| 4.3 | Modulação em fase | 9 |
| 4.4 | Demodulação de FM | 9 |
| 4.4.1 | Detector de Quadratura | 10 |
| 4.4.2 | <i>Phase-locked Loop</i> (PLL) | 10 |
| 4.4.3 | Detector de Foster-Seeley | 10 |
| 5 | Experimento 4: Modulação por código de pulso (PCM) | 11 |
| 5.1 | Introdução | 11 |
| 6 | Conclusão | 12 |

Capítulo 1

Introdução

Em telecomunicações, modulação é a modificação de uma onda eletromagnética, para que informação seja transportada por meio de uma onda portadora. Normalmente seu objetivo é facilitar a comunicação através da redução do tamanho das antenas de receptor e transmissor.

Neste trabalho serão abordadas as práticas feitas em laboratório, na disciplina de Princípios de Telecomunicações, visando estudar o funcionamento das modulações em amplitude (AM) e em frequência (FM). Também será abordada a modulação por códigos de pulso (PCM).

Capítulo 2

Experimento 1: Modulação AM a diodo

2.1 Fundamentação Teórica

Para ambas as modulações, sejam:

- um sinal senoidal modulante dado por

$$v_s = A_s \cos(\omega_s t + \phi) \quad (2.1)$$

- uma portadora dada por

$$v_c = A_c \cos(\omega_c t + \phi) \quad (2.2)$$

tal que $\omega_c > \omega_s$. A fase dos sinais é fixa em 0, assim eliminando-se ϕ .

2.1.1 Modulação em Amplitude com Portadora Suprimida (AM-DSB-SC)

Nos domínios do tempo e da frequência ela é dada por

$$v_m = v_s v_c = A_s A_c \cos(\omega_s t) \cos(\omega_c t) \quad (2.3)$$

o que no domínio da frequência dá

$$\mathcal{F}(V_m) = \frac{A_s A_c \delta(\omega_s - \omega_c) + \delta(\omega_s + \omega_c)}{2} \quad (2.4)$$

representado no gráfico

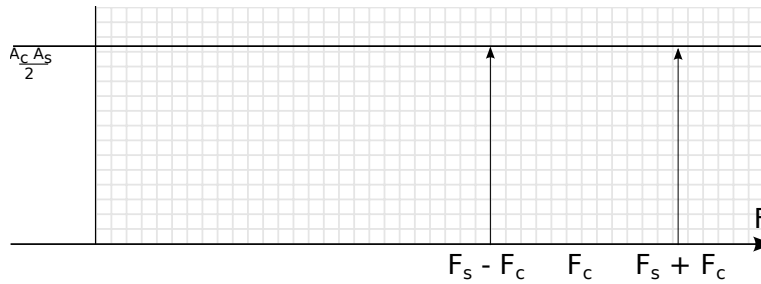


Figura 2.1: O sinal AM-DSB-SC no domínio da frequência.

O principal problema dessa modulação é que o receptor precisa gerar sua própria portadora para demodulação do sinal. Se ela não estiver sintonizada na exata frequência da portadora original, tem-se a distorção do sinal demodulado.

2.1.2 Modulação em Amplitude com Portadora (AM-DSB)

Nesta modulação, transmite-se a portadora juntamente ao sinal, simplificando a demodulação. Então a modulação pode ser escrita como

$$v_m = \underbrace{v_s v_c}_{AM-DSB-SC} + \underbrace{v_c}_{portadora\ adicional} = v_c [1 + v_s] \quad (2.5)$$

e assim no domínio da frequência tem-se que o espectro deste sinal é dado por

$$\mathcal{F}(V_m) = \frac{A_s A_c \delta(\omega_s - \omega_c) + \delta(\omega_s + \omega_c) + A_c \delta(\omega_c)}{2} \quad (2.6)$$

Dessa forma, perde-se eficiência mas a demodulação se torna mais simples, como será visto no decorrer deste capítulo.

2.2 Procedimento experimental

Problema proposto:

Implemente o circuito da Figura 1 e calcule a frequência de ressonância do filtro passa faixa. Ajuste a frequência de $E_o(t)$ para o valor calculado. Ajuste a frequência de $a(t)$ para 1KHz. Faça a amplitude de $E_o(t)$ igual a 10V pico a pico e a de $a(t)$ 3V pico a pico. Apresente suas conclusões a respeito do uso do filtro e da frequência de ressonância obtida.

O circuito da figura 2.2 foi montado em uma *protoboard*:

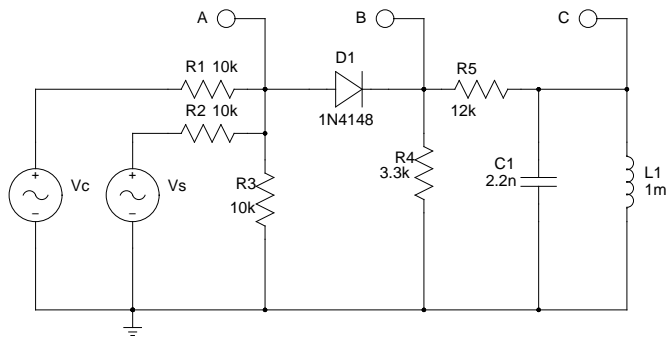


Figura 2.2: Modulador AM a diodo.

Para sintonizar a portadora, calcula-se a frequência de ressonância do filtro LC da saída:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Para os valores fornecidos ($C = 2,2nF$ e $L = 1000\mu F$) ter-se-á que essa frequência será de cerca de 107 KHz.

Após sintonizados os sinais de portadora e da modulante, na saída (ponto C) constata-se a modulação do sinal. Neste contexto, o indutor e o capacitor agem no sentido de limitar a faixa de frequência do sinal modulado.

Disto se determinam:

- **Frequências dos sinais portador e modulante:** 107 KHz e 1 KHz, respectivamente.
- **Forma de onda:**

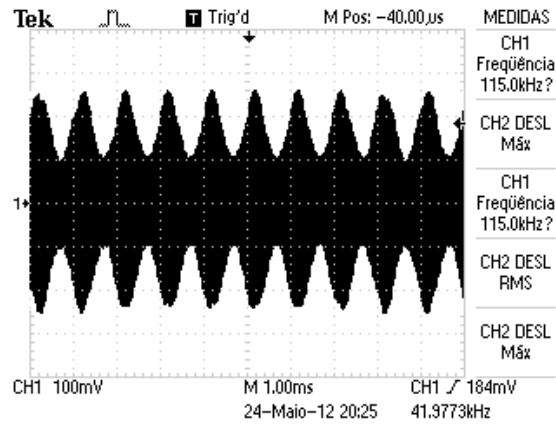


Figura 2.3: Sinal à saída do modulador (ponto C no esquemático).

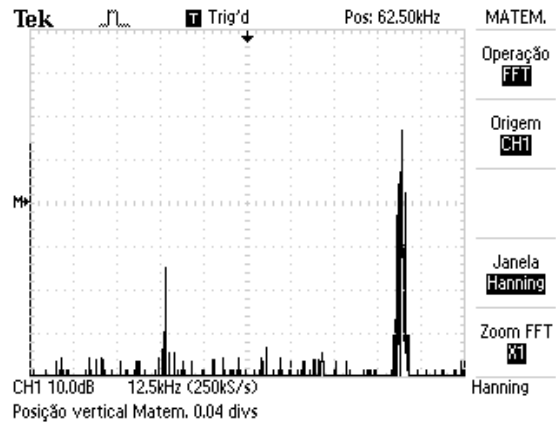


Figura 2.4: Espectro de frequência deste sinal.

Pelo espectro verifica-se que a modulação é do tipo **AM-DSB**.

- **Índice de modulação:** O índice de modulação (I_m), para um sinal puramente senoidal, é calculado por

$$I_m = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{max} + M_{min}} \quad (2.8)$$

Do gráfico 2.3 mede-se aproximadamente $M_{min} = 100 \text{ mV}$ e $M_{max} = 240 \text{ mV}$; colocando-se esses valores na equação 2.8 tem-se que $I_m \approx 41,17\%$.

- **Potência média do sinal:**

A potência média do sinal, assumido que ele esteja ligado à uma carga de 1Ω , pode ser calculada por

$$P = \frac{V_m^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 dt \quad (2.9)$$

pode-se demonstrar que no nosso caso isso resulta em

$$P = \frac{V_p^2}{2} \quad (2.10)$$

Considerando as bandas laterais teremos que

$$P_t = \frac{E_p^2}{2} + \frac{I_m^2 E_p^2}{4} \quad (2.11)$$

2.2.1 Modulação por diodo

Pergunta:

Explique como o diodo possibilita a modulação do sinal $E_o(t)$ no circuito implementado na matriz de contatos e apresente o equacionamento que demonstra tal método de modulação.

Suponhamos o diodo como uma chave que permite apenas a passagem da região positiva da onda da portadora. Esse diodo pode ser considerado como um dispositivo não linear, expresso por $e_1(t) = ae_0(t) + be_0^2(t)$.

Ao diodo chega a soma dos sinais da portadora e da modulante: $e_0(t) = v_s + v_c$.

2.2.2 Demodulação do sinal

Capítulo 3

Experimento 2: Modulação AM a transistor

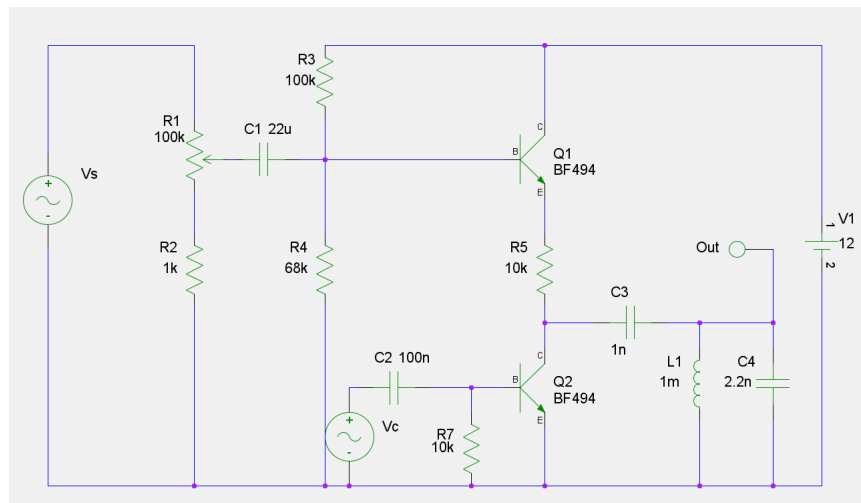


Figura 3.1: Modulador AM a transistor.

O sinal modulado é gerado utilizando-se os transistores BF494 [3], de alta frequência (até 120 MHz, conforme sua *datasheet*). O sinal de áudio oscila pelo transistor Q_1 , e a portadora pelo transistor Q_2 . Tal circuito age como um multiplicador para os sinais. A junção desses sinais é feita no capacitor C_3 , que já remove o nível DC que existe na saída dos transistores como consequência da polarização, e o filtro LC formado por L_1 e C_4 tratará de permitir apenas o sinal de frequência desejada.

Capítulo 4

Experimento 3: Transmissão e recepção de FM; modulação em fase

4.1 Fundamentação teórica

4.2 Modulação FM

4.3 Modulação em fase

Seja uma portadora dada por

$$v_p = A_p \sin(\omega_p t + \phi_p). \quad (4.1)$$

e uma modulante dada por uma função v_s qualquer. Assim teremos que o sinal modulado ficará

$$v_m = A_p \sin(\omega_p t + v_s + \phi_p) \quad (4.2)$$

No receptor haverá um circuito que medirá essa variação de fase, decodificando-na em um sinal.

A modulação de fase (PM – *phase modulation*) não é amplamente utilizada em transmissões de rádio, devido principalmente a tendência desse tipo de modulação necessitar de um equipamento mais complexo no recebimento do sinal, e também pela possibilidade de ocorrerem alguns problemas de ambiguidade na mudança do sinal (por exemplo, uma mudança de $+180^\circ$ ou -180° seria a mesma).

Para a modulação em fase, temos uma mudança na fase da portadora.

4.4 Demodulação de FM

A demodulação deste tipo de sinal é muito mais complexa do que a demodulação feita para os sinais em amplitude modulada. As principais estratégias para a demodulação são:

4.4.1 Detector de Quadratura

O detector de quadratura divide o sinal modulado em dois. Um dos sinais passa através de um capacitor de alta reatância, assim deslocando a fase do sinal em 90 graus. Esse sinal é aplicado então a um circuito LC, cuja frequência natural de ressonância é a mesma da portadora. Se a frequência do sinal modulado em frequência for igual à da portadora, os dois sinais então terão um defasamento de 90 graus entre eles, ou seja, estarão em *quadratura de fase*.

Os dois sinais são então multiplicados juntos em um dispositivo analógico ou digital que funciona como um detector de fase, isto é, um dispositivo o qual sua saída é proporcional a diferença de fase dos dois sinais. No caso de um sinal recebido que não tenha sido modulado, a saída do detector de fase será, em média, zero. No caso de um sinal modulado, então haverá uma diferença na frequência deste sinal em relação a frequência central (frequência da portadora), neste caso o circuito LC ressonante vai deslocar a fase do sinal recebido do capacitor, sendo assim a variação total da fase do sinal serão os 90 graus impostos pelo defasamento do capacitor e mais uma variação (positiva ou negativa) imposta pelo circuito LC. A saída do detector de fase agora difere de zero, e dessa forma o sinal original usado para modular a onda da portadora pode ser recuperado.

4.4.2 Phase-locked Loop (PLL)

O laço de bloqueio de fase não necessita de um circuito LC ressonante para realizar a demodulação. Ele é composto de um bloco detector ou comparador de fase, um filtro passa-baixa e um VCO (voltage controlled oscillator). Neste sistema, o oscilador controlado por tensão tem sua fase bloqueada por um laço de realimentação negativa, forçando o VCO a seguir as variações do sinal modulado de entrada. A tensão resultante de baixa frequência que sai do filtro passa-baixa e faz com que o VCO siga a frequência do sinal de entrada é o sinal demodulado.

4.4.3 Detector de Foster-Seeley

Este circuito foi criado em 1936 por Dudley E. Foster e Stuart William Seeley visando a construção de um controle de frequência automática de receptores, porém encontrou utilidade também como demodulador de frequência. Ele utiliza um transformador de radiofrequência que converte variações em frequência para variações em amplitude. O transformador, sintonizado na frequência da portadora, é ligado a dois diodos retificadores, semelhante a um retificador de onda completa em ponte. Se a frequência de entrada for a mesma da portadora, as duas metades do circuito do transformador de radiofrequência produzem a mesma queda de tensão e a saída é igual a zero. A medida que ocorrem diferenças o equilíbrio entre as duas metades do secundário do transformador varia e o resultado vem a ser uma tensão proporcional ao desvio de frequência da portadora. Note que esse circuito é sensível a variações na amplitude, diferente de alguns detectores. Isso implica na necessidade do uso de uma etapa com um amplificador limitador antes do detector, removendo assim as variações indesejadas na amplitude as quais seriam adicionadas como ruídos.

Capítulo 5

Experimento 4: Modulação por código de pulso (PCM)

5.1 Introdução

PCM é uma técnica para a representação de sinais analógicos convertidos para formato digital, visando transmissão ou posterior processamento. Uma codificação em PCM transforma uma amostra quantizada em um número codificado. [1]

Fundamentalmente, a técnica consiste na quantização dos dados através de um conversor A/D. No lado do receptor existirá um conversor D/A que irá fazer o processo oposto.

Capítulo 6

Conclusão

Modulações analógicas, como as vistas neste trabalho, continuam sendo importantes devido à sua simplicidade e baixo custo de implementação.

Bibliografia

- [1] MACHADO, R. **Notas de aula da disciplina de Comunicação de Dados.** Disponível em <http://www.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/comunicacaodedados.html>. Acesso em 12/06/2012.
- [2] LAMAR, V. M. **Modulação em Amplitude.** Disponível em <http://www.cic.unb.br/~lamar/te060/Apostila/Capitulo2.pdf>. Acesso em 23/06/2012.
- [3] **BF494, BF495 NPN Medium-Frequency Transistors.** Disponível em <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/BF494B.pdf>. Acesso em 23/06/2012.
- [4] **O Início da Digitalização - Telefonia Fixa.** Disponível em http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialciclos/pagina_4.asp. Acesso em 27/06/2012.
- [5] **Modulação e Demodulação de Sinal.** Disponível em http://www.del.ufms.br/PCI_T1/G6/Modulacao.htm. Acesso em 28/06/2012.