



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

**Elaboração de Guias e Preparações para Disciplina Laboratório de Princípios
de Comunicações com Kits da Falcon**

Juliana Martins de Assis

Prof. Dr. Bruno Barbosa Albert

Professor Orientador

Campina Grande, Julho de 2012

Juliana Martins de Assis

Elaboração de Guias e Preparações para disciplina Laboratório de Princípios de Comunicações com Kits da *Falcon*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Engenharia Elétrica e Informá-
tica como parte dos requisitos para obtenção
do título de Engenheira Eletricista.

Orientador:

Prof. Dr. Bruno Barbosa Albert

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

Trabalho de Conclusão de Curso sob o título “*Elaboração de Guias e Preparações para Disciplina Laboratório de Princípios de Comunicações com Kits da Falcon*”, defendido por Juliana Martins de Assis em julho de 2012, em Campina Grande, Estado da Paraíba, com a banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Bruno Barbosa Albert
Orientador

Prof. Dr. Waslon Terllizzie Araújo Lopes
Convidado

Julgado em: de Julho de 2012.

Lista de Figuras

1	Sinal modulado em amplitude.	15
2	Sinais mensagem, portadora e o modulado.	17
3	Sinais nos domínios temporal e de frequência.	19
4	Espectros dos sinais: sinal modulante e portadora, mais acima, e sinal modulado, abaixo (Amplitude <i>versus</i> frequência)	20
5	Esquema para a transmissão de sinal modulado em amplitude.	20
6	Sinal modulado e sua envoltória (linha tracejada).	20
7	Diagrama de blocos para o estudo do gerador AM DSB.	23
8	Submodulação ($\mu < 100\%$)	25
9	100% de modulação ($\mu = 100\%$)	25
10	Sobremodulação ($\mu > 100\%$)	25
11	Circuito para detecção por envoltória.	26
12	Descarregamento do capacitor em detector por envoltória.	26
13	Diagrama de blocos do receptor	30
14	Amplificador de frequência intermediária em dois estágios com detector AGC	31
15	Detector de Envoltória.	33
16	Sinal AM	33
17	Ripple	33
18	Sinal com Distorção por corte diagonal	33
19	Diagrama de blocos para recepção AM utilizando detector de envoltória via cabo.	36
20	Sinal Modulado.	36

21	Sinal Detectado.	36
22	Diagrama de blocos para recepção AM em Banda Dupla utilizando detector de envoltória via antena	38
23	Espectros dos sinais para diversas modulações em amplitude.	42
24	Diagrama de blocos para o estudo do gerador AM DSB - SC.	43
25	Saída do modulador com portadora suprimida (sinal mais espesso) e sinal mensagem (senoide pura).	45
26	Diagrama de blocos para geração de sinal AM SSB -SC.	45
27	Diagrama de blocos para recepção de sinal AM-SSB SC.	47
28	Exemplo de sinal modulado em frequência (amplitude <i>versus</i> tempo).	51
29	Símbolo e circuito equivalente, respectivamente, para o diodo varicap.	54
30	Curvas características do diodo Varicap.	55
31	Diagrama de blocos.	57
32	Diagrama de blocos para modulador que usa o varicap.	58
33	Saída do modulador em frequência	59
34	Diagrama de blocos para modulador de reatância.	59
35	Relação Ideal Tensão/Frequência de Demodulação	63
36	Característica Ideal e Real do Limitador de Amplitude.	64
37	Detector <i>Foster-Seeley</i>	65
38	Detector <i>Ratio</i>	66
39	Detector em Quadratura	66
40	Diagrama de Blocos do PLL	67
41	Diagrama de Bloco do Demodulador FM	68
42	Diagrama de Bloco do Demodulador FM Foster-Seeley/ Ratio	70
43	Diagrama de Bloco do Demodulador PLL	71
44	Diagrama de Bloco do Demodulador em Quadratura.	72
45	Diagrama de Bloco do Demodulador de Ressonância	72

Lista de Tabelas

1	Tabela para preenchimento.	57
---	------------------------------------	----

Sumário

1	Introdução	10
2	Objetivos	12
2.1	Metodologia	13
3	Preparação do Experimento 1: Geração de Sinal AM em Banda Lateral Dupla (DSB)	14
4	Guia do Experimento 1: Geração de Sinal AM em Banda Lateral Dupla (DSB)	16
4.1	Objetivos	16
4.2	Teoria	16
4.3	Procedimentos	22
4.3.1	Equipamentos	22
4.3.2	Estudo da Operação de um Modulador AM-DSB	22
5	Preparação do Experimento 2: Recepção AM em Banda Lateral Dupla (DSB)	26
6	Guia do Experimento 2: Recepção AM em Banda Lateral Dupla (DSB)	28
6.1	Objetivos	28
6.2	Teoria	28
6.2.1	Antena receptora	28
6.2.2	Amplificador de Rádio Frequência (RF)	28
6.2.3	Seletividade	29
6.2.4	O oscilador local	29

6.2.5	Mixer (Conversor de frequências)	29
6.2.6	Amplificador de frequência intermediária(<i>If Amplifiers</i>)	31
6.2.7	Detector de Envoltória	32
6.2.8	O amplificador de áudio	34
6.3	Estudo da recepção AM com portadora dupla utilizando detecção de envoltória via cabo	34
6.3.1	Equipamentos	34
6.3.2	Procedimentos	35
6.4	Estudo da recepção AM em Banda Dupla utilizando detector de envoltória via antena	36
7	Preparação do Experimento 3: Modulação em Amplitude em Banda Lateral Única e Portadora Suprimida (SSB - SC)	39
8	Guia do Experimento 3: Modulação em Amplitude em Banda Lateral Única e Portadora Suprimida (SSB - SC)	40
8.1	Objetivos	40
8.2	Teoria	40
8.3	Procedimentos	43
8.3.1	Equipamentos	43
8.3.2	Estudo da Operação de um Modulador em Amplitude com Portadora Suprimida	43
8.3.3	Estudo da Geração em Banda Lateral Única (SSB)	44
8.3.4	Estudo da Recepção em Banda Lateral Única (SSB SC) usando Detector de Produto.	46
9	Preparação do Experimento 4: Estudo da Modulação em Frequência e em Fase	49
10	Guia do Experimento 4: Estudo da Modulação em Frequência e em Fase	50
10.1	Objetivos	50

10.2 Teoria	50
10.2.1 Geração de Modulação em Frequência	52
10.2.1.1 Método Direto	53
10.2.1.2 Método Indireto	53
10.2.2 Vantagens e Desvantagens de FM	53
10.2.3 Transmissão em FM	54
10.3 Procedimentos	56
10.3.1 Equipamentos	56
10.3.2 Traçar a curva para a modulação característica de um modulador varactor.	56
10.3.3 Observar e medir o desvio de frequência e o índice de modulação de FM.	58
10.3.4 Modulação em frequência usando um modulador de reatância e me- dir o desvio de frequência.	59
11 Preparação do Experimento 5: Demodulação em Frequência	61
12 Guia do Experimento 5: Demodulação em Frequência	62
12.1 Objetivos	62
12.2 Teoria	62
12.2.1 Demodulação em frequência	62
12.2.2 Sensibilidade e demodulação não-linear	63
12.2.3 Demodulação do sinal FM	63
12.2.4 Circuito do Demodulador em Frequência	64
12.2.4.1 Limitador de Amplitude	64
12.2.4.2 Detector <i>Foster-Seeley</i>	64
12.2.4.3 Demodulador <i>Ratio</i>	65
12.2.4.4 Detector em Quadratura	65

12.2.4.5	Detector PLL(<i>Phase Locked Loop</i>)	66
12.2.4.6	Detector de Ressonância Sincronizado	66
12.3	Equipamentos	67
12.4	Procedimentos	67
12.4.1	Traçar a curva característica de demodulação FM (Demodulador <i>Foster Seeley</i>)	67
12.4.2	Observar as formas de onda do sinal demodulado pelo Demodulador <i>Foster Seeley</i>	68
12.4.3	Estudo da Demodulação <i>Ratio</i>	70
12.4.4	Estudo do Detector de Fase Bloqueada(PLL)	70
12.4.5	Estudo do Detector em Quadratura	70
12.4.6	Estudo do Detector de Ressonância Sincronizado	71
12.5	Relatório	72
13	Conclusão	73
	Referências	74

1 Introdução

Atualmente, no curso de Engenharia Elétrica da UFCG, o laboratório da disciplina de Princípios para Comunicações é realizado através de simulações feitas em um *software Ptolemy II*. A realização de tais simulações é bastante ilustrativa, através de um ambiente computacional que permite a interconexão de supostos blocos que realizariam as diversas operações que são observadas nos processos reais de telecomunicações. São observados, por exemplo, os diferentes sinais que podem ser necessários quando se utilizam técnicas de modulação para comunicação.

Não obstante, o Departamento de Engenharia Elétrica adquiriu kits da empresa *Falcon* que permitem uma abordagem mais realista às formas possíveis de processo de transmissão e recepção de mensagens, através de circuitos eletrônicos, e não apenas de simulações. A realização do laboratório com os kits possibilita aos estudantes uma vivência mais concreta dos métodos de modulação em telecomunicações e das dificuldades reais que podem ocorrer nos processos, que configuram aspectos essenciais na carreira de engenharia.

Os kits adquiridos abordam essencialmente cinco assuntos de telecomunicações, a saber:

- Densidade espectral de potência do ruído;
- Modulação em amplitude;
- Demodulação em amplitude;
- Modulação em frequência;
- Demodulação em frequência.

Através das montagens dos experimentos, em paralelo à realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, foi verificado que o kit de Densidade Espectral de ruído não funcionava adequadamente. Este problema pode ter decorrido do fato de ter sido construído com

base em cálculos incoerentes de potência que seu manual continha (potência de senoide calculada pelo quadrado da tensão de pico-a-pico ao invés de o quadrado da amplitude). Desta maneira, apesar de o assunto de densidade espectral de ruído ter grande relevância na disciplina de Princípios para Comunicações, e como o laboratório deve conter ao menos cinco experimentos, optou-se pelos seguintes temas:

- Modulação em amplitude com banda lateral dupla (DSB);
- Demodulação em amplitude com banda lateral dupla (DSB);
- Modulação em amplitude com portadora suprimida (DSB - SC) e com banda lateral única (SSB);
- Modulação em frequência;
- Demodulação em frequência.

2 Objetivos

A maior parte das disciplinas de laboratório do curso de Engenharia Elétrica fornece dois materiais para os alunos: uma preparação e um guia para o experimento a ser feito. A preparação consiste em alguns exercícios relacionados ao assunto que será abordado na prática, em laboratório. Seu objetivo é preparar o aluno para as tarefas que serão feitas, de maneira que ele tenha alguma fundamentação teórica do que será montado. O guia para o experimento, por outro lado, tem a função de fortalecer a base teórica através de um resumo elucidativo, que pode abordar, por exemplo, os circuitos que serão utilizados e seu princípio de funcionamento. O guia tem também a relevância fundamental de instruir os alunos na a realizar corretamente as montagens.

Mais especificamente, os objetivos do trabalho foram:

- Escolher alguns experimentos dos manuais fornecidos pela própria empresa *Falcon*;
- Realizá-los estimando o tempo que seria gasto pelos alunos para fazê-los;
- Observar eventuais problemas desses experimentos;
- Elaborar possíveis guias para o laboratório com os kits;
- Elaborar preparações para os experimentos de acordo com o assunto abordado na disciplina teórica.

Os capítulos seguintes deste relatório, após a seção *Metodologia*, mostram as preparações e os guias elaborados com a colaboração do aluno Thyago Monteiro Sá Pinto, do grupo de ensino tutorial (PET de Engenharia Elétrica). De fato, os guias de demodulação em amplitude (experimento 2) e demodulação em frequência (experimento 5) são de sua autoria.

A relevância deste trabalho é facilitar o desenvolvimento da disciplina Laboratório de Princípios para Comunicações com a nova exploração que será feita com o material ad-

quirido, quando os espaços físicos para o laboratório estiverem prontos (estão atualmente em construção, ainda não há previsão de término).

2.1 Metodologia

Inicialmente, foi feita uma investigação dos experimentos contidos nos manuais da *Falcon*, procurando observar aqueles com assuntos mais relevantes ao aprendizado dos estudantes. Em seguida, através do uso dos kits adquiridos, a saber, ACL-01, ACL-02, ACL-03, ACL-04 e ACL-05, verificou-se quais das montagens dos experimentos escolhidos seriam adequadas para os alunos, para que posteriormente os guias fossem elaborados. Em seguida, foram desenvolvidas preparações que fossem coerentes com a atividade descrita nos guias. Paralelamente ao trabalho desenvolvido, o estudo e revisão de conceitos fundamentais da disciplina de Princípio de Comunicações foram feitos conforme a bibliografia citada no final deste relatório. Finalmente, os experimentos foram realizados mas uma vez utilizando os guias elaborados. O tempo gasto para cada um deles foi registrado:

- Experimento 1: 20 minutos;
- Experimento 2: 30 minutos;
- Experimento 3: 40 minutos;
- Experimento 4: 30 minutos;
- Experimento 5: 60 minutos.

É conveniente ressaltar que as montagens foram refeitas pelas pessoas que desenvolveram o trabalho, isto é, a autora do presente texto auxiliada do aluno Thyago Sá. Assim, é provável que os alunos gastem mais tempo que o exposto, haja visto a pouca familiaridade com o material e a presença de questões que ficaram como exercício, para ser feito pelos mesmos, durante o próprio laboratório. Além disso, a disciplina pode ser complementada com outras tarefas, como as de simulação que são feitas atualmente ou mesmo outros experimentos presentes no manual dos kits, de acordo com o desempenho da turma.

3 Preparação do Experimento 1: Geração de Sinal AM em Banda Lateral Dupla (DSB)

1. Dado um sinal modulante $v_m(t) = B\text{sen}(2\pi ft)$ e uma portadora $v_c(t) = A\text{sen}(2\pi Ft)$, mostre que o sinal modulado

$$\begin{aligned} v_M(t) &= [A + kB\text{sen}(2\pi ft)]\text{sen}(2\pi Ft) \\ &= v_c(t) \cdot [1 + \mu\text{sen}(2\pi ft)] \end{aligned} \quad (3.1)$$

pode ser escrito como

$$v_M(t) = A\text{sen}(2\pi Ft) + \mu\frac{A}{2}\cos[2\pi(F - f)t] - \mu\frac{A}{2}\cos[2\pi(F + f)t].$$

2. Expresse μ em função de A , B e k .
3. Encontre a transformada de Fourier do sinal modulado (equação 3.1) utilizando a propriedade de deslocamento em frequência.
4. Esboce o diagrama de módulo *versus* frequência do sinal modulado.
5. Dado que o índice de modulação $\mu < 1$, e que o sinal modulado resultante é da forma indicada na Figura 1, mostre que μ pode ser encontrado segundo a fórmula:

$$\mu = \frac{H - h}{H + h},$$

em que H e h são as amplitudes máxima e mínima do sinal modulado, em módulo.

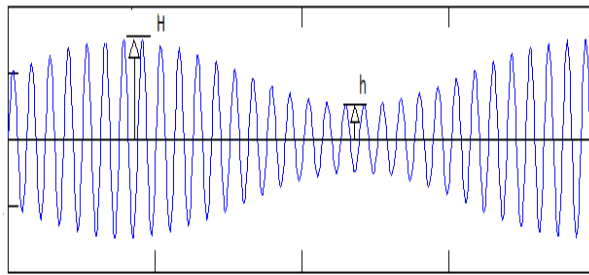


Figura 1: Sinal modulado em amplitude.

4 Guia do Experimento 1: Geração de Sinal AM em Banda Lateral Dupla (DSB)

4.1 Objetivos

- Estudar a operação de um modulador AM-DSB.
- Calcular o índice de modulação de uma onda AM.

4.2 Teoria

Em sistemas de comunicação, os elementos fundamentais são o emissor, o receptor e o meio por onde a mensagem é enviada.

Para que haja comunicação a longa distância, via rádio, é necessário que haja uma antena transmissora e uma receptora. Em geral, a dimensão das antenas deve ser de um décimo de comprimento de onda. Todavia, muitas vezes é desejável transmitir a voz humana, ou os sinais que se encontram na faixa audível, que estão em frequências relativamente baixas, com grandes comprimentos de onda. Os sistemas telefônicos costumam usar a faixa entre 300 Hz e 3.4 kHz. As transmissões de sistemas de rádio AM costumam usar frequências entre 200 kHz e 25 MHz, que são bem superiores à faixa da voz humana, mas as transmissões são possíveis graças à tecnologia de modulação.

Em AM, a amplitude de uma senoide de alta frequência (portadora) varia de acordo com o valor instantâneo do sinal modulante (Figura 2).

Considere uma senoide $v_m(t)$ com frequência f como sinal modulante,

$$v_m(t) = B \sin(2\pi ft) \quad (4.1)$$

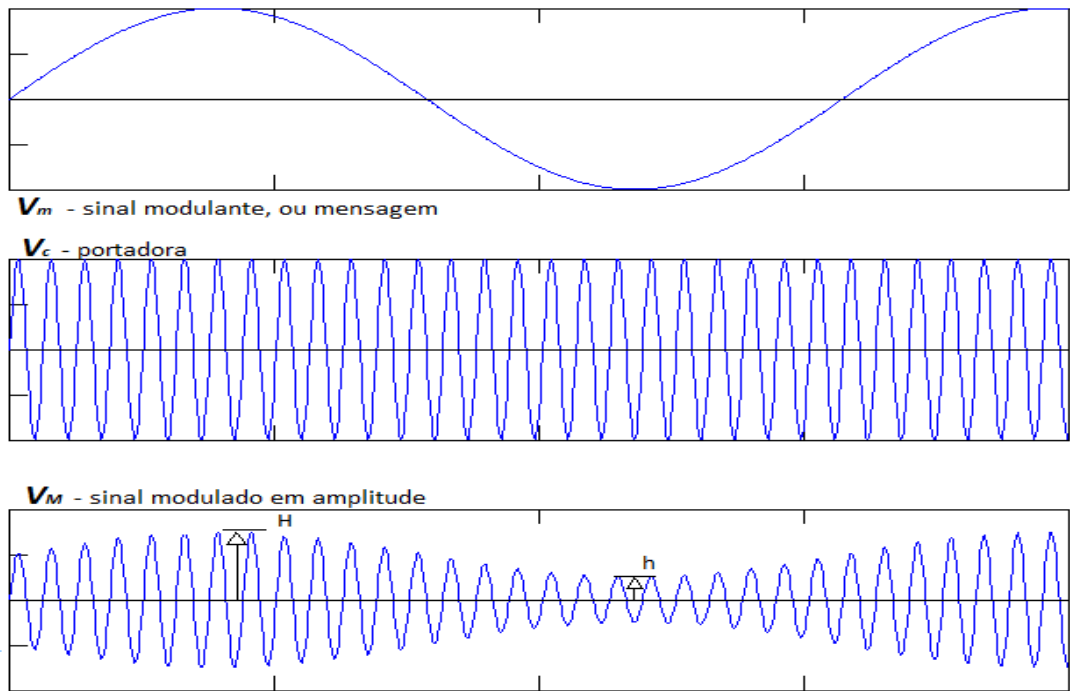


Figura 2: Sinais mensagem, portadora e o modulado, respectivamente. Amplitude *versus* tempo.

e outra senoide $v_c(t)$ a portadora (*carrier*), de frequência $F \gg f$,

$$v_c(t) = A \sin(2\pi Ft). \quad (4.2)$$

A amplitude da portadora $v_c(t)$ é alterada somando à sua amplitude A o sinal modulante $v_m(t)$. O sinal modulado em amplitude $v_M(t)$ pode ser expresso por

$$\begin{aligned} v_M(t) &= [A + kB \sin(2\pi ft)] \cdot \sin(2\pi Ft) \\ &= A[1 + \mu \sin(2\pi ft)] \cdot \sin(2\pi Ft), \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que k é uma constante de proporcionalidade.

O percentual de modulação do sinal é definido como o valor:

$$\mu = \frac{kB}{A} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

O índice de modulação também pode ser calculado através do conhecimento dos valores máximo (H) e mínimo (h), em módulo, que o sinal modulado em amplitude pode obter, conforme é sugerido na Figura 2. A Fórmula 4.5 indica como obtê-lo através

desses parâmetros:

$$\mu = \frac{H - h}{H + h} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Através de algumas manipulações trigonométricas, é possível escrever o sinal modulado:

$$v_M(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi Ft) + \mu \frac{A}{2} \cos[2\pi(F - f)t] - \mu \frac{A}{2} \cos[2\pi(F + f)t]. \quad (4.6)$$

Percebe-se que este sinal é composto por três senoides:

Portadora	$A \cdot \text{sen}(2\pi Ft)$
Banda lateral inferior	$\mu \frac{A}{2} \cos[2\pi(F - f)t]$
Banda lateral superior	$\mu \frac{A}{2} \cos[2\pi(F + f)t]$

A representação do espectro de frequências do sinal modulado em um diagrama de amplitude muito útil, pois expressa quais são as componentes de frequência de um sinal e suas contribuições (amplitudes). A Figura 3 representa um sinal modulado em banda lateral dupla (do inglês *Double SideBand - DSB*), nos domínios de frequência e de tempo.

Considerando que senoides de diferentes frequências são sinais mutuamente ortogonais, a potência total em um sinal AM-DSB é a soma das contribuições da portadora e das bandas laterais superior e inferior, que são:

Potência associada à portadora	$P_C = \frac{A^2}{2}$
Banda lateral inferior (<i>lower side band</i>)	$P_L = \frac{(\mu A)^2}{8}$
Banda lateral superior (<i>upper side band</i>)	$P_U = \frac{(\mu A)^2}{8}$

É interessante observar que a potência na transmissão da portadora não está associada ao tipo de modulação (índice de modulação) usado, ao contrário do que ocorre com as bandas laterais. Sabendo que o índice de modulação encontra-se entre 0 e 1 para que a detecção simples por envoltória seja possível, percebe-se que cada banda pode atingir no máximo 25% da potência gasta na portadora (juntas as bandas laterais podem atingir 50% da potência associada somente à portadora).

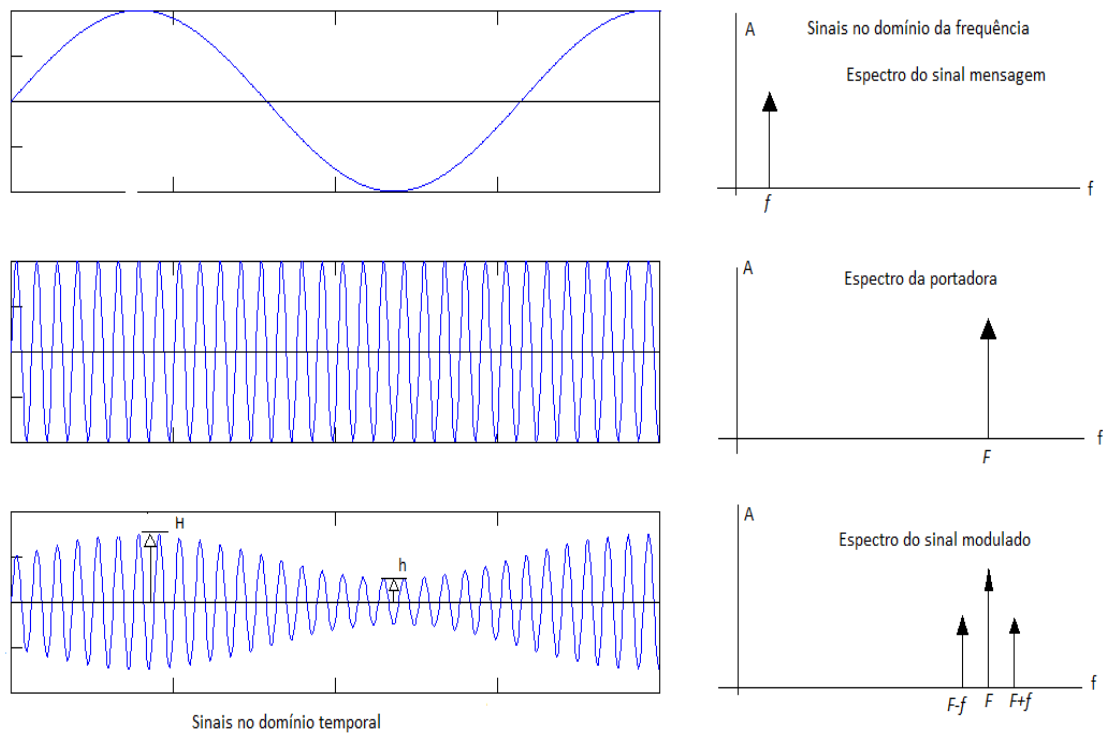


Figura 3: Sinais nos domínios temporal e de frequência.

Como a potência desperdiçada na portadora é no mínimo o dobro da que é gasta com o sinal mensagem (modulante), pode-se afirmar que a transmissão em AM não é muito eficiente. Todavia, os circuitos necessários no receptor e no transmissor são simples e relativamente baratos de projetar e construir.

Se ao invés de uma senoide houver um sinal qualquer modulante de largura de banda de B Hz, o sinal modulado ocupará uma largura de $2B$ Hz, devido ao deslocamento em frequência que ocorre, como ilustrado na Figura 4.

No circuito utilizado para os exercícios de laboratório (circuito integrado LM1496), a modulação em amplitude é gerada por um amplificador diferencial, cujo ganho é alterado pelo sinal modulante. O dispositivo também é capaz de gerar sinais AM com portadora suprimida.

As partes principais de um transmissor de sinal AM estão esquematizadas na Figura 5. A Figura 6 ilustra um sinal modulado e outro, tracejado, que é semelhante ao sinal recuperado. O sinal recuperado, idealmente, coincide com o sinal mensagem. Uma forma possível de recuperação da mensagem é a detecção por envoltória.

O sinal que será transmitido nesse experimento será uma senoide, apesar de que senoi-

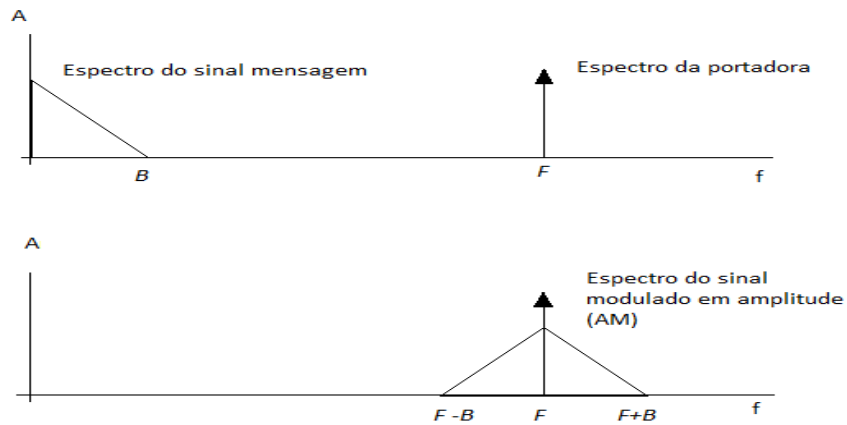


Figura 4: Espectros dos sinais: sinal modulante e portadora, mais acima, e sinal modulado, abaixo (Amplitude *versus* frequência)

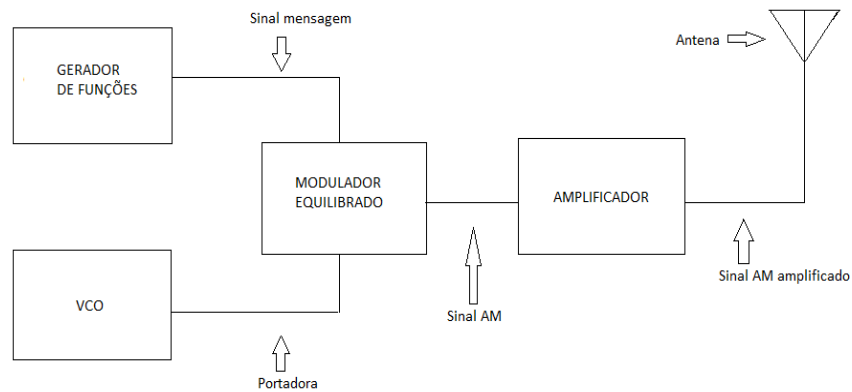


Figura 5: Esquema para a transmissão de sinal modulado em amplitude.

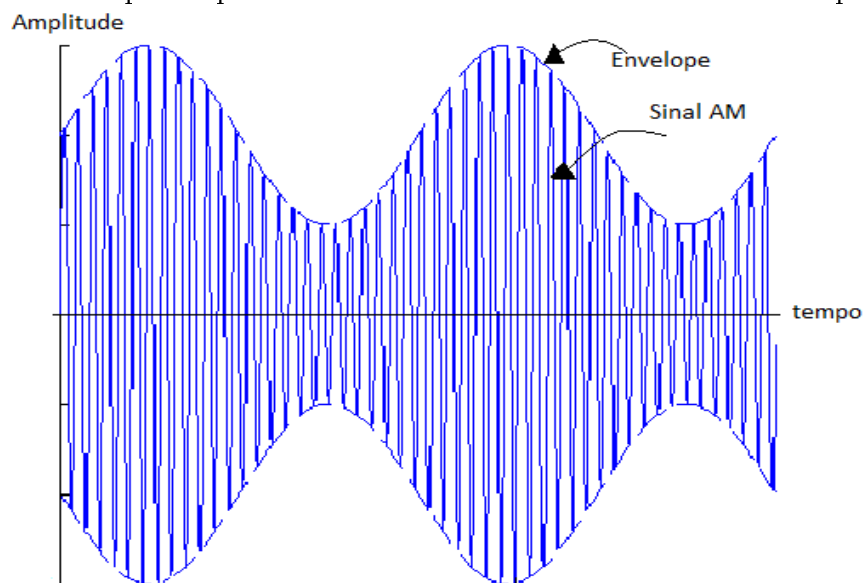


Figura 6: Sinal modulado e sua envoltória (linha tracejada).

des puras não transmitam muita informação e sinais de voz sejam bem mais complexos. No entanto, para realizar os testes e medir o coeficiente de modulação, uma senoide pura como sinal mensagem é algo bastante útil e que torna o procedimento mais simples.

A portadora deve estar em uma faixa de 15 kHz a 10 GHz, pois na prática essas frequências são as mais desejáveis nos meios de comunicação utilizados. Fora desta faixa o custo dos equipamentos cresce rapidamente com pouquíssimas vantagens. É interessante observar que embora a frequência de 15 kHz esteja na faixa audível, ondas de rádio não são audíveis pois são eletromagnéticas, e não provocam as mudanças de pressão que o aparelho auditivo humano é capaz de captar (ondas mecânicas). Além disso, a portadora também é uma senoide, pois assim o espectro do sinal mensagem fica menos espalhado, em torno de apenas uma componente de frequência e havendo menos interferência entre estações de rádio adjacentes.

Há diferentes maneiras de se projetar um modulador. Se o processo de modulação produzir componentes indesejadas de frequência, pode ser necessário passar o sinal por um filtro passa-faixa antes de que ele seja amplificado e posteriormente transmitido por uma antena. A potência contida no sinal de saída e sua frequência são os principais fatores que influenciam seu alcance.

Conforme mencionado anteriormente, o tamanho sugerido na maioria dos casos para a antena é de um quarto de comprimento de onda que se deseja transmitir. No kit ACL-01 a portadora pode atingir no máximo 1,5 MHz. Considerando que a frequência utilizada para portadora seja de 1 MHz, o tamanho da antena seria:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 300\text{m}$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{300\text{m}}{4} \simeq 75\text{m}$$

Percebe-se que, por razões práticas, a antena do kit tem comprimento bem menor de que o ideal, além de que a transmissão no kit é feita a curtas distâncias.

Apesar de ondas eletromagnéticas serem compostas por campos magnéticos e elétricos, são estes últimos que servem para indicar a polarização da antena, por convenção. O campo magnético sempre está perpendicular ao elétrico.

4.3 Procedimentos

4.3.1 Equipamentos

- Módulos ACL-01
- Fonte de tensão para os kits
- Osciloscópio 20 MHz
- Cabos conectores
- Gerador de sinais

Nota: manter todas as chaves de falta desligadas (SWITCH FAULTS OFF)

4.3.2 Estudo da Operação de um Modulador AM-DSB

A figura 24 apresenta a montagem do experimento.

1. Com a fonte desligada, ligue o kit ACL-01 à fonte de tensão. Posteriormente, a fonte deve ser ligada.
2. Utilize o gerador de sinais para gerar uma senoide de 0,5 V de V_{pp} e frequência de 1 kHz.
3. No módulo **VCO** (kit ACL-01) coloque a chave em 500 kHz, gere uma senoide com **freq.** de cerca de 450 kHz e **level** de cerca de 1 V de V_{pp} , utilizando o osciloscópio para verificação.
4. No módulo **Balanced Modulator 1**, rotacione completamente o botão **Carrier Null** no sentido horário (transmissão sem portadora suprimida) e **level**.
5. Use os cabos para ligar a saída do gerador de sinais em **signal in** no módulo **Balanced Modulator 1**, assim como a saída **rf out** de **VCO** na entrada da portadora - **carrier in**.
6. Meça no osciloscópio, simultaneamente, as entradas do modulador. Em seguida, use os dois canais para medir sinal mensagem (**signal in**) e o sinal modulado (saída de **Balanced Modulator 1**), e observe como a envoltória é a mesma.

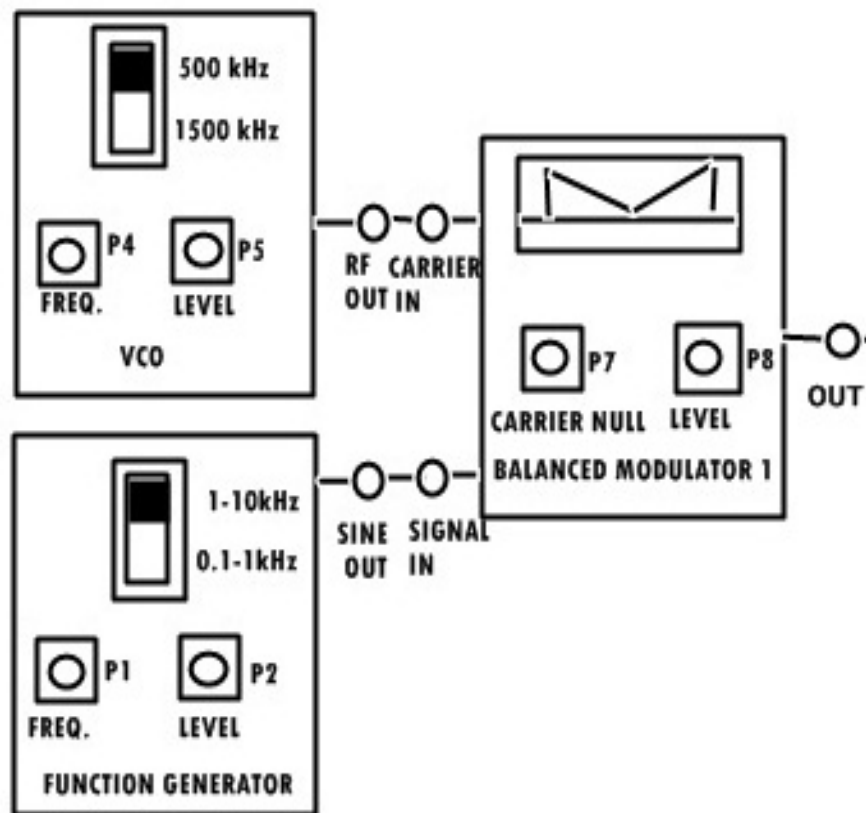


Figura 7: Diagrama de blocos para o estudo do gerador AM DSB.

7. Utilizando o osciloscópio, meça as amplitudes h e H do sinal modulado.

8. Calcule a amplitude A da portadora

$$A = \frac{H + h}{2}$$

9. Calcule a porcentagem do índice de modulação

$$\mu = \frac{H - h}{H + h} \cdot 100\%$$

10. Varie a amplitude no gerador de sinais e procure observar as seguintes situações: percentual de modulação abaixo de 100% (Figura 8), igual a 100% (Figura 9) e superior a 100% (sobremodulação, $\mu > 1$ - Figura 10).

11. Varie a frequência do sinal modulante (gerador de sinais) e observe o sinal modulado.

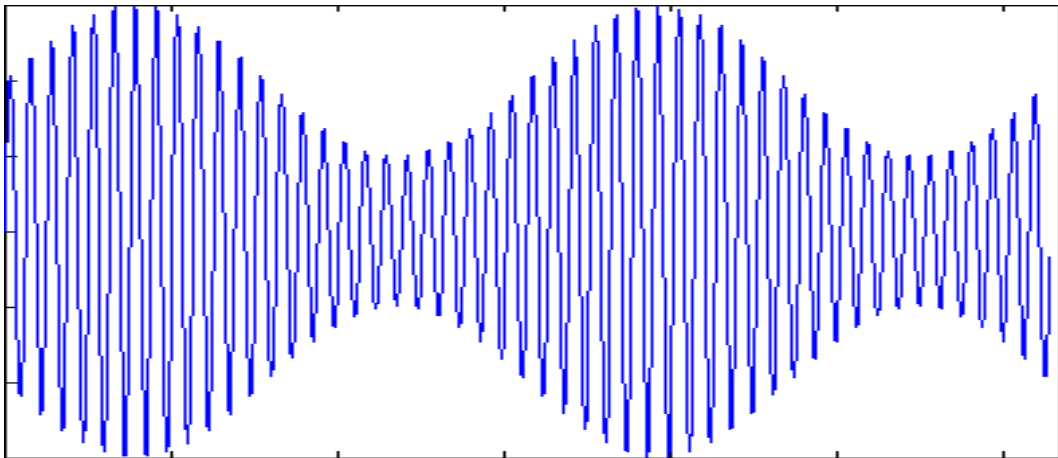


Figura 8: Submodulação ($\mu < 100\%$)

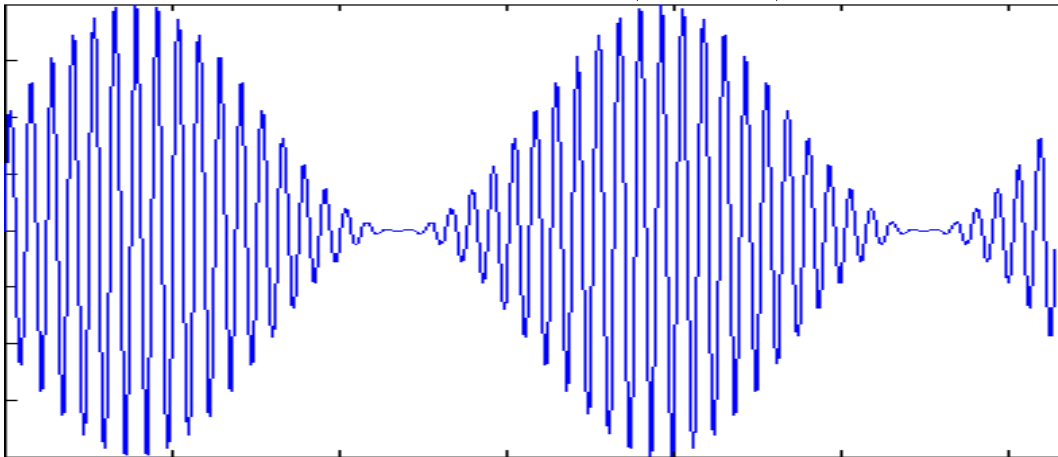


Figura 9: 100% de modulação ($\mu = 100\%$)

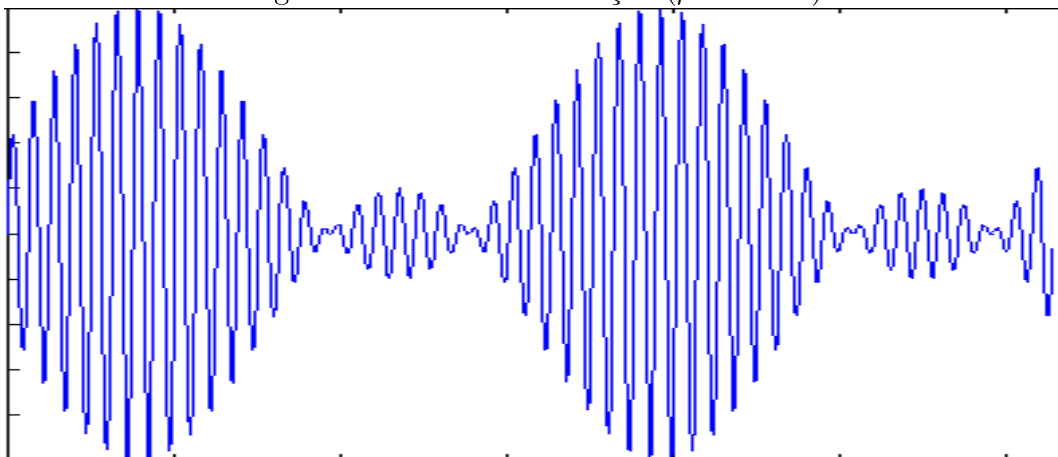


Figura 10: Sobremodulação ($\mu > 100\%$)

5 Preparação do Experimento 2: Recepção AM em Banda Lateral Dupla (DSB)

O experimento para qual esta preparação é feita aborda fundamentalmente a detecção por envoltória de sinais modulados em amplitude.

1. O circuito para detecção por envoltória é ilustrado na Figura 11 e a forma de onda do sinal detectado encontra-se na Figura 12. O capacitor se descarrega do valor de pico E em um instante de tempo arbitrário $t = 0$. A tensão v_C nos terminais do capacitor é dada por:

$$v_C(t) = Ee^{-t/RC},$$

$$t \geq 0$$

Aproxime essa tensão pelos dois primeiros termos da série de Taylor, para valores de t próximos de 0. Por que essa aproximação linear é plausível durante um ciclo

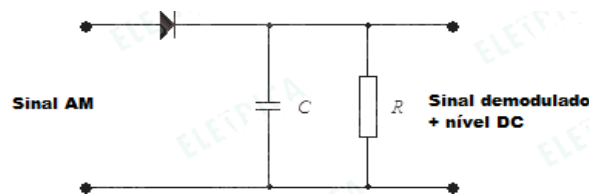


Figura 11: Circuito para detecção por envoltória.

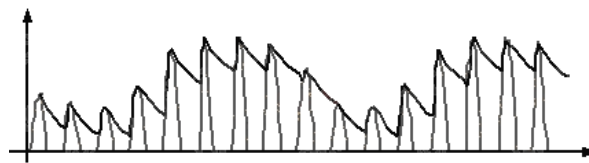


Figura 12: Descarregamento do capacitor em detector por envoltória.

da portadora?

2. Para que o capacitor consiga acompanhar o sinal mensagem é necessário que a taxa de variação de sua tensão seja maior que a taxa de variação da envoltória, em valores absolutos.

$$\left| \frac{dv_C}{dt} \right| = \frac{E}{RC} \geq \left| \frac{dE}{dt} \right|$$

Sabendo que a envoltória é dada por $E(t) = A[1 + \mu \cos \omega_m t]$, mostre que a relação abaixo deve ser satisfeita para todo t .

$$RC \leq \frac{1 + \mu \cos \omega_m t}{\mu \omega_m \sin \omega_m t}$$

3. O pior caso ocorre quando o lado direito da equação atinge o mínimo, o que deve ser encontrado pelo método geral de igualar a derivada em relação a t a zero. Encontre a relação que a constante de tempo RC deve atender para este caso, em função de μ e ω_m .

6 Guia do Experimento 2: Recepção AM em Banda Lateral Dupla (DSB)

6.1 Objetivos

- Estudar a recepção do sinal AM em banda lateral dupla utilizando detecção de envoltória via cabo;
- Estudar a recepção do sinal AM em banda lateral dupla utilizando detector via antena.

6.2 Teoria

6.2.1 Antena receptora

A antena receptora trabalha de modo reverso a antena transmissora. Basicamente, ela capta a onda eletromagnética e gera uma pequena tensão. Idealmente, a antena receptora deve estar alinhada com a polarização do sinal de entrada. O sinal gerado pela antena é de baixa amplitude (geralmente menor que 50 mV), de forma que para interpretar a mensagem a amplificação é necessária.

6.2.2 Amplificador de Rádio Frequência (RF)

A antena receptora não apenas provê um sinal de baixa amplitude de entrada como também intercepta todas as transmissões disponíveis naquele instante, de outras estações e frequências. Isso significa que o sinal de saída irá incluir os sinais de várias estações, tornando a recepção confusa e de difícil interpretação. Além disso, o circuito receptor também captura o ruído presente na transmissão.

O amplificador RF é o primeiro estágio de amplificação do receptor, sendo responsável

por elevar o sinal de entrada a um nível superior ao ruído gerado internamente. Além disso, ele começa o processo de seleção da faixa de frequência desejada e rejeição das não esperadas.

6.2.3 Seletividade

Um circuito sintonizado paralelamente possui sua máxima impedância na ressonância e diminui em valores de frequência inferiores e superiores àquele ponto. Isso significa que quando o circuito de sintonização é incluído no amplificador, obtêm-se um maior ganho na frequência de ressonância, também denominada de frequência central. Este fenômeno é denominado de seletividade e o seu principal efeito é que ela permite a seleção de uma estação desejada, pois sem ela todos os sinais de entrada possuiriam a mesma amplitude. Geralmente em rádio receptores, um capacitor é ajustado através do controle do oscilador local para selecionar os vários sinais.

6.2.4 O oscilador local

O oscilador local produz uma saída senoidal semelhante a onda portadora gerada na transmissão. A frequência desse oscilador na saída é ajustável, sendo utilizado o mesmo controle para ajustar frequência central do amplificador RF e a frequência do oscilador local. Este é sempre mantido, por um valor fixado, em uma frequência superior ao do sinal RF de entrada.

6.2.5 Mixer (Conversor de frequências)

Em muitas aplicações de comunicações, se faz conveniente realizar uma translação da frequência do sinal. Em rádio eletrônica, essa técnica é largamente utilizada em receptores, como pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 35.

O sinal de rádio frequência (RF) detectado pela antena é amplificado e transferido via o *mixer* e o oscilador local para uma frequência baixa e fixa (Frequência intermediária FI). Essa mudança permite que:

- Um amplificador de banda fixa seja utilizado para amplificação de todos os sinais de entrada, independente de suas frequências;
- Trabalhar com sinais de baixa frequência;

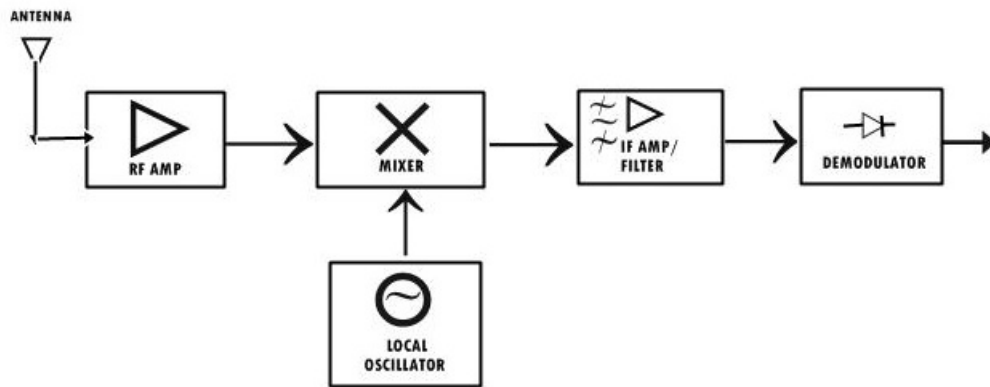


Figura 13: Diagrama de blocos do receptor

O oscilador local é necessário pois ele executa a translação ao interagir com o sinal de radiofrequência para produzir uma nova frequência.

O *mixer* utilizado neste experimento é composto por três seções:

1. Um transistor MOSFET que executa a interação entre o sinal RF e o oscilador local;
2. Um filtro passa-baixa com frequência de corte de 450 kHz;
3. Um estágio de amplificação;

O *mixer* no receptor combina o sinal do amplificador RF e a frequência de entrada do oscilador local para produzir três frequências:

1. A diferença de frequência (FI) entre a frequência gerada pelo oscilador local e a do sinal RF;
2. A soma da frequência do oscilador local e a frequência do sinal RF;
3. A frequência do oscilador local;

Como o oscilador local controla o a frequência central do amplificador RF, a frequência intermediária deve ser mantida em uma valor constante. No módulo ACL-02, esse valor é aproximadamente 455 kHz. Desta forma, na demodulação, o oscilador local deve ser ajustado de modo a sempre produzir uma frequência diferença de 455 kHz com a frequência do sinal de entrada.

6.2.6 Amplificador de frequência intermediária(*If Amplifiers*)

O amplificador de frequência intermediária consiste em dois estágios de amplificação e é o principal responsável pelo ganho no sinal e seletividade. Isto, operando a uma frequência fixa intermediária que evita que todos os amplificadores precisem ser ajustados às frequências de entrada RF. Como apenas um sinal transmitido deve ser selecionado em detrimento dos outros, a banda passante em todos os estágios é controlada cuidadosamente. Na saída dos amplificadores (IF), nós temos uma onda de 455 kHz cuja a amplitude é modulada pela informação de áudio esperada.

O diagrama elétrico deste amplificador pode ser visualizado na Figura 37, sendo esse composto por um AGC(*Automatic Gain Control*) ou circuito de ganho controlado que é responsável por prevenir a aplicação de sinais muito intensos no receptor, além de reduzir os efeitos de flutuações do sinal.

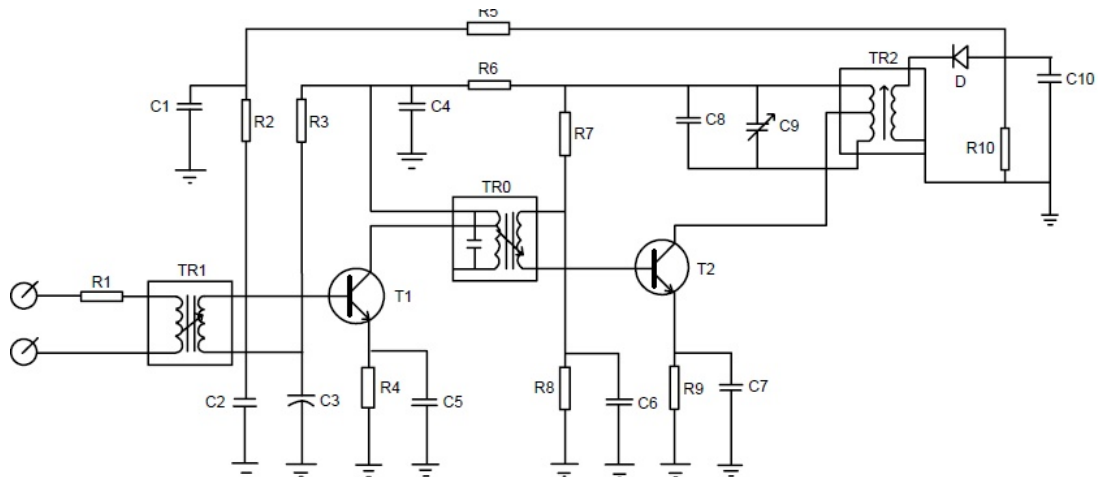


Figura 14: Amplificador de frequência intermediária em dois estágios com detector AGC

O sinal em frequência intermediária é aplicado ao primeiro transformador (TR1) e deste para o primeiro estágio do transistor(T1). A polarização deste componente depende da tensão AGC vinda do detetor, e deste modo a amplificação do primeiro estágio também varia. Após o transformador, o sinal IF é repassado para o segundo estágio (transistor T1) e depois do transformador TR2 para o diodo detetor. O diodo é conectado de forma que uma envoltória negativa do sinal modulado seja detectado. Esta onda é composta por um sinal de baixa frequência modulado e uma componente negativa contínua proporcional em amplitude ao sinal IF. Os componentes DC são separados do sinal (via um filtro passa baixa- circuito RC) e constituem a tensão AGC usada para variar a amplificação

do primeiro estágio IF. A seletividade dos amplificadores IF retiram as componentes indesejadas gerada pela interferência dos processos.

O resultado na saída, contém as três componentes:

1. O sinal de mensagem de áudio desejado;
2. Um pequeno *ripple* na frequência IF;
3. Um tensão DC positiva.

6.2.7 Detector de Envoltória

A extração do sinal AM modulado pode ser executada por detecção de envoltória, cujo o circuito mais comum consiste de um diodo seguido de um filtro RC (similar a um retificador de meia onda). Este filtro é responsáveis por eliminar as componentes de alta frequência e como o capacitor descarrega nos picos positivos, o sinal na saída reproduz o formato do sinal modulante.

O máximo valor de tensão segue o pico de tensão da portadora e sendo a amplitude desta variável, escolhendo os valores apropriados de R e C, a saída do detector pode reproduzir fielmente estas variações.

Considerando o sinal de onda apresentado na Figura 16, nota-se que o sinal modulante constitui uma envoltória da forma de onda relatada.

O sinal demodulado pode sofrer dois tipos de distorções:

1. Se a constante de tempo RC for muito menor que o período da portadora, a envoltória tem sua forma de onda afetada pelo *ripple* que não acompanha os picos de tensão do sinal modulante(Figura 17);
2. Se a constante de tempo RC for muito superior ao período da portadora, o sinal detectado segue o comportamento da envoltória, mas em certos pontos sofre um decrescimento exponencial – distorção por um corte diagonal (Figura 18).

O máximo valor RC é calculado supondo que o capacitor descarrega sobre o resistor em um ritmo igual ou superior ao qual a envoltória do sinal modulado é produzido. A condição de detecção é dada por 6.1.

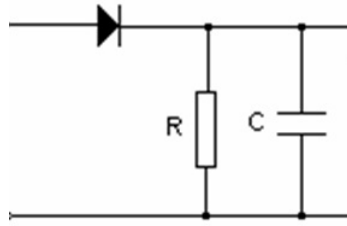


Figura 15: Detector de Envoltória.

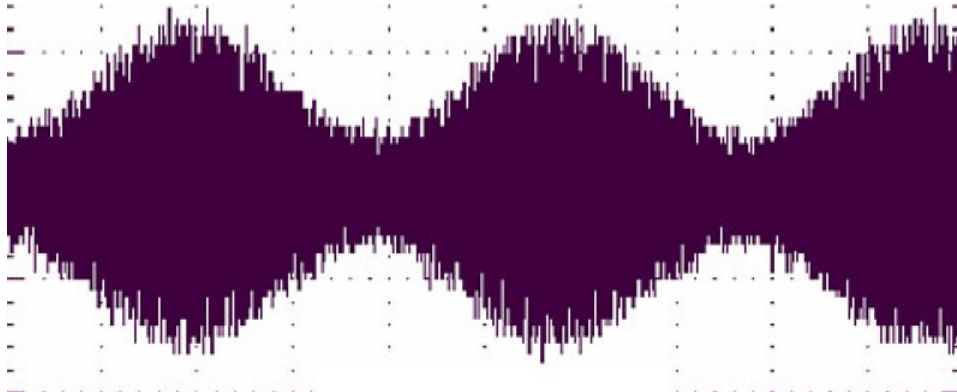


Figura 16: Sinal AM

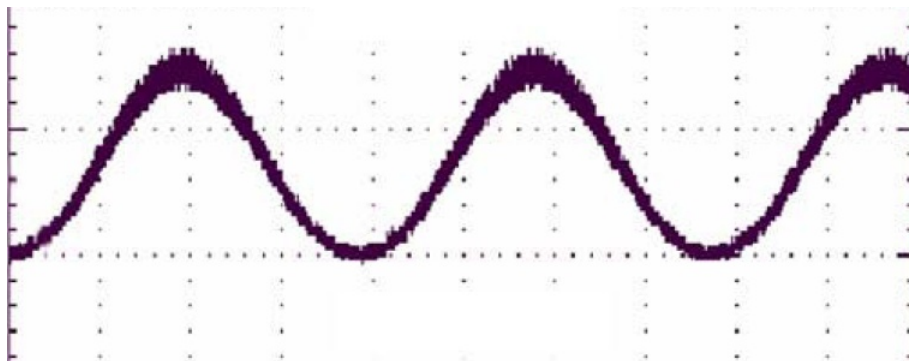


Figura 17: Ripple

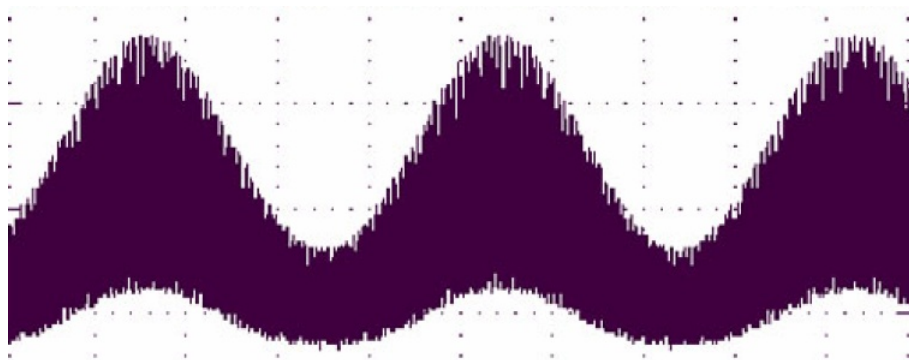


Figura 18: Sinal com Distorção por corte diagonal

$$RC \leq \frac{1}{\omega_{max}} \frac{\sqrt{(1-m^2)}}{m} \quad (6.1)$$

Sendo m o índice de modulação e f_{max} a frequência máxima de modulação do sinal. Note que se $m = 1$ a condição não pode ser satisfeita e o sinal detectado será certamente distorcido.

A eficiência do detector é definida como uma relação entre a amplitude do sinal de saída do detector e a amplitude do sinal AM de entrada. Supondo que na frequência da portadora, a reatância do capacitor $\left[\frac{1}{2\pi FC}\right]$ é muito menor que a resistência R (hipótese verificada se $RC \gg 1/F$ para reduzir o *ripple*), a eficiência irá depender praticamente da relação entre R e a resistência r_d do diodo.

Assim, para obter uma alta eficiência de detecção, a resistência R deve ser bastante superior a resistência diferencial do diodo ($R \gg r_d$) enquanto para minimizar o *ripple* no sinal detectado, a constante RC deve se apresentar bastante elevada em relação ao período da portadora ($RC \gg T$). Por sua vez, para evitar distorção por corte diagonal, o produto RC deve ser menor ou igual a um valor que depende da frequência de modulação e o índice de modulação. No caso do sinal modulante com variação de amplitude e frequência, os máximos valores de RC serão considerados na obtenção do índice de modulação.

6.2.8 O amplificador de áudio

Na entrada do amplificador de áudio um filtro passa-baixa é utilizado para remover o *ripple* IF, e um capacitor é usado para retirar o nível DC de tensão. O sinal de áudio remanescente é então amplificado provendo a saída final para o auto-falante.

6.3 Estudo da recepção AM com portadora dupla utilizando detecção de envoltória via cabo

6.3.1 Equipamentos

- Módulos ACL-01 e ACL-02;
- Fonte de tensão;
- Osciloscópio de 20 MHz;
- Conectores.

6.3.2 Procedimentos

1. De acordo com a Figura 19, execute as seguintes conexões;
2. Conecte a saída (**sine out**) do gerador de funções (**function generator**) à entrada do modulador (**balanced modulator**). Módulo ACL-01;
3. Conecte a saída (**rf out**) do VCO à entrada (**carrier in**) do modulador;
4. Conecte a fonte de tensão com as polaridades adequadas nos kits ACL-01 e ACL-02. Mantenha-a desligada;
5. Estabeleça os seguintes sinais:
 - **Function Generator**: Sinal de $0,5 V_{pp}$, frequência de 1 kHz;
 - **VCO**: Amplitude de $2 V_{pp}$, frequência em torno de 850 kHz, chaveada em 1500 kHz;
 - **Balanced Modulator1**: Mantenha o **Carrier Null** completamente rotacionado no sentido horário, de forma a obter um sinal AM com portadora não suprimida. Ajuste o **out level** para obter um sinal AM através da saída em torno de 100 mV de V_{pp} ;
 - **Local Oscillator (ACL-02)**: 1300 kHz, 2 V;
6. Conecte a saída (**out**) do oscilador local a entrada (**lo in**) do mixer;
7. Conecte a saída do modulador (**balanced modulator1**) a entrada **rf in** do *mixer* no kit ACL-02;
8. Conecte a saída do *mixer* ao 1º amplificador **if in**;
9. Conecte as saídas **if out1** e **if out2** do 1º amplificador às entradas **if in1** e **if in2** do 2º Amplificador;
10. Conecte a saída do 2º amplificador a entrada do detector de envoltória;
11. Conecte **AGC₁** e **AGC₂** e os *jumpers* de acordo com o diagrama;
12. Observe o sinal modulado e as formas de onda correspondentes na saída do modulador kit ACL-01.
13. Com o osciloscópio, observe os sinais na entrada e na saída do detector de envoltória. Se houver coincidência entre as frequências da portadora, do oscilador local e a central do amplificador, obtem-se dois sinais similares aos das Figuras 20 e 21;

14. Varie a frequência e a amplitude do sinal modulado e observe as variações correspondentes no sinal demodulado.

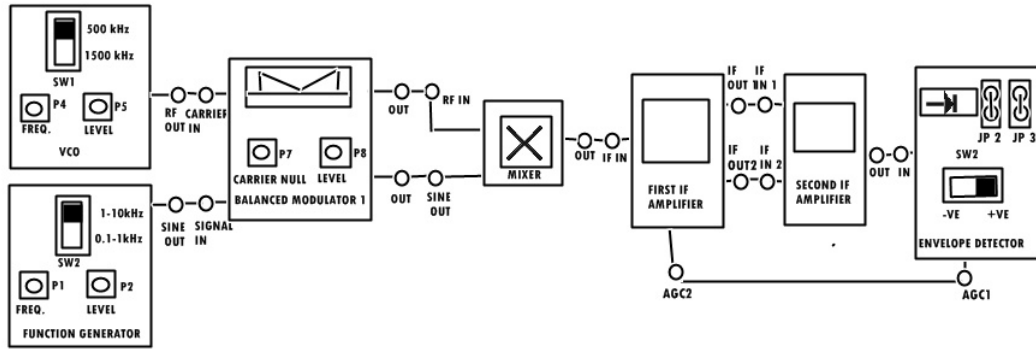


Figura 19: Diagrama de blocos para recepção AM utilizando detector de envoltória via cabo.

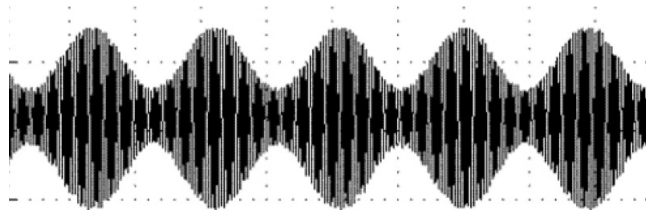


Figura 20: Sinal Modulado.

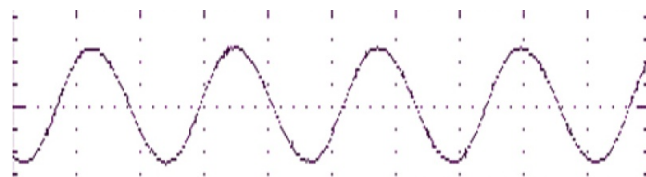


Figura 21: Sinal Detectado.

6.4 Estudo da recepção AM em Banda Dupla utilizando detector de envoltória via antena

1. De acordo com a Figura 39 e mantendo parte da estrutura do passo anterior, execute as alterações no sistema;
2. Estabeleça os mesmos sinais da seção anterior deste experimento para os blocos **function generator**, **VCO** e **Local Oscillator**;

3. Estabeleça a modulação no módulo ACL-01 de modo a obter um sinal AM modulado com amplitude em torno de 500 mV na saída do **balanced modulator1**. Mantenha **Carrier Null** completamente rotacionado.
4. Conecte a saída (**out**) do **Balanced Modulator1** à entrada (**in**) do amplificador (**Output Amplifier**) conectado diretamente a antena transmissora;
5. Conecte a saída da Antena a entrada **rf in** do Amplificador RF e a saída (**rf out**) deste a entrada **RF IN** do *mixer*, no módulo ACL-02;
6. Visualize no osciloscópio a entrada e a saída do detector de envoltória. Caso a frequência central do amplificador, a frequência da portadora e a do oscilador local coincidam, será obtido um sinal semelhante ao da Figura 21;
7. Varie a frequência e amplitude do sinal modulante e verifique as alterações no sinal demodulado.

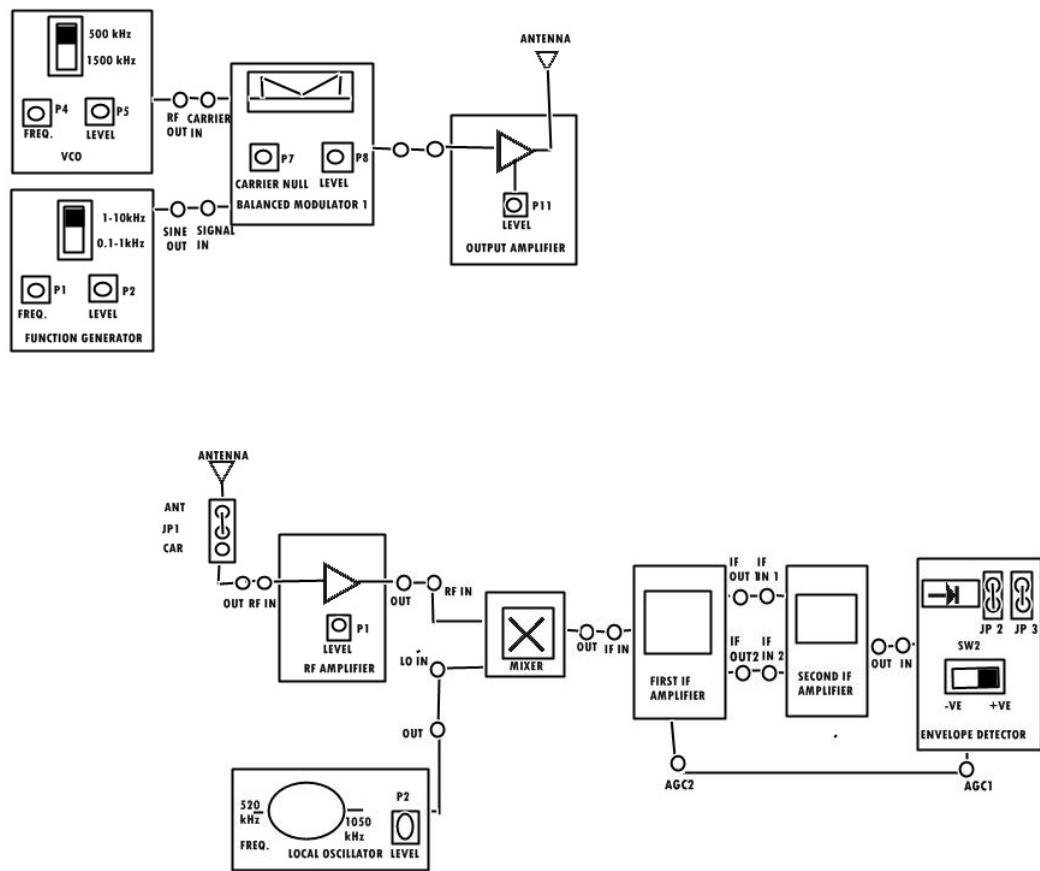


Figura 22: Diagrama de blocos para recepção AM em Banda Dupla utilizando detector de envoltória via antena

7 Preparação do Experimento 3: Modulação em Amplitude em Banda Lateral Única e Portadora Suprimida (SSB - SC)

1. Para a transmissão de um sinal modulado em amplitude e em banda lateral única (AM-SSB) é necessária a utilização da transformada de Hilbert, cuja transformada é dada a seguir:

$$H(\omega) = -j\text{sgn}(\omega)$$

$$H(\omega) = \begin{cases} -j = 1e^{-j\pi/2}, & \text{se } \omega \geq 0, \\ j = 1e^{j\pi/2} & \text{se } \omega < 0 \end{cases}$$

Esboce o diagrama de amplitude e de fase dessa função. Por que é possível afirmar que essa transformada é um deslocador ideal de fase? A passagem de um sinal por esse deslocador promove sua distorção? Por quê?

2. O sinal AM SSB é expresso como segue:

$$\varphi_{SSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t \mp m_h(t) \sin \omega_c t, \quad (7.1)$$

em que $m(t)$ é o sinal mensagem, $m_h(t)$ é sua transformada de Hilbert e ω_c é a frequência angular da portadora. Esboce o espectro de $\varphi_{SSB}(t)$ para o caso simples de $m(t) = \cos(\omega_m t)$, usando a banda lateral superior e, em seguida, inferior.

8 Guia do Experimento 3: Modulação em Amplitude em Banda Lateral Única e Portadora Suprimida (SSB - SC)

8.1 Objetivos

- Estudar a operação de um modulador com portadora suprimida;
- Estudar a geração de SSB - SC;
- Estudar a recepção AM SSB - SC usando detector de produto.

8.2 Teoria

A transmissão AM-DSB foi o primeiro método de modulação desenvolvido, é bastante usado e adequado para transmissões em médio e longo alcance. Todavia, essa tecnologia apresenta algumas desvantagens.

Conforme foi visto no 1º experimento, a transmissão AM-DSB é bastante ineficiente. Para a recepção mais simples e barata, que é a detecção por envoltória, apenas 33% da potência transmitida é gasta com a mensagem (no melhor caso), sendo todo o restante gasto na transmissão da portadora. Outro problema é que essa transmissão sempre ocupa o dobro da largura (*Double SideBand*) de banda ocupada pelo sinal mensagem, de maneira que a informação é enviada duplicada, desnecessariamente.

Uma alternativa contra o gasto de energia ocasionado pelo envio da portadora é a transmissão AM DSB-SC (com banda lateral dupla e portadora suprimida) e um dispositivo capaz de retirar a componente da portadora é o modulador equilibrado (*Balanced Modulator*). Este dispositivo gera a onda AM tradicional, com suas duas bandas laterais

e portadora, mas há a facilidade de realimentar esta última em quantidade variável e fase contrária, de modo a cancelar a saída de portadora. Na recepção, para que o sinal mensagem seja extraído, é necessário deslocar o espectro do sinal transmitido para a posição original, de maneira que é necessária a geração de um sinal na frequência e fase da portadora. Como a detecção é síncrona, se a portadora produzida no demodulador não estiver na frequência exata, o sinal demodulado não corresponderá ao enviado, apresentando distorções.

A necessidade, na transmissão de AM-DSB SC, de que os receptores produzam uma portadora com frequência exata, independentemente de variações na temperatura ou vibrações mecânicas, por exemplo, torna os receptores para esse tipo de modulação muito caros e portanto ele é raramente utilizado.

Por outro lado, em relação ao problema de mau aproveitamento da banda espectral disponível que ocorre na modulação AM-DSB, existe a modulação AM-SSB SC (banda lateral única). Além disso, essa modulação é feita sem a transmissão da portadora (com maior eficiência energética, portanto). As principais desvantagens que essa modulação apresenta são circuitos mais complexos no modulador e demodulador e a necessidade de gerar a portadora na recepção para que o sinal seja detectado corretamente.

A modulação SSB é utilizada em transmissões de rádio, transmissões telefônicas que utilizam FDM (*Frequency Division Multiplexing*) e transmissões de dados em alta velocidade (modem V35 / V36 / V37).

A geração do sinal modulado em banda lateral única pode ser feita com a modulação em amplitude convencional (multiplicação pela portadora com deslocamento de espectros), seguida de uma filtragem do sinal modulado, na qual a portadora e uma das bandas laterais, superior ou inferior, são suprimidas. O filtro pode ser cerâmico, quartz, LC ativo ou passivo, dependendo das aplicações e frequências de operação. É importante que haja uma resposta do filtro bastante íngreme separando as bandas atenuada e a passante.

No kit utilizado neste experimento, o bloco modulador “Balance Modulator” gera um sinal AM-DSB SC. O kit também possui um filtro cerâmico, para geração de SSB SC.

A demodulação é análoga à que é feita para o caso de AM DSB convencional. Multiplica-se o sinal recebido pela senoide de sua portadora, passando o sinal resultante por um filtro passa-baixas para detecção. Um exemplo é o envio da banda lateral superior de uma senoide de frequência f , sendo F a frequência da portadora transmitida e F' a frequência da portadora gerada na recepção:

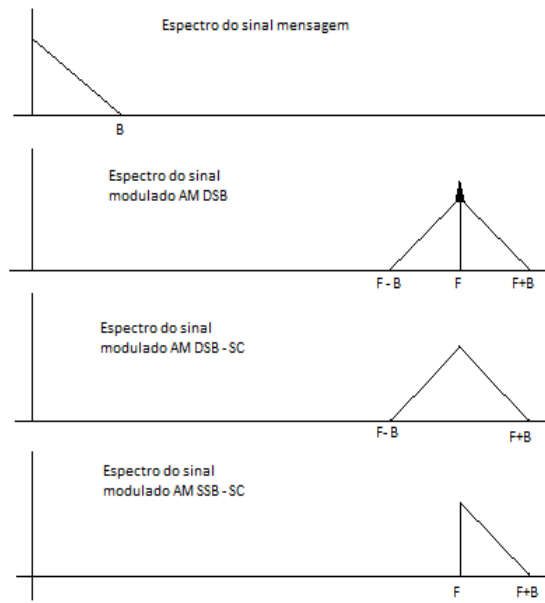


Figura 23: Espectros dos sinais para diversas modulações em amplitude.

$$\begin{aligned}
 v_M(t) &= K \cos(2\pi(F + f)t) \\
 v_M(t) \cdot \cos(2\pi F't) &= K \cos(2\pi(F + f)t) \cdot \cos(2\pi F't) \\
 &= \frac{K}{2} [\cos(2\pi(F - F' + f)t) + \cos(2\pi(F + F' + f)t)]
 \end{aligned}$$

Que após a passagem pelo filtro passa-baixas, torna-se:

$$v_{\text{demodulado}}(t) = \frac{K}{2} \cos(2\pi(F - F' + f)t) \quad (8.1)$$

Se $F = F'$, recupera-se o sinal original. Caso contrário, há um desvio na frequência, daí a importância da geração, na recepção, de portadora em coerência de frequência e de fase com a que foi enviada. Este fato é ainda melhor percebido considerando que as mensagens costumam ficar espalhadas em um espectro de frequências, como mostra a Figura 23.

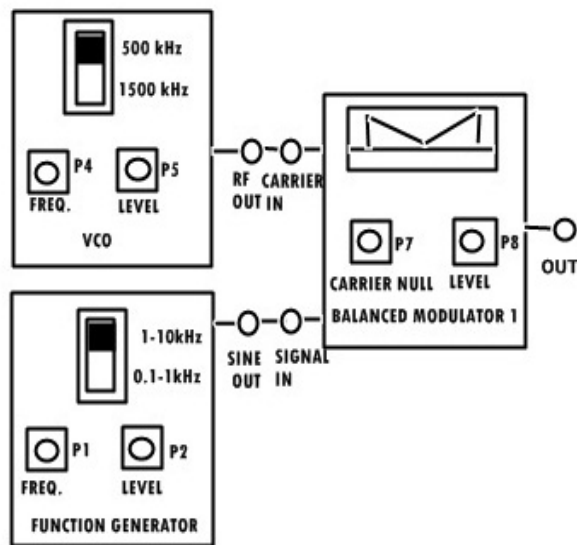


Figura 24: Diagrama de blocos para o estudo do gerador AM DSB - SC.

8.3 Procedimentos

8.3.1 Equipamentos

- Módulos ACL-01;
- Fonte de tensão para os kits;
- Osciloscópio 20MHz;
- Cabos conectores;
- Gerador de sinais.

Nota: manter todas as chaves de falta desligadas (SWITCH FAULTS OFF)

8.3.2 Estudo da Operação de um Modulador em Amplitude com Portadora Suprimida

1. A Figura 24 ajuda a compreender a montagem.
2. Ligue o kit ACL-01 à fonte de tensão, estando a mesma desligada. Posteriormente, a fonte deve ser ligada.

3. Gere uma senoide no bloco **Function Generator** com $V_{pp} = 1V$ e frequência de 1 kHz, aproximadamente (verifique o sinal no osciloscópio, é importante lembrar que as medições de tempo e frequência do osciloscópio digital são melhor realizadas quando é possível visualizar claramente ao menos um período de oscilação da onda).
4. Através do gerador de sinais, gere uma senoide com V_{pp} de cerca de 2 V e frequência de cerca de 457 kHz (verifique o sinal no osciloscópio).
5. Use os cabos para conectar a saída do **Function Generator** à entrada **Signal in** do módulo **Balanced Modulator 1**, e a saída do gerador de sinais à entrada **Carrier in** do mesmo.
6. Coloque o pino **Carrier null** na posição central ou de maneira que seja obtida uma forma de onda como na Figura 25, em que a portadora é eliminada. O pino **Out level** deve estar totalmente rotacionado no sentido horário.
7. Observe a saída do modulador e a entrada **Signal in** no osciloscópio. Minimize o quanto for possível o nível do sinal mensagem através do pino **Level** do **Function Generator** e ajuste o **Carrier null** para obter o mínimo de saída da portadora na saída do modulador. Ajuste a amplitude do **Function Generator** para cerca de 0.5V de V_{pp} . Note que a envoltória do sinal modulado não corresponde ao sinal mensagem, como era o caso em AM DSB com portadora.
8. Varie a amplitude do sinal modulante e verifique as variações correspondentes no sinal modulado. Verifique que o sinal modulado se anula sempre que o modulante se anula (o que não ocorria em AM DSB com portadora).
9. Varie a frequência do sinal modulante (**Function Generator**) e verifique as variações correspondentes do sinal modulado.

8.3.3 Estudo da Geração em Banda Lateral Única (SSB)

1. A Figura 26 ilustra a montagem a ser feita.
2. Gere uma senoide no bloco **Function Generator** com cerca de 1 V de V_{pp} e frequência de 3 kHz, aproximadamente (verifique o sinal no osciloscópio, lembre-se de observar ao menos um período).
3. Mantenha o gerador de sinais com uma senoide com V_{pp} de cerca de 2 V e frequência de cerca de 457 kHz.

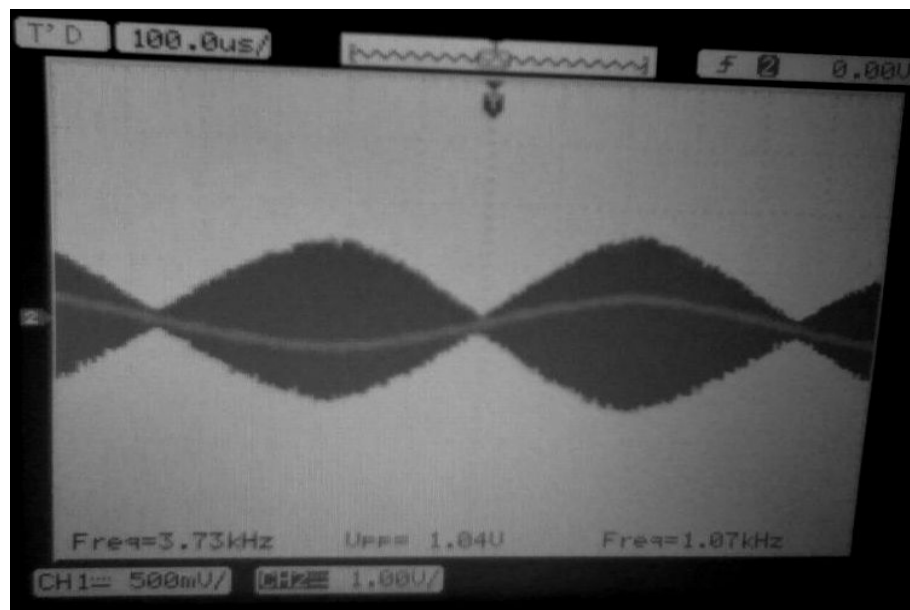


Figura 25: Saída do modulador com portadora suprimida (sinal mais espesso) e sinal mensagem (senoide pura).

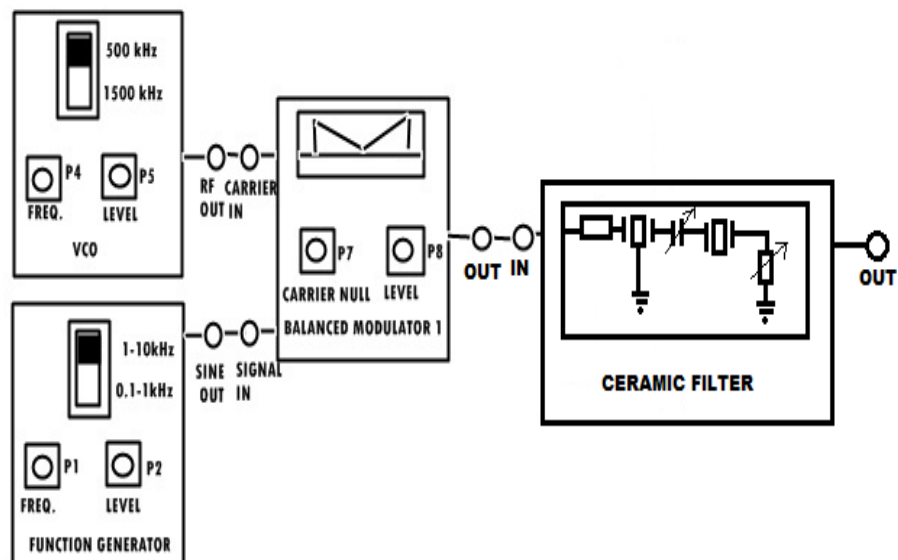


Figura 26: Diagrama de blocos para geração de sinal AM SSB -SC.

4. Coloque o pino **Carrier null** na posição central ou de maneira que seja obtida uma forma de onda como na Figura 25, em que a portadora é eliminada. O pino **Out level** deve estar totalmente rotacionado no sentido horário.
5. Conecte a saída do modulador à entrada do filtro cerâmico e observe a saída deste no osciloscópio.
6. Meça a frequência f_c da portadora (**Carrier in**), f_m do sinal modulante (**Function Generator**) e f_{SSB} da saída do filtro (OUT do **Ceramic filter**) através do osciloscópio.
7. Anote as medições e verifique se a banda lateral superior está sendo transmitida ($f_{SSB} = f_c + f_m$). Pode haver instabilidades do aparelho de medição.
8. Repita as medições aumentando a frequência da portadora para 463kHz e verifique se a banda lateral inferior está sendo transmitida ($f_{SSB} = f_c - f_m$).
9. Aumente a frequência do sinal modulante no bloco **Function Generator** (P1) e verifique que a saída do filtro é atenuada. A que pode ser atribuído este fato?
10. Para qual ou quais frequências do sinal modulante obteve-se a maior amplitude do sinal modulado?
11. Qual será a frequência aproximada de ressonância do filtro utilizado? Por que você acredita que seja este valor?

8.3.4 Estudo da Recepção em Banda Lateral Única (SSB SC) usando Detector de Produto.

1. A Figura 27 ilustra a montagem a ser feita.
2. Mantenha uma senoide no bloco **Function Generator** com cerca de 1 V de V_{pp} e frequência de 3 kHz, aproximadamente, conectada a **signal in** de **Balanced Modulator 1**.
3. Mantenha uma senoide no gerador de sinais com V_{pp} de cerca de 2 V e frequência de cerca de 457 kHz conectada a **Carrier in** de **Balanced Modulator 1**.
4. Mantenha o pino **Carrier null P7** do **Balanced Modulator 1** na posição central em que a portadora é eliminada. O pino **OUT level P8** deve permanecer totalmente rotacionado no sentido horário.

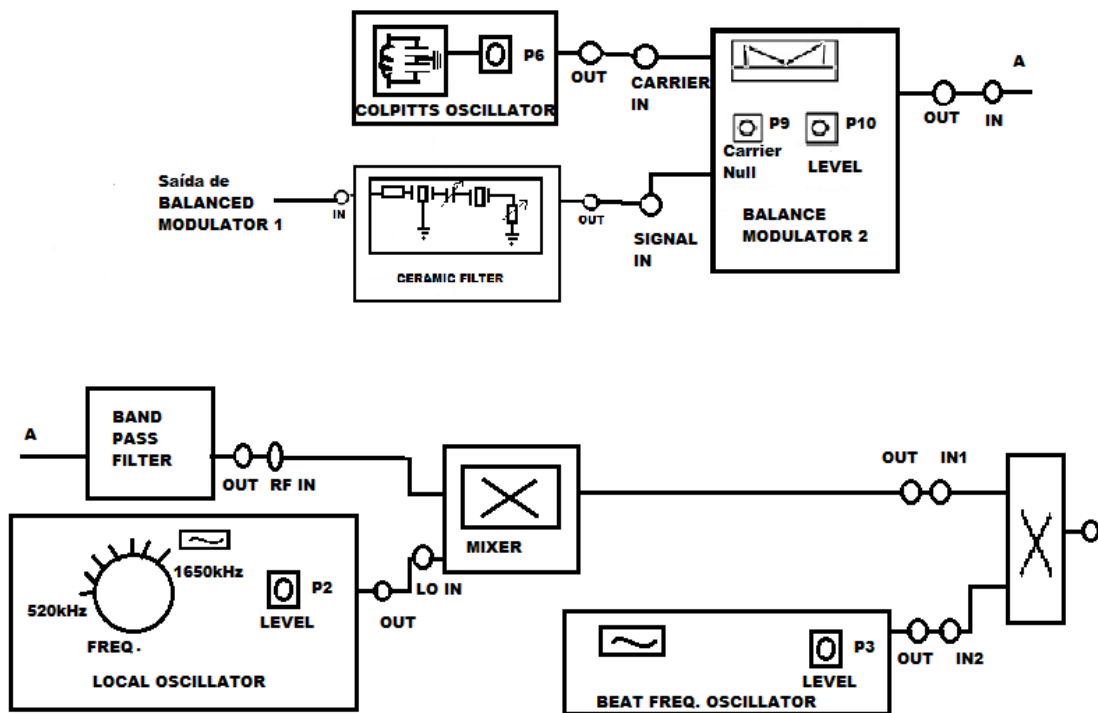


Figura 27: Diagrama de blocos para recepção de sinal AM-SSB SC.

5. O pino **Carrier null P9** do **Balanced Modulator 2** também na posição central, em que a portadora é eliminada. O pino **OUT level P10** também deve permanecer totalmente rotacionado no sentido horário.
6. Conecte a saída de **Balanced Modulator 1** à entrada do filtro cerâmico e observe a saída deste no osciloscópio.
7. Conecte a saída do filtro cerâmico a **signal in** do **Balanced Modulator 2**.
8. Conecte a saída de **Colpitt's oscillator** a **Carrier in** de **Balanced Modulator 2**.
9. Conecte a saída de **Balanced Modulator 2** à entrada de **Bandpass Filter**.
10. Conecte a saída de **Bandpass Filter** à entrada **rf IN** do **Mixer**.
11. Observe o sinal SSB na saída do filtro cerâmico e na saída do filtro passa-faixa. De que forma sugere-se, nessa última saída, que apenas uma das bandas do sinal gerado pelo modulador foi extraída?
12. Conecte a saída de **Bandpass Filter** à entrada **rf IN** do **Mixer** em ACL-02.

13. Conecte a saída de **Local Oscillator** à entrada LO IN do **Mixer**, P2 totalmente rotacionado no sentido horário.
14. Conecte a saída de **Mixer** a IN1 de **Product Detector**.
15. Conecte a saída de **BFO** a IN2 de **Product Detector**, P3 totalmente rotacionado no sentido horário.
16. Observe a saída final em OUT do **Product Detector** em um canal do osciloscópio e o sinal modulante (saída de **Function Generator**) em outro canal. Altere a frequência do **Local Oscillator** para 1,89 MHz ou de maneira que a frequência do sinal demodulado (OUT de **Product Detector**) acompanhe a frequência do sinal modulante. Se a frequência da portadora (gerador de sinais ou **VCO**) coincidir com a frequência da saída de **BFO** (*Beat Frequency Oscillator*), melhores resultados são obtidos.
17. Aumente a frequência do sinal modulante e verifique que o sinal detectado é atenuado e tende a zero. Observe também, na frequência anterior do sinal modulante, que mesmo quando a portadora e **BFO** possuem a mesma frequência, há pequenos desvios de frequência no sinal recebido. A que se deve esse fato?

9 Preparação do Experimento 4: Estudo da Modulação em Frequência e em Fase

1. Sabendo que um sinal modulado em frequência é dado por

$$\begin{aligned} v(t) &= A \sin[\theta(t)] \\ &= A \sin\left[\Omega t + \int_{-\infty}^t K v_m(\alpha) d\alpha\right] \\ &= A \sin\left[\Omega t - \frac{KB}{\omega} \cos(\omega t)\right] \end{aligned}$$

em que o sinal modulante é $v_m(t) = \sin(\omega t)$, encontre as frequências instantâneas máxima e mínima em função de Ω , K e B .

2. Encontre a diferença entre essas duas frequências (desvio de frequências) e calcule o índice de modulação FM $m_f = \frac{\Delta F}{2f}$, em que $f = \omega/(2\pi)$.
3. Por que os sinais modulados em frequência na prática ocupam um espectro muito maior que o desvio de frequência que foi calculado?

10 Guia do Experimento 4: Estudo da Modulação em Frequência e em Fase

10.1 Objetivos

- Traçar a curva para a modulação característica de um modulador varactor;
- Calcular a sensibilidade de modulação de um modulador varactor;
- Observar e medir o desvio de frequência e o índice de modulação de FM;
- Estudar a modulação em frequência usando um modulador de reatância;
- Estudar a modulação em fase.

10.2 Teoria

Neste experimento serão estudadas a modulação em frequência (FM - *Frequency Modulation*) e a modulação em fase (PM - *Phase Modulation*). Nos dois tipos de modulação, a alta frequência de uma senoide (portadora) será alterada através do sinal modulante (mensagem).

Os sinais modulante $v_m(t)$ e portadora $v_c(t)$, novamente para a simplificação dos estudos, serão senoides, em que $\Omega \gg \omega$.

$$v_m(t) = B \sin(\omega t), \quad (10.1)$$

$$v_c(t) = A \sin(\Omega t). \quad (10.2)$$

A frequência instantânea de um sinal modulado em frequência varia linearmente com a amplitude do sinal modulante, como na equação a seguir.

$$\Phi(t) = \Omega + K v_m(t) \quad (10.3)$$

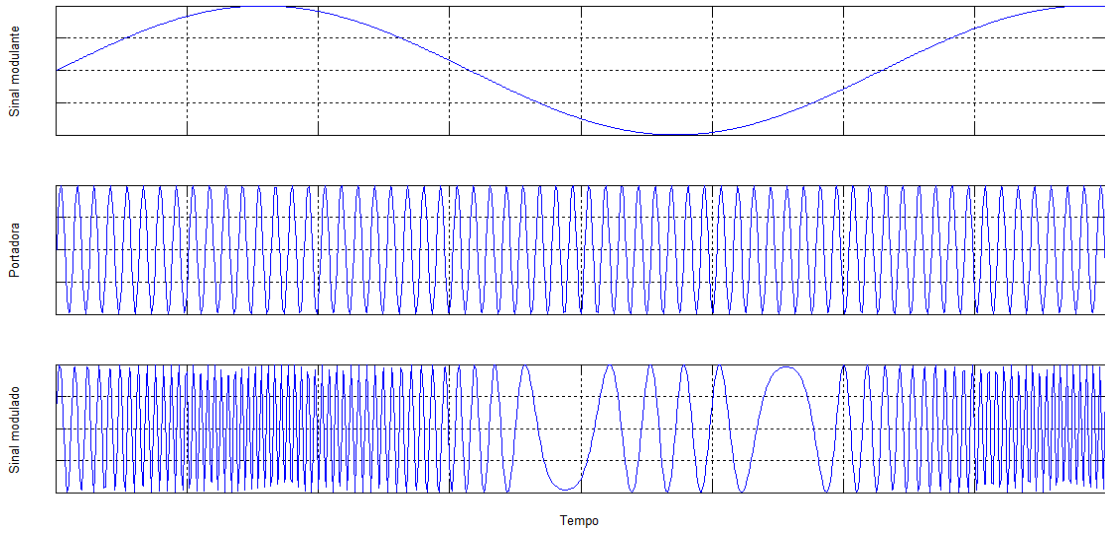


Figura 28: Exemplo de sinal modulado em frequência (amplitude *versus* tempo).

O ângulo instantâneo é obtido pela integração da frequência instantânea no tempo. Assim:

$$\begin{aligned}
 \theta(t) &= \int_t \Phi(\alpha) d\alpha \\
 &= \int_t [\Omega + K v_m(\alpha)] d\alpha \\
 &= \int_t [\Omega + K B \sin(\omega t)] d\alpha \\
 &= \Omega t - \frac{KB}{\omega} \cos(\omega t)
 \end{aligned} \tag{10.4}$$

Portanto, a expressão matemática para o sinal modulado em frequência, neste caso, é

$$\begin{aligned}
 v(t) &= A \sin[\theta(t)] \\
 &= A \sin\left[\Omega t - \frac{KB}{\omega} \cos(\omega t)\right]
 \end{aligned} \tag{10.5}$$

A modulação PM é análoga à FM, mas varia-se sua frequência instantânea linearmente com a derivada do sinal modulante.

$$\Phi(t) = \Omega + K \frac{dv_m(t)}{dt} \tag{10.6}$$

Portanto, o ângulo instantâneo para PM é:

$$\begin{aligned}
 \theta(t) &= \int_t \Phi(\alpha) d\alpha \\
 &= \int_t [\Omega + K \frac{dv_m(\alpha)}{d\alpha}] d\alpha \\
 &= \Omega t + K v_m(t)
 \end{aligned} \tag{10.7}$$

O sinal modulado em fase é expresso por:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= A_{\text{sen}}[\theta(t)] \\
 &= A_{\text{sen}}[\Omega t + K v_m(t)]
 \end{aligned} \tag{10.8}$$

A frequência instantânea de um sinal modulado em frequência, em Hz, é dada por:

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{10.9}$$

Para o exemplo citado de FM, com a fase instantânea dada pela equação 10.4, tem-se:

$$F(t) = \frac{\Omega}{2\pi} + \frac{KB}{2\pi} \text{sen}(\omega t) \tag{10.10}$$

Percebe-se, portanto, que a frequência instantânea varia entre $F_{\min} = \frac{\Omega}{2\pi} - \frac{KB}{2\pi}$ e $F_{\max} = \frac{\Omega}{2\pi} + \frac{KB}{2\pi}$. O desvio de frequência ΔF representa o maior deslocamento de frequência do sinal modulado em relação à frequência da portadora e é dado por:

$$\Delta F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \tag{10.11}$$

É possível também definir o índice de modulação m_f , para esta situação, como a razão entre o desvio de frequência e a largura de banda do sinal mensagem ($f = \omega/(2\pi)$).

$$m_f = \frac{\Delta F}{f} \tag{10.12}$$

10.2.1 Geração de Modulação em Frequência

Os circuitos utilizados para promover a modulação em frequência devem variar a frequência da portadora de acordo com a amplitude de um sinal mensagem (de baixa frequência). Na prática, há duas maneiras principais de gerar FM.

10.2.1.1 Método Direto

Um oscilador deve ser utilizado para gerar o sinal, em que a reatância de um dos elementos do circuito ressonante depende da tensão modulante. O dispositivo mais comum utilizado é o varactor ou varicap, um tipo de diodo cuja capacitância varia em função da tensão de polarização reversa. A frequência da portadora é estabelecida com circuitos AFC (*Automatic Frequency Control*) ou PLL (*Phase Locked Loop*).

10.2.1.2 Método Indireto

O sinal modulado FM é obtido neste caso por uma modulação em fase, depois que o sinal modulante foi integrado. No modulador em fase a portadora pode ser gerada por um oscilador de Hartley, cuja frequência é determinada por uma indutância fixa e uma capacitância variável fornecida por diodos varicap, novamente.

10.2.2 Vantagens e Desvantagens de FM

As vantagens principais da modulação em frequência para um sistema de comunicações são citadas abaixo.

- Apesar de ser uma modulação não-linear, este tipo de modulação é mais robusta contra não-linearidades impostas por um sistema (que ocorrem no uso de alguns tipos de amplificadores, por exemplo).
- A amplitude constante da onda em FM, além de permitir mais imunidade às não-linearidades, também fortalece o sinal contra um desvanecimento rápido, pelo uso de controle automático de ganho.
- A modulação em frequência ou em fase é menos vulnerável a interferências de outras rádios de que AM, além de permitir que haja ganho na relação sinal ruído em troca de largura de banda.

A principal desvantagem da transmissão em FM é que a largura de banda utilizada é muito grande em relação à transmissão em AM, necessitando-se utilizar frequências mais altas de portadoras, geralmente na faixa VHF (30 MHz a 300 MHz).

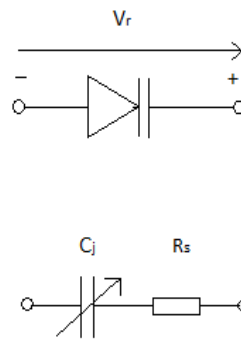


Figura 29: Símbolo e circuito equivalente, respectivamente, para o diodo varicap.

10.2.3 Transmissão em FM

Neste experimento, diferentemente do experimento em AM, a geração da portadora e a modulação em frequência são feitos em um mesmo bloco. Os moduladores estudados serão o varactor e o modulador de reatância.

O varicap, ou varactor, é um diodo cujos terminais fornecem uma capacitância dependente da tensão reversa aplicada. O símbolo para o dispositivo e o circuito equivalente são mostrados na Figura 29, em que:

- C_j = capacitância de junção;
- R_s = resistência em série (que diminui em função do aumento de tensão reversa aplicada).

A capacitância de junção C_j depende da tensão reversa V_R aplicada ao diodo, de acordo com a relação:

$$C_j = C_0 \left(1 + \frac{V_R}{V_D} \right)^\eta \quad (10.13)$$

em que:

- V_R = tensão reversa aplicada ao varicap;
- C_0 = capacitância de junção para $V_R = 0$;
- V_D = potencial de junção (0.6 V em diodos de silício);
- η depende do processo de fabricação, na faixa de 0,3 a 0,6, aproximadamente.

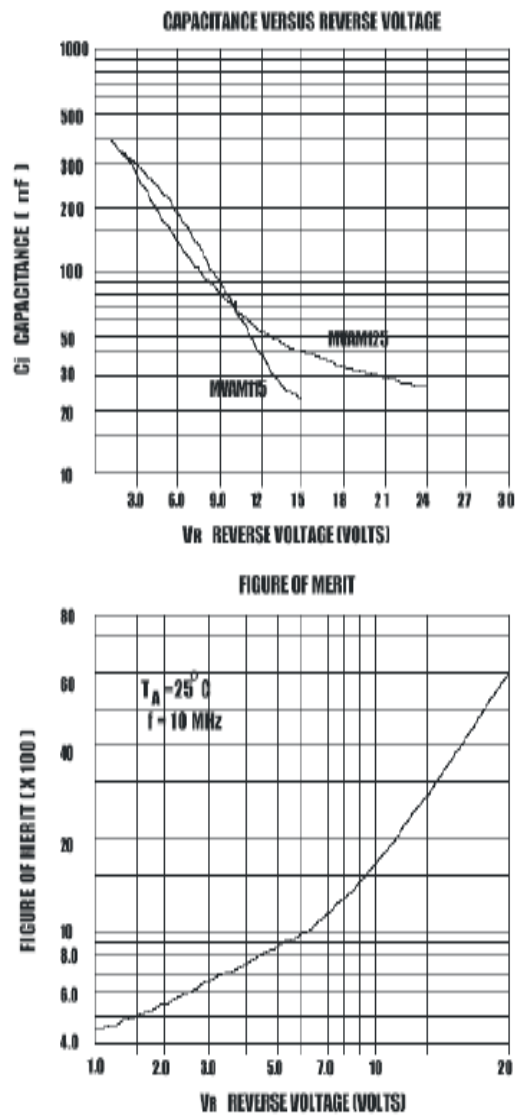


Figura 30: Curvas características do diodo Varicap.

A figura de mérito Q do diodo é expresso por: $Q = 1/(\omega C_j R_s)$. A Figura 30 expressa as curvas de C_j *versus* V_R e de Q *versus* V_R para o varicap usado no modulador FM.

O modulador de reatância funciona através de um amplificador CE, o qual possui um transistor que funciona como uma capacitância variável. Esta capacitância é utilizada em um circuito oscilador para gerar o sinal modulado em frequência.

10.3 Procedimentos

10.3.1 Equipamentos

- Kit ACL-03;
- Fonte;
- Osciloscópio;
- Voltímetro;
- Fonte de tensão DC;
- Cabos para conexões.

Nota: Manter todas as chaves de falhas (SWITCH FAULTS) desligadas.

10.3.2 Traçar a curva para a modulação característica de um modulador varactor.

A curva característica da modulação é dada pela frequência de saída do modulador como uma função da tensão de entrada modulante. É possível plotar esta curva através de várias medições, feitas caso a caso, ao variar-se a amplitude do sinal modulante estaticamente, isto é, por meio de níveis DC, e medindo-se a frequência correspondente na saída do modulador.

1. Conecte a fonte adequadamente ao kit ACL-03, ao fazê-lo, certifique-se de que a fonte está *desligada*;
2. Ligue a fonte e ajuste o bloco **Function Generator** com uma senoide de valores mínimos de amplitude e frequência (pinos P1 e P2 totalmente rotacionados no sentido anti-horário), JP4 em 1-10 kHz;

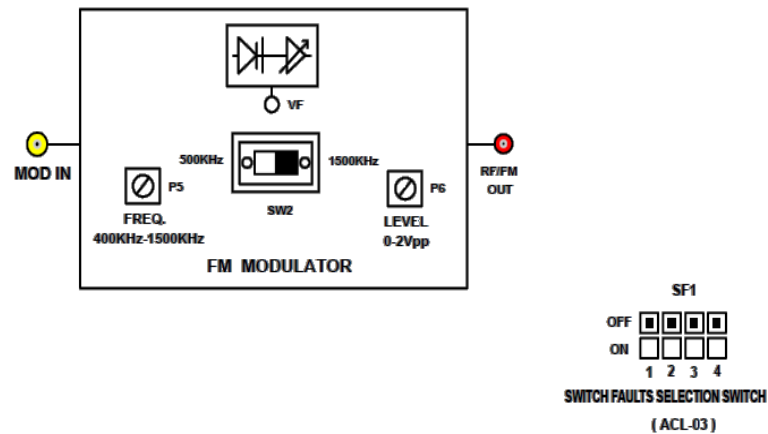


Figura 31: Diagrama de blocos.

Tensão em VF	Frequência do sinal modulado
-2,8	
-2,5	
-2,0	
-1,5	
-1,0	
-0,5	
0	
0,5	
1,0	
1,5	
2,0	
2,5	

Tabela 1: Tabela para preenchimento.

3. Conecte a saída do gerador de funções à entrada do modulador FM;
4. No bloco **Frequency Modulator**, coloque uma amplitude de cerca de 2V de pico a pico e a frequência mínima (mas a chave em 1500 kHz);
5. Conecte a saída **RF/FM OUT** em um osciloscópio;
6. Aplique valores contínuos de tensão no pino VF e meça no osciloscópio a frequência de saída do sinal modulado, preenchendo a Tabela 1;
7. Esboce um gráfico com os pontos obtidos.
8. Sabendo que é desejável trabalhar com dispositivos de comportamento linear, para quais valores de tensão em VF o comportamento do modulador será mais adequado?

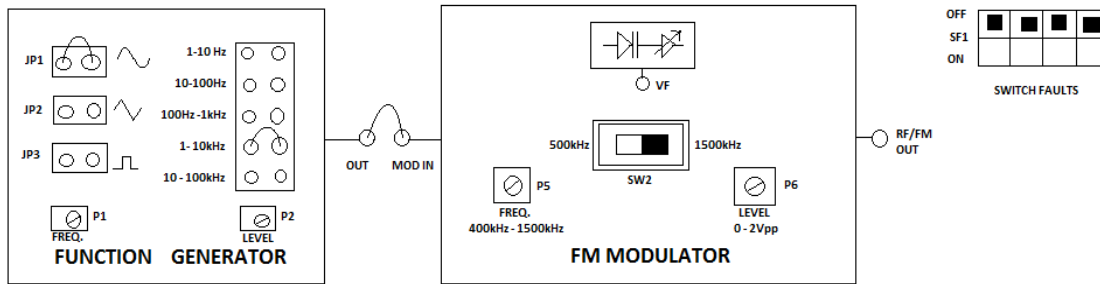


Figura 32: Diagrama de blocos para modulador que usa o varicap.

9. A sensibilidade no caso FM é dada por:

$$S = \frac{dF(v)}{dv}$$

em que $F(v)$ é a frequência instantânea em função da tensão modulante v . Na zona linear, essa relação pode ser aproximada pela razão:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta v}$$

Calcule a sensibilidade, com uma variação de frequência de 50 kHz, para o modulador do kit utilizado, com os dados obtidos.

10.3.3 Observar e medir o desvio de frequência e o índice de modulação de FM.

A Figura 32 indica a montagem a ser feita.

1. Conecte a fonte ao kit 03, certificando-se de que ela esteja desligada.
2. Conecte a saída do **Function Generator** à entrada (MOD IN) do modulador FM.
3. Ligue a fonte e gere uma onda senoidal (JP1), com LEVEL em cerca de 100 mV e frequência ao redor de 1 kHz no **Function Generator** (certifique-se no osciloscópio).
4. Matenha o modulador FM com tensão de 2 V de pico a pico, chave em 1500 kHz, mas agora coloque a frequência no centro.
5. Conecte o osciloscópio à saída do modulador **FM/RF OUT**. Deve ser obtida uma forma de onda semelhante à da figura 33.

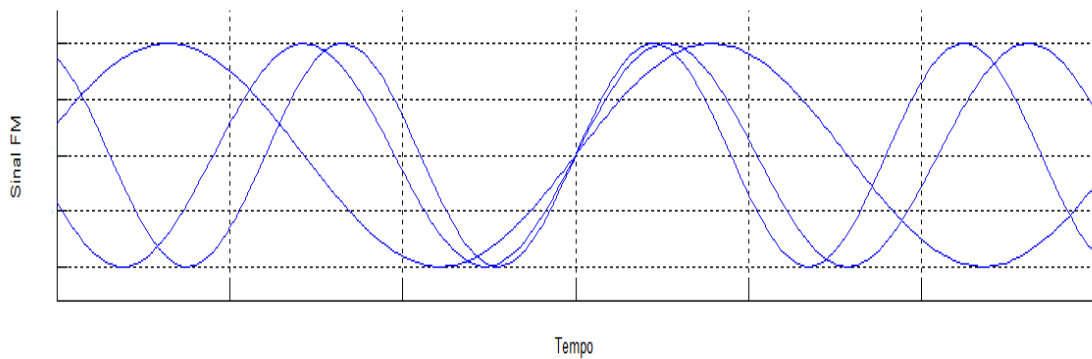


Figura 33: Saída do modulador em frequência

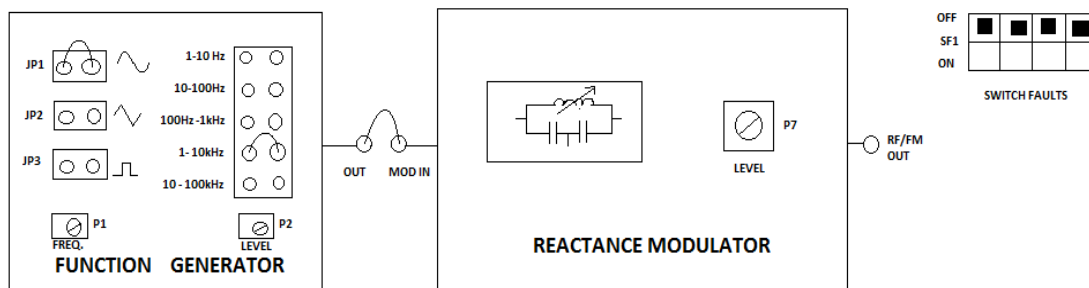


Figura 34: Diagrama de blocos para modulador de reatância.

6. O desvio de frequência ΔF pode ser calculado observando-se os diferentes períodos das senoides. No osciloscópio digital, pressione *measure* $\rightarrow$ *time* $\rightarrow$ *width*₊ e *measure* $\rightarrow$ *time* $\rightarrow$ *width*₋ para encontrar os períodos maior e menor, respectivamente (lembre-se de duplicar os valores para obter os períodos).
7. O desvio de frequência é dado por $\Delta F = (F_M - F_m)/2$, em que F_M é a maior frequência e F_m a menor. Percebe-se que se o modulador estiver operando em uma região linear, os desvios dessas duas frequências em torno da frequência F de operação serão iguais.
8. Calcule o índice de modulação $m_f = \Delta F/f$, em que f é a frequência do sinal modulante.

10.3.4 Modulação em frequência usando um modulador de reatância e medir o desvio de frequência.

1. Nessa montagem, observe a Figura 34.

2. Conecte a saída de **function generator** na entrada de **reactance modulator**.
3. Ligue a fonte e gere um sinal senoidal (JP1), com cerca de 0.1 V de pico a pico (use LEVEL), e FREQ. de cerca de 1 kHz.
4. Na saída do **reactance modulator**, a saída deve ter 2 V de pico a pico e frequência de cerca de 450 Hz, obtida variando-se TR6. Observe que esta saída também é semelhante à forma de onda da Figura 33.
5. Calcule o desvio de frequência e o índice de modulação, como na montagem anterior.

11 Preparação do Experimento 5: Demodulação em Frequência

1. No domínio da frequência, qual é a operação equivalente a derivar um sinal no tempo?
2. A informação de um sinal FM encontra-se em sua frequência, necessitando ser transmitida à amplitude do sinal demodulado. Seria uma boa alternativa para demodulação um dispositivo que realize sua derivada temporal?
3. Dado o sinal modulado $x_c(t) = A_c \cos \theta_c(t)$, em que $\theta'_c(t) = 2\pi[f_c + f_\Delta x(t)]$, encontre $x'_c(t)$.
4. Por que é importante que sinais modulados em frequência possuam amplitude constante nos casos de detecção por conversão FM para AM? No caso de canal com desvanecimento ou ruidoso, que tipo de circuito poderia eliminar essa variação de amplitude do sinal modulado?

12 Guia do Experimento 5: Demodulação em Frequência

12.1 Objetivos

- Traçar a curva característica da demodulação FM;
- Observar as formas de onda do sinal demodulado *Foster Seeley*;
- Estudar o detector de fase bloqueada (PLL);
- Estudar o detector em quadratura;
- Estudar o detector de ressonância sincronizado.

12.2 Teoria

12.2.1 Demodulação em frequência

Para demodular um sinal FM é necessário um circuito que apresente na saída um sinal de tensão proporcional ao desvio de frequência do sinal modulado de entrada. A curva ideal de demodulação é uma linha reta que apresenta um comportamento linear apenas para determinada escala de frequência, semelhante a da Figura 35, e que permite a observação de alguns fatores:

- A frequência instantânea f do sinal modulado, oscilando entre $f1$ e $f2$ (f_c é a frequência da portadora);
- A curva característica tensão/frequência do demodulador;
- O sinal detectado;

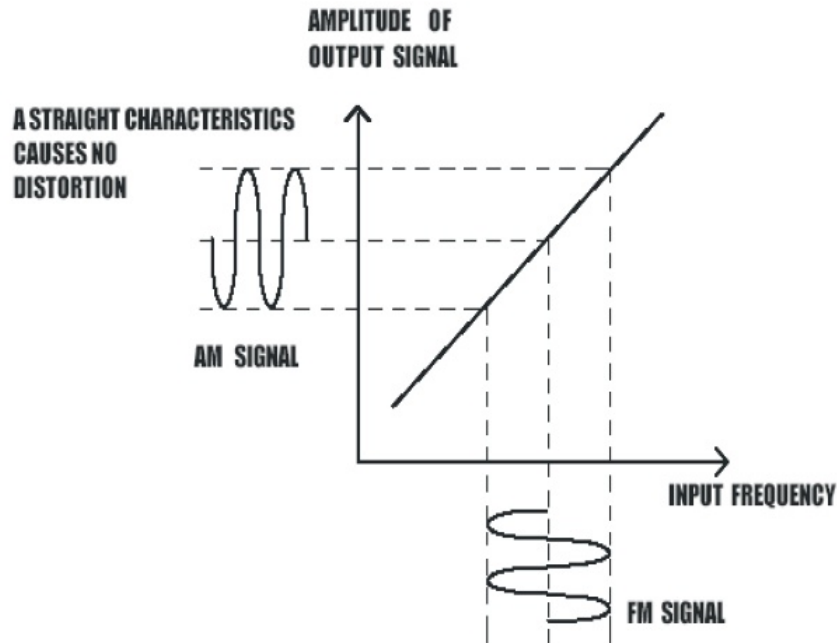


Figura 35: Relação Ideal Tensão/Frequência de Demodulação

12.2.2 Sensibilidade e demodulação não-linear

A sensibilidade e a não linearidade são características do demodulador em frequência. Ambos os parâmetros podem ser obtidos por meio da curva característica de demodulação (figura 35). Sensibilidade é definida como:

$$S = \frac{dV}{df} \approx \frac{\Delta V}{\Delta f}, \quad (12.1)$$

em que $V(f)$ é a tensão instantânea na saída, função da frequência f . Se S_c e S_1 são as sensibilidades na frequências da portadora e em f_1 , então a não linearidade (N.L.) é definida como:

$$NL = \frac{S_c - S_1}{S_c} \cdot 100 \quad (12.2)$$

12.2.3 Demodulação do sinal FM

Um receptor FM é bastante semelhante a um receptor AM. A diferença está no fato que se extrai informação da variação de frequência, ao invés da variação de amplitude. Sendo assim, o requisito básico do demodulador é converter as mudanças de frequência em variação de tensão. Para conseguir isto, ele deve possuir, idealmente, uma relação

tensão/frequência semelhante a apresentada na Figura 35.

12.2.4 Circuito do Demodulador em Frequência

Para detecção do sinal modulado em frequência, diferentes circuitos podem ser usados. A seguir, são apresentados alguns destes que estão disponíveis no kit do laboratório.

12.2.4.1 Limitador de Amplitude

Demoduladores de frequência são geralmente sensíveis a variação de amplitude do sinal FM de entrada. Isso quer dizer, que a saída depende não apenas da variação de frequência do sinal de entrada como também de uma eventual variação de amplitude (causada por ruído ou distúrbios, por exemplo). Para minimizar esse efeito, um circuito limitador pode ser incluído para reduzir ou remover essas variações indesejadas. As curvas características do limitador de tensão ideal e real são apresentadas na figura 36. No primeiro caso, a saída é constante para qualquer valor de entrada, enquanto no segundo, esta só é constante quando o sinal de entrada está além de um valor mínimo.

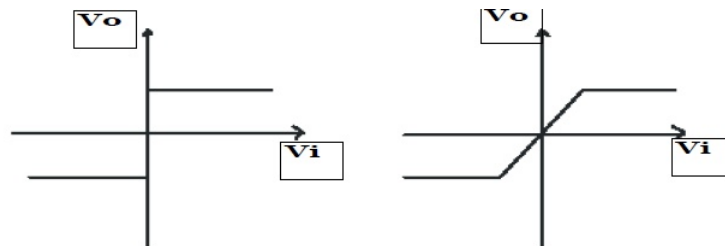


Figura 36: Característica Ideal e Real do Limitador de Amplitude.

12.2.4.2 Detector *Foster-Seeley*

A Figura 37 apresenta um circuito típico de um detector *Foster-Seeley*. O sinal FM é acoplado indutivamente a um circuito ressonante L_2C_2 , sintonizado para a frequência central do sinal modulado. O mesmo sinal também passa por C_1 até o ponto central de L_2 . Os diodos D_1 e D_2 , com os filtros passa-baixa RC, formam dois detectores de envoltória.

A frequência para qual o circuito L_2C_2 é sincronizado é f_o . O modo de operação do circuito é analisado para três situações:

1. **Frequência instantânea f do sinal FM é igual a f_o :** As tensões que atingem D_1 e D_2 são a soma vetorial da tensão V_{FM} (amplitude do sinal Fm) e $+/- V_{ind}$ (tensão

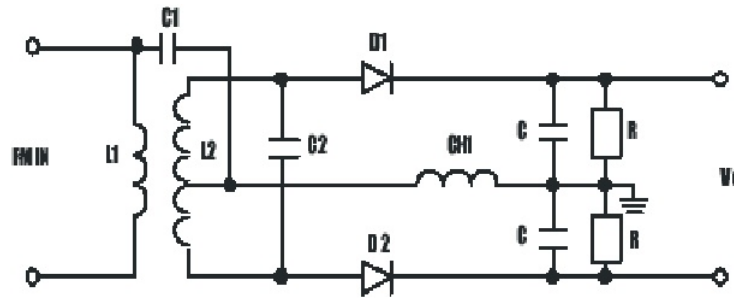


Figura 37: Detector *Foster-Seeley*.

induzida) , possuindo a mesma amplitude mas sinais opostos. A saída V_0 , que é a soma dos sinais detectados, será nula.

2. **Frequência instantânea f é superior a f_0 :** O circuito L_2C_2 terá um comportamento indutivo e as tensões nos diodos serão diferentes em amplitude. A saída V_0 apresentará um tensão positiva.

3. **Frequência instantânea f é menor que f_0 :**

O circuito ressonante L_2C_2 apresenta um comportamento capacitivo e as tensões nos diodos terão amplitudes diferentes, porém resultando em uma tensão negativa.

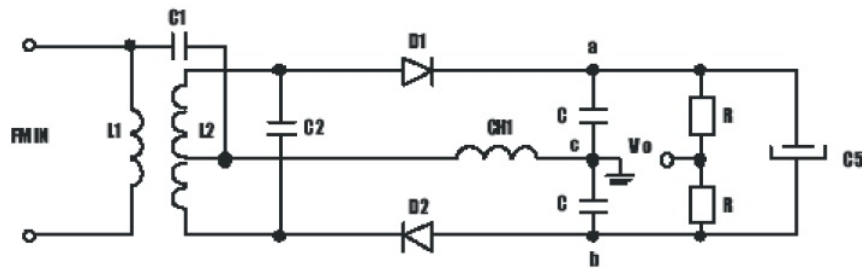
A principal desvantagem do demodulador *Foster-Seeley* é que ele detecta variações de amplitude no sinal de entrada. Além disso, as tensões V_{D1} e V_{D2} também dependem deste parâmetro. Este inconveniente é minimizado no demodulador *ratio*.

12.2.4.3 Demodulador *Ratio*

O circuito demodulador *Ratio* é apresentado na Figura 38. Este, possui um comportamento semelhante ao caso anterior, porém a inclusão do capacitor C_5 (de alto valor) reduz as flutuações da tensão V_{ab} que ocorrem devido a variações da amplitude do sinal de entrada. Dessa forma, a saída V_0 só será afetada pelas variações na frequência deste sinal.

12.2.4.4 Detector em Quadratura

O diagrama funcional do detector de quadratura é apresentado na Figura 39. Este receptor realiza a multiplicação entre o sinal FM e este mesmo sinal defasado por um circuito LC. Na frequência de ressonância, que corresponde a frequência central do sinal FM, a fase é 90° . Esta multiplicação produz muitos componentes espectrais, entre eles

Figura 38: Detector *Ratio*.

um que é proporcional ao sinal mensagem, sendo este capturado pelo filtro passa-baixa em sequência.

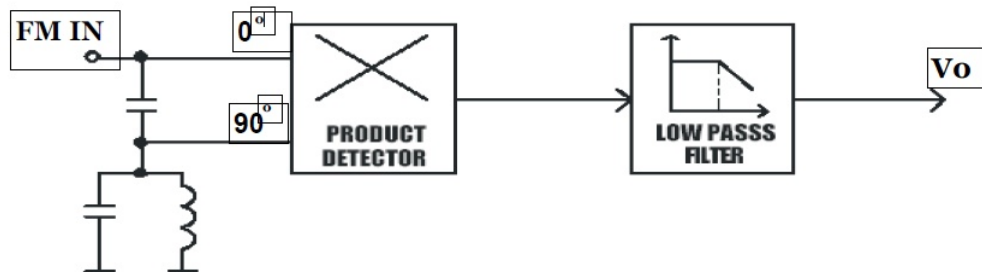


Figura 39: Detector em Quadratura

12.2.4.5 Detector PLL (*Phase Locked Loop*)

O diagrama de blocos do detector PLL pode ser visto na Figura 40. O oscilador de tensão controlada (VCO) possui sua frequência ajustada por uma tensão DC advinda do filtro passa-baixa. Esta tensão mantém o oscilador rodando com a mesma tensão do sinal de entrada, porém defasado de 90° . Isto é feito, pois se o sinal FM variar em frequência, o VCO deve segui-lo, e para isso, é necessário que a tensão DC acompanhe essa variação. Essa mudança gera o sinal demodulado na saída. Essa deve passar por um *buffer* para evitar efeitos de distúrbios vindos do VCO e depois por um amplificador de áudio.

A resposta em frequência é altamente linear, como apresentado na Figura 35.

12.2.4.6 Detector de Ressonância Sincronizado

Este pode ser considerado o mais simples tipo de demodulador. O sinal FM de entrada passa por um circuito que transforma as variações de frequência em variações de tensão na saída. Isso significa transformar o sinal FM em um sinal modulado em amplitude (AM). Este sinal é repassado para um circuito diodo detector (detector de envoltória),

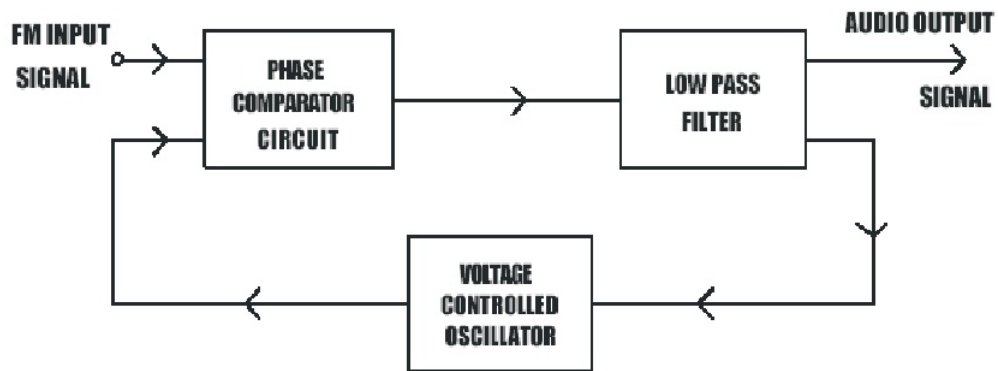


Figura 40: Diagrama de Blocos do PLL

gerando a saída final de áudio que aparece no cátodo. Este sinal ainda passa por um filtro passa-baixa para remover o sinal DC indesejado e o *ripple*.

12.3 Equipamentos

- Kits ACL-03 e ACL-04;
- Fonte de tensão;
- Osciloscópio;
- Cabos conectores.

12.4 Procedimentos

12.4.1 Traçar a curva característica de demodulação FM (Demodulador *Foster Seeley*)

1. Conecte a fonte de tensão aos Kits ACL-03 e ACL-04;
2. De acordo com a figura 41, execute as seguintes conexões;
3. Conecte a saída do Modulador FM (**FM modulator**) a entrada do Demodulador *Foster-Seeley* no kit ACL-04;
4. Estabeleça um sinal de 1V de V_{pp} na saída do modulador. Chave em 500 kHz.
5. Coloque as chaves do demodulador na posição FS;

6. Conecte o osciloscópio na entrada e na saída do demodulador e meça a tensão neste ponto;
7. Estabeleça uma frequência de entrada de 450 kHz e verifique uma tensão nula na saída. Caso esta não apareça, faça os devidos ajustes.
8. Varie a frequência de entrada entre 400 e 500 kHz em passo de 5 kHz e verifique a variação da tensão na saída. Anote os valores em uma tabela. Os valores devem variar entre -100 mV e +100 mV.
9. Faça um gráfico com os valores obtidos e verifique se este está coerente com a Figura 35.

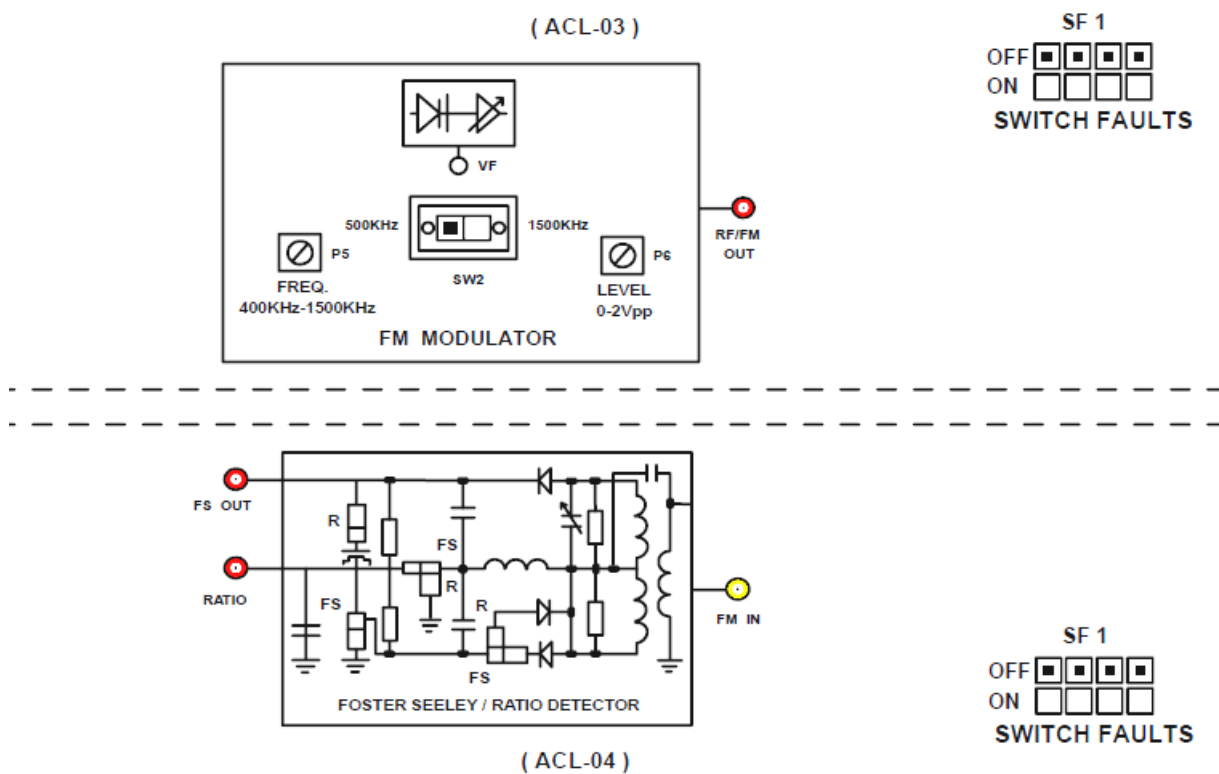


Figura 41: Diagrama de Bloco do Demodulador FM

12.4.2 Observar as formas de onda do sinal demodulado pelo Demodulador *Foster Seeley*

1. Conecte a fonte de tensão aos Kits ACL-03 e ACL-04;
2. De acordo com a figura 42, execute as seguintes conexões;

3. Conecte a saída **out** do gerador de funções (**function generator**) a entrada **mod in** do Modulador FM(**FM Modulator**);
4. Estabeleça os seguintes sinais:
 - (a) **Frequency Modulator**: Chaveada em 500 kHz, amplitude de $1V_{pp}$ e frequência em torno de 450 kHz;
 - (b) **Function Generator**: Onda senoidal(JP1) com amplitude de 100 mV de V_{pp} e frequência em torno de 500 Hz;
 - (c) **Local Oscillator**: Amplitude em torno de 1 V de V_{pp} e frequência de 1 MHz.
5. Conecte a saída(**out**) do oscilador(**local oscillator**) a entrada **lo in** do **mixer**, e a saída deste a entrada(**in**) do **limiter**;
6. Conecte a saída do **limiter** a entrada **fm in** do detector *Foster Seeley*, e a saída(**fs out**) deste à entrada do filtro passa-baixa(**low pass filter**);
7. Observe o sinal modulado (**fm/rf out**) e gere no oscilador local um sinal de mesma frequência. Visualize a saída do **limiter** e verifique que o sinal estabiliza em torno de $1.5V_{pp}$;
8. Conecte o osciloscópio na saída do demodulador e na saída do gerador de funções(sinal modulante). Se a frequência central do demodulador, da portadora e do oscilador local coincidirem, se obterá dois sinais semelhantes. Na verdade, ainda existirá algumas componentes de alta frequência no sinal de saída, provocando um *ripple*. O filtro passa-baixa é utilizado para minimizar este problema, além de retirar a componente DC do sinal. Consequentemente, na saída deste bloco, o sinal obtido se assemelhará fortemente ao sinal original.
9. Varie a amplitude do sinal FM e observe que o sinal demodulado também varia.
10. Aumente a frequência da portadora e observe que uma tensão positiva é adicionada ao sinal detectado. Continue aumentando o sinal até que apareçam distorções, indicando o início da região não linear.
11. Reduza a frequência da portadora ao valor proposto inicialmente (450 kHz) e aumente a amplitude do sinal modulante para gerar um sinal FM com desvio de frequência sobre a zona linear do detector. Se obterá um sinal bastante deformado.

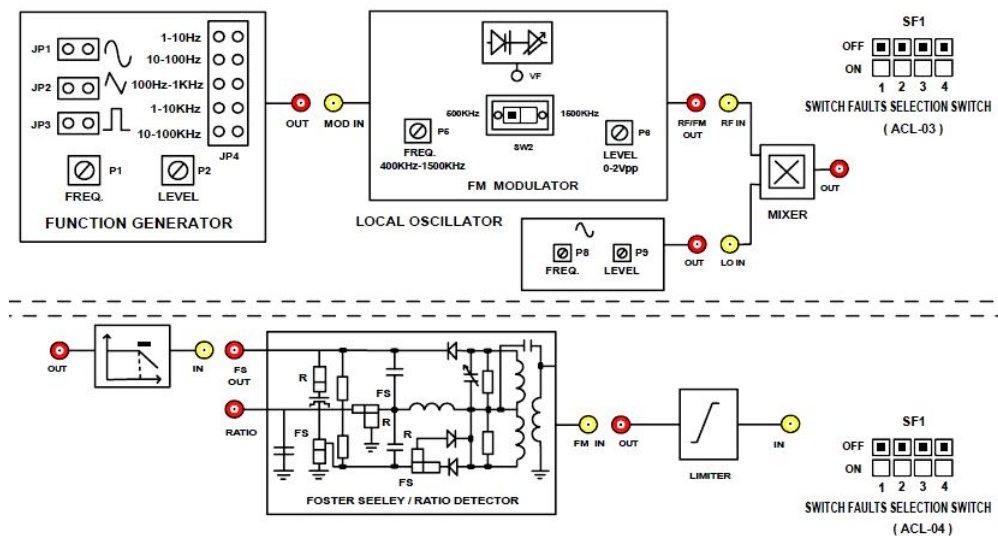


Figura 42: Diagrama de Bloco do Demodulador FM Foster-Seeley/ Ratio

12.4.3 Estudo da Demodulação *Ratio*

1. Execute os passos 1 ao 5 do experimento anterior;
2. Conecte a saída do **limiter** a entrada **fm in** do detector *Foster Seeley*, e a saída(**ratio out**) deste à entrada do filtro passa-baixa(**low pass filter**);
3. Execute os passos 7 ao 11 do experimento 12.4.2

12.4.4 Estudo do Detector de Fase Bloqueada(PLL)

1. Conecte a fonte de tensão aos Kits ACL-03 e ACL-04;
2. De acordo com a figura 43, execute as conexões seguindo os passos 3, 4 e 5 do experimento 12.4.2;
3. Conecte a saída do **limiter** a entrada **fm in** do detector PLL, e a saída deste à entrada do filtro passa-baixa(**low pass filter**);
4. Execute os passos 7 ao 11 do experimento 12.4.2;

12.4.5 Estudo do Detector em Quadratura

1. Conecte a fonte de tensão aos Kits ACL-03 e ACL-04;

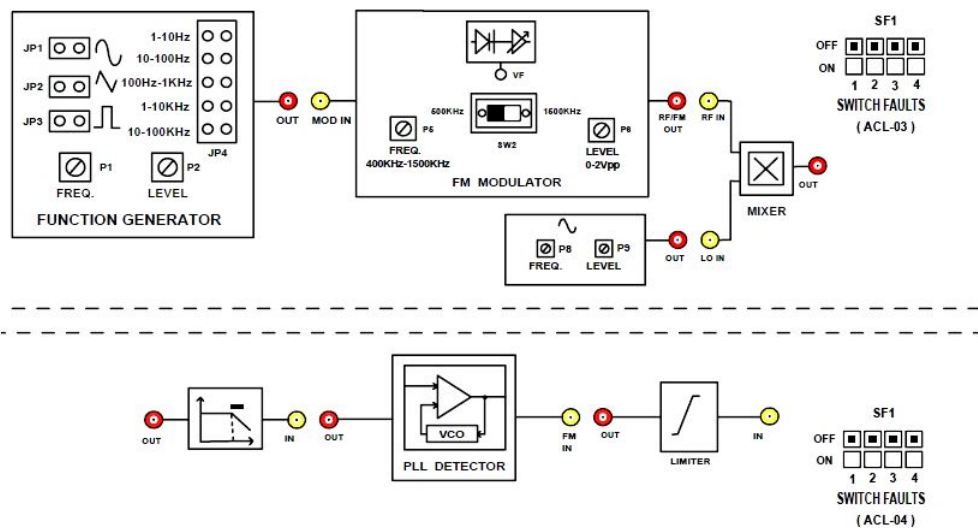


Figura 43: Diagrama de Bloco do Demodulador PLL

2. De acordo com a figura 44, execute as conexões seguindo os passos 3, 4 e 5 da seção 12.4.2;
3. Conecte a saída do **limiter** a entrada **fm in** do detector de quadratura, e a saída deste à entrada do filtro passa-baixa(**low pass filter**);
4. Conecte o ponto 0° na entrada **in1** do detector de quadratura;
5. Conecte o ponto 90° na entrada **in2** do detector de quadratura;
6. Observe as pontos 0° e 90° do detector de quadratura e verifique que estes estão defasados de aproximadamente 90°;
7. Execute os passos 7 ao 11 do experimento 12.4.2;

12.4.6 Estudo do Detector de Ressonância Sincronizado

1. Conecte a fonte de tensão aos Kits ACL-03 e ACL-04;
2. De acordo com a Figura 45, execute as conexões seguindo os passos 3, 4 e 5 do experimento 12.4.2;
3. Conecte a saída do **limiter** a entrada **fm in** do detector de ressonância, e a saída deste à entrada do filtro passa-baixa(**low pass filter**);
4. Execute o passo 8 do experimento 12.4.2;

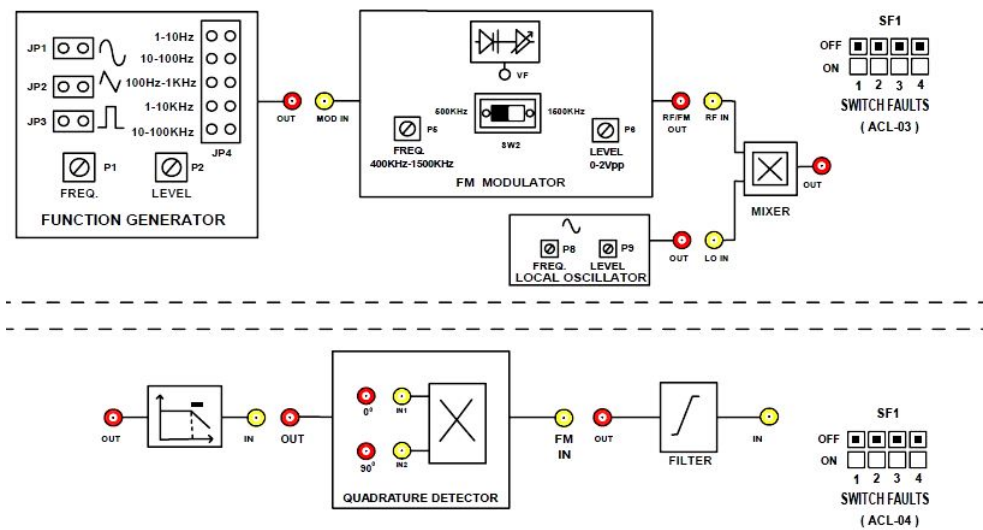


Figura 44: Diagrama de Bloco do Demodulador em Quadratura.

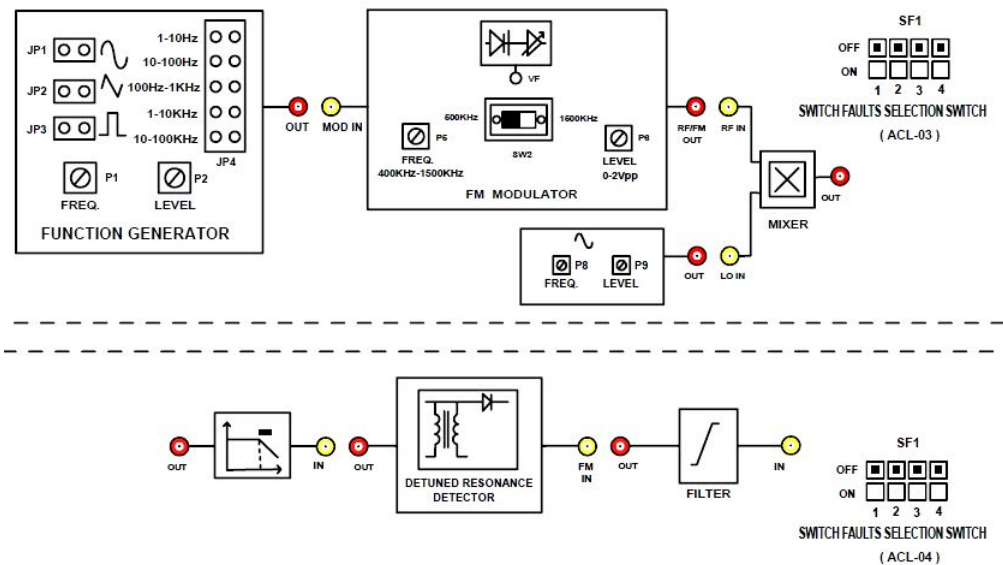


Figura 45: Diagrama de Bloco do Demodulador de Ressonância

12.5 Relatório

1. Esboce a curva com os valores obtidos no primeiro experimento;
2. Estabeleça a diferença dos sinais demodulados pelos diferentes tipos de demodulador;
3. Indique qual demodulador apresentou um sinal demodulado mais próximo do sinal modulante.

13 Conclusão

Concluiu-se através desse trabalho que, apesar das limitações que os kits adquiridos apresentaram, é possível utilizá-los no desenvolvimento da disciplina Laboratório de Princípios para Comunicações, de maneira que o investimento do Departamento de Engenharia Elétrica foi válido.

A utilização dos kits permitirá aos alunos uma visão mais realista dos problemas concretos que são observados na carreira de engenharia, com dispositivos e circuitos para comunicações reais, além das possíveis dificuldades acrescentadas com o uso dos aparelhos de medição. Essa abordagem realista, mesmo contendo dificuldades, permite que seja feita uma ligação com o conhecimento visto em sala de aula ou nos livros da disciplina teórica, fornecendo um aprendizado mais coeso e completo.

As principais falhas observadas foram no kit ACL-05, que não foi calibrado para a medição correta de potência, além de algumas falhas em alguns circuitos geradores de sinais do kit ACL-01, para o qual será necessária a utilização de um gerador de sinais externo. Outras falhas podem ocorrer nos demais kits, já que eles não foram testados na totalidade. Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos a fim de testar todos os kits adquiridos.

Referências

- 1 Carlson, A. B. and Crilly, P. B. and Rutledge, J. C., Communications Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communications, Fourth Edition, International Edition, McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- 2 Lathi, B. P., Modern Digital and Analog Communication Systems, Oxford University Press, 1998.
- 3 ACL-01: Amplitude Modulation Transmitter Kit and ACL-02: Amplitude Demodulation Receiver Kit, Experimental Manual, Falcon Electro-Tek PVT. LTD., Mumbai, India.
- 4 ACL-03: Frequency Modulation Transmitter Kit and ACL-04: Frequency Demodulation Receiver Kit, Experimental Manual, Falcon Electro-Tek PVT. LTD., Mumbai, India.