



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA



---

David Maykon Krepsky Silva  
Daniel Galbes Bassanezi

## Modulador AM

Data de realização do experimento:  
20 de agosto de 2015  
Série/Turma:  
1000/1011  
Prof. Dr. Jaime Laelson Jacob

8 de novembro de 2015

---

## **Resumo**

Neste trabalho foi realizado o estudo teórico e a simulação de dois circuitos moduladores AM/DSB, de forma a comprovar, em simulação computacional, a validade e as limitações do projeto de moduladores, utilizando o modelo de pequenos sinais. As topologias utilizadas empregam transistores, para o primeiro circuito, e um diodo, para o segundo. Foi observado que, embora o circuito com diodo tenha um número pequeno de componentes, resultando em baixo custo, o mesmo possui um fator de mérito menor que o do modulador transistorizado, resultando em uma perda de performance.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>1</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2 Teoria</b>	<b>4</b>
2.1 Modulação AM/DSB . . . . .	4
2.2 Medida do índice de modulação $\gamma$ . . . . .	4
2.2.1 Método 1 . . . . .	4
2.2.2 Método 2 . . . . .	5
2.3 Circuitos moduladores . . . . .	5
2.3.1 Modulador série . . . . .	6
2.3.2 Modulador a diodo . . . . .	6
<b>3 Metodologia Experimental</b>	<b>8</b>
3.1 Materiais . . . . .	8
3.1.1 Modulador série . . . . .	8
3.1.2 Modulador a diodo . . . . .	9
<b>4 Resultados</b>	<b>11</b>
4.1 Modulador série . . . . .	11
4.1.1 Sinal de saída . . . . .	11
4.1.2 Índice de modulação . . . . .	11
4.1.3 Espectro . . . . .	12
4.1.4 Fator de mérito . . . . .	13
4.2 Modulador a diodo . . . . .	14
4.2.1 Filtro . . . . .	14
4.2.2 Sinal de saída . . . . .	14
4.2.3 Índice de modulação . . . . .	15
4.2.4 Espectro do sinal modulado . . . . .	16
4.2.5 Fator de mérito . . . . .	16
<b>5 Discussão e Conclusão</b>	<b>18</b>

# 1 Introdução

O experimento tem como objetivo desenvolver o conhecimento dos alunos sobre circuitos que realizam a modulação AM/DSB de um sinal. Foram estudados duas topologias, sendo elas um modulador com diodo e um com transistores, onde foram analisados o fator de mérito ( $Q$ ) e o espectro do sinal de saída.

## 2 Teoria

### 2.1 Modulação AM/DSB

A modulação em amplitude consiste em modificar a amplitude de um sinal de frequência constante, chamado de portadora, a partir de um sinal modulante (informação). O termo DSB significa *double side band*, pois o espectro do sinal modulado possui tanto a banda positiva quanto a banda negativa do sinal modulante.

O sinal modulado em AM/DSB pode ser representado matematicamente pela equação

$$s(t) = A_c[1 + \gamma f(t)]\cos(w_c t). \quad (1)$$

Onde  $f(t)$  é o sinal de informação,  $A_c$  é a amplitude,  $\gamma$  é o índice de modulação e  $w_c$  é a frequência angular da portadora.

Sendo

$$f(t) = \cos(w_m t),$$

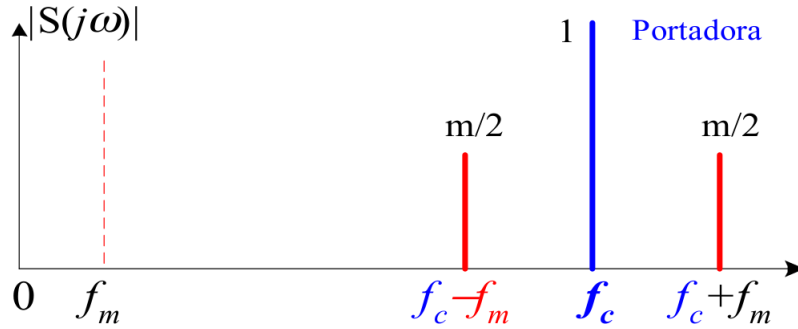
temos que

$$s(t) = A_c \left\{ \cos(w_c t) + \frac{\gamma}{2} \cos(w_c + w_m)t + \frac{\gamma}{2} \cos(w_c - w_m)t \right\}. \quad (2)$$

A transformada de Fourier do sinal da equação 2 (mostrada na figura 1 ) é

$$F(s) = \mathfrak{F}\{f(t)\} = A_c \delta(s - w_c) + A_c \frac{\gamma}{2} \delta(w_c + w_m) + A_c \frac{\gamma}{2} \delta(w_c - w_m)$$

Figura 1: Modulo do espectro complexo de Fourier da modulação AM DSB com sinal modulante cossenoidal.



### 2.2 Medida do índice de modulação $\gamma$

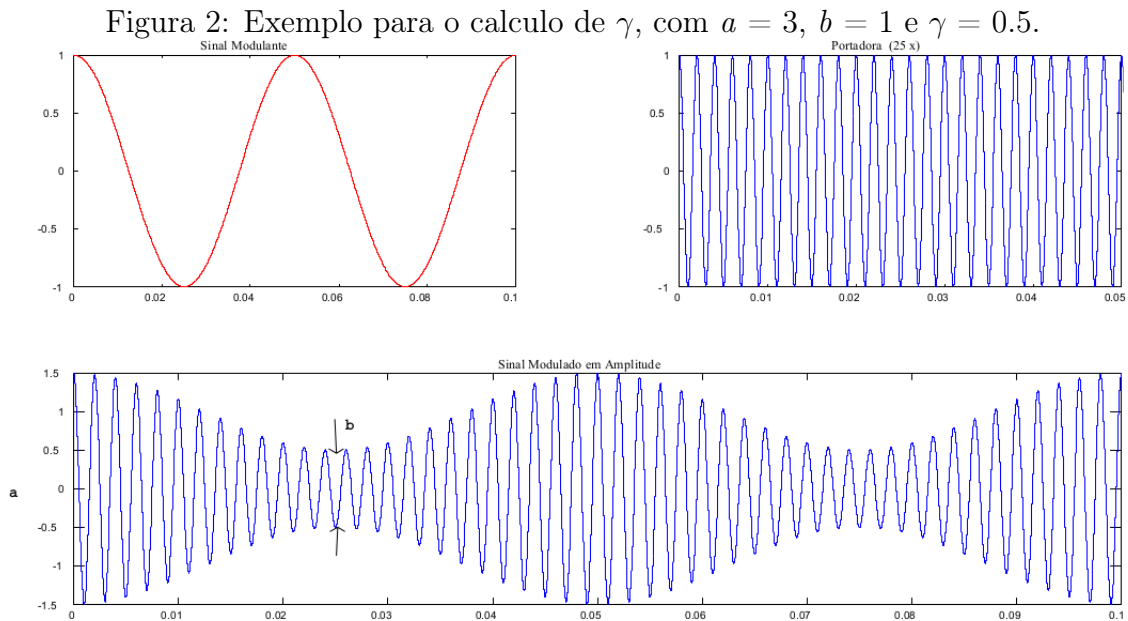
O índice de modulação ( $\gamma$ ) pode ser obtido através da equação 3, onde os valores de  $a$  e  $b$  podem ser definidos de duas maneiras.

$$\gamma = \frac{a - b}{a + b} \quad (3)$$

#### 2.2.1 Método 1

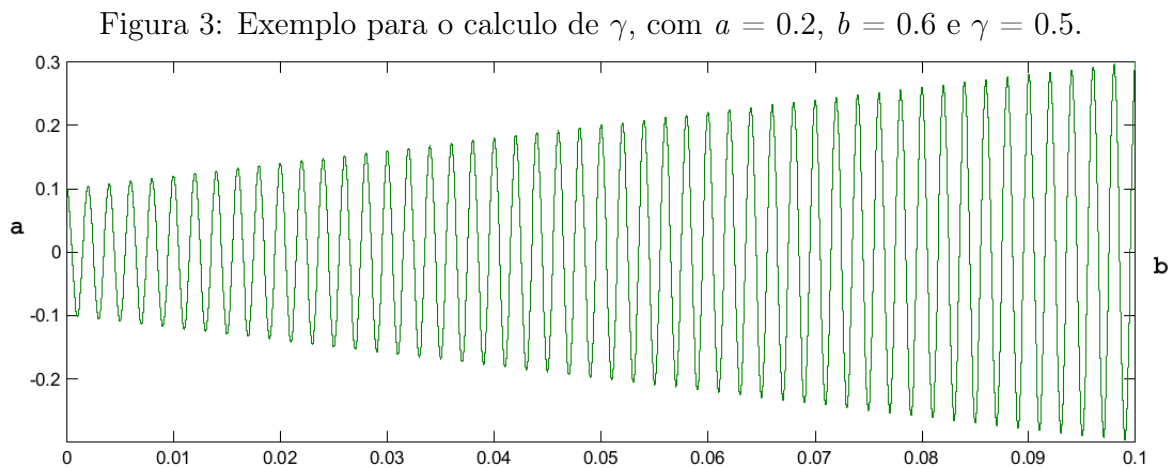
No método 1, o sinal modulado é colocado no eixo Y e o tempo é colocado no eixo X. O valor de  $a$  é dado pela amplitude de pico a pico do sinal modulado quando  $f(t)$  é máximo e

o valor de  $b$  é dado pelo valor de pico a pico para quando o sinal  $f(t)$  é mínimo. A figura 2 mostra um exemplo do cálculo.



### 2.2.2 Método 2

No método 2, o sinal modulado é colocado no eixo Y e o sinal modulante é colocado no eixo X. O valor de  $a$  é dado pela amplitude de pico a pico da parte mais baixa da figura e o valor de  $b$  é dado pelo valor de pico a pico mais alto. A figura 3 mostra um exemplo do cálculo.



O método 2 é preferível, pois evidencia a linearidade do modulador, independente da forma de onda do sinal modulante. Porém, quando são introduzidas distorções no sinal modulado, o método 1 deve ser utilizado.

## 2.3 Circuitos moduladores

Abaixo são apresentadas duas topologias de circuito modulador AM DSB, uma utilizando transistores e a outra empregando um único diodo.

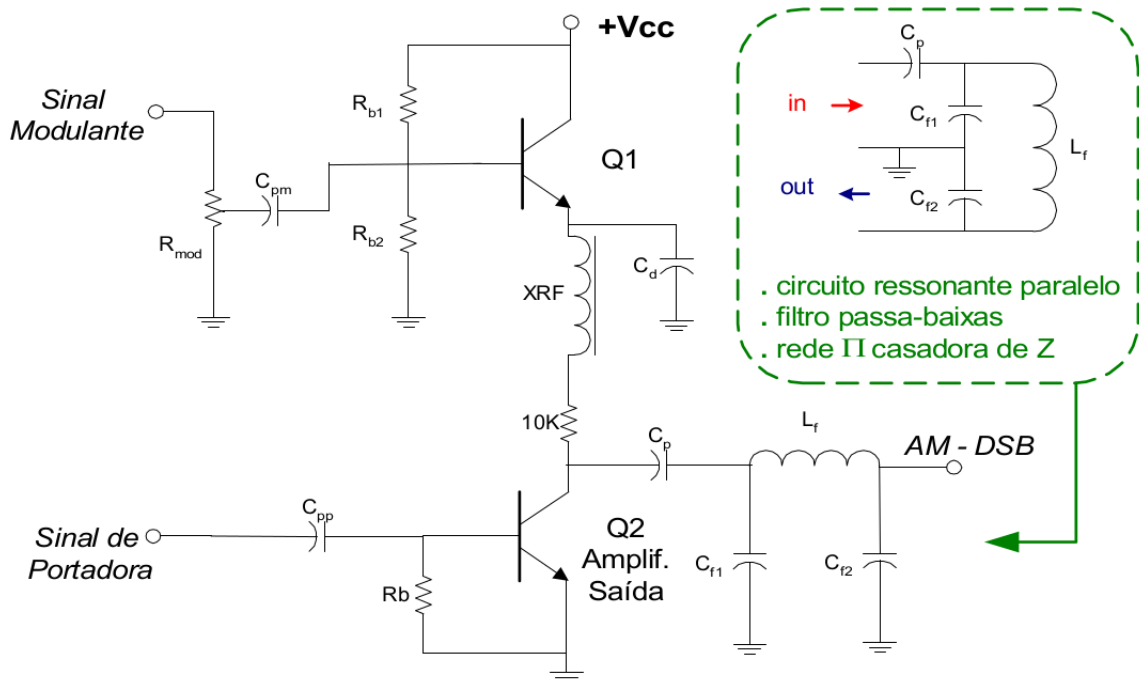
### 2.3.1 Modulador série

A figura 4 apresenta a configuração do circuito utilizado em um modulador AM/DSB série. Os moduladores série modificam diretamente a amplitude do sinal de RF, assim, evitando distorções na frequência do sinal modulado.

O transistor Q1 acopla sinal de informação ao coletor do amplificador de RF de saída, Q2, evitando a necessidade de um transformador, o que reduz o custo e o tamanho do circuito.

O filtro passa-baixas composto por  $C_{f1}$ ,  $C_{f2}$ ,  $C_p$  e  $L_f$  atua, também, como um circuito LC paralelo sintonizado na frequência da portadora ( $f_c$ ) e como uma rede  $\pi$  casadora de impedância.

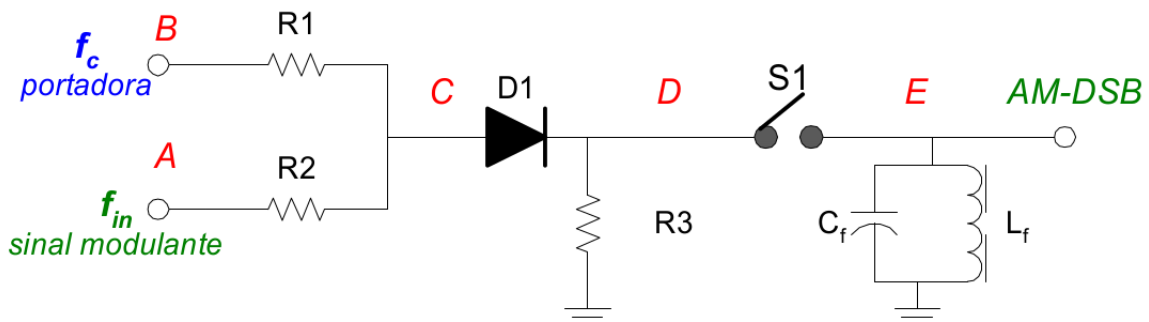
Figura 4: Circuito do modulador série.



### 2.3.2 Modulador a diodo

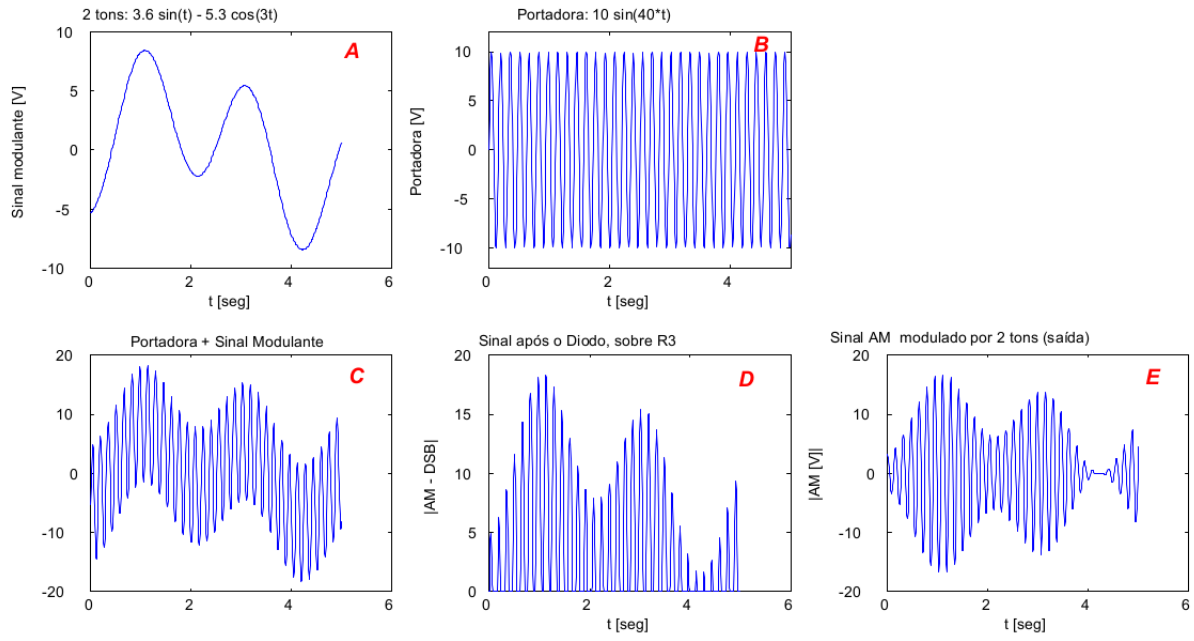
A figura 5 apresenta a configuração do circuito utilizado em um modulador AM/DSB simples. Os moduladores série modificam diretamente a amplitude do sinal de RF, assim, evitando distorções na frequência do sinal modulado.

Figura 5: Circuito do modulador a diodo.



A chave S1, quando o circuito está em operação, fica normalmente fechada. O filtro passa-faixa composto por  $C_f$  e  $L_f$  é sintonizado em  $f_c$ . Assim, para cada semi-ciclo positivo de  $f_c$  o circuito ressonante paralelo produz um semi-ciclo negativo, resultando à saída a forma de onda E da figura 6.

Figura 6: Formas de onda em um modulador a diodo.





## 3 Metodologia Experimental

### 3.1 Materiais

O material utilizado foi:

- Computador.
- Software Orcad.

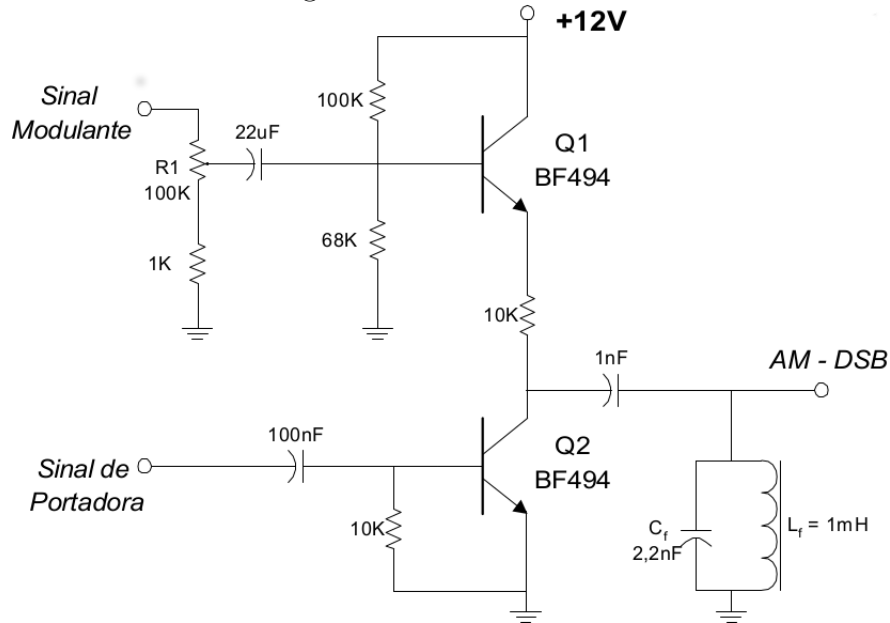
O experimento foi dividido em duas partes, sendo a parte 1 para o modulador série e a parte 2 com o modulador a diodo.

#### 3.1.1 Modulador série

Para execução da parte 1 do experimento, faz-se necessário executar os seguintes passos (com base no circuito da figura 7:

- montar o circuito mostrado na figura 7 no software Orcad;
- utilizar um sinal senoidal de 200Hz ( $2 V_{pp}$ ) como modulante e um sinal de 100kHz como portadora;
- Obter o índice de modulação  $\gamma$  do circuito através do método 1 e do método 2;
- verificar quais são os limites para  $\gamma$ ;
- caso seja possível obter índice  $m > 1$ , observe o que ocorre com sinal quando se utiliza o método 2. É possível aplicar este método na avaliação de índices de modulação maiores que 100
- determinar o fator de mérito do modulador, utilizando como carga um resistor de  $10 M\Omega$  e um capacitor de 20pF, simulando a ponta de prova do osciloscópio.
- analisar o sinal de saída no domínio da frequência;
- como é possível reduzir eventuais componentes de frequência espúrias à saída?

Figura 7: Modulador série.

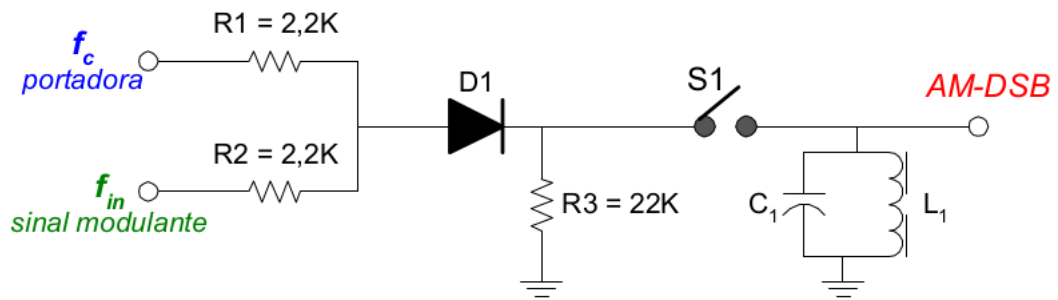


### 3.1.2 Modulador a diodo

Para execução da parte 2 do experimento, faz-se necessário executar os seguintes passos (com base no circuito da figura 8):

- montar o circuito mostrado na figura 8 no software Orcad;
- utilizar um sinal senoidal de 2kHz ( $2 V_{pp}$ ) como modulante e um sinal de 100kHz ( $5 V_{pp}$ ) como portadora;
- calcular o valor de  $L_1$  e  $C_1$  de modo que a frequência de ressonância fique próxima de  $f_c$ .
- verificar se o sinal modulante é banda estreita;
- Obter o índice de modulação  $\gamma$  do circuito através do método 1 e do método 2;
- caso seja possível obter índice  $m > 1$ , observe o que ocorre com sinal quando se utiliza o método 2. É possível aplicar este método na avaliação de índices de modulação maiores que 100
- determinar o fator de mérito do modulador, utilizando como carga um resistor de  $10 M\Omega$  e um capacitor de 20pF, simulando a ponta de prova do osciloscópio.
- analisar o sinal de saída no domínio da frequência;

Figura 8: Modulador a diodo.



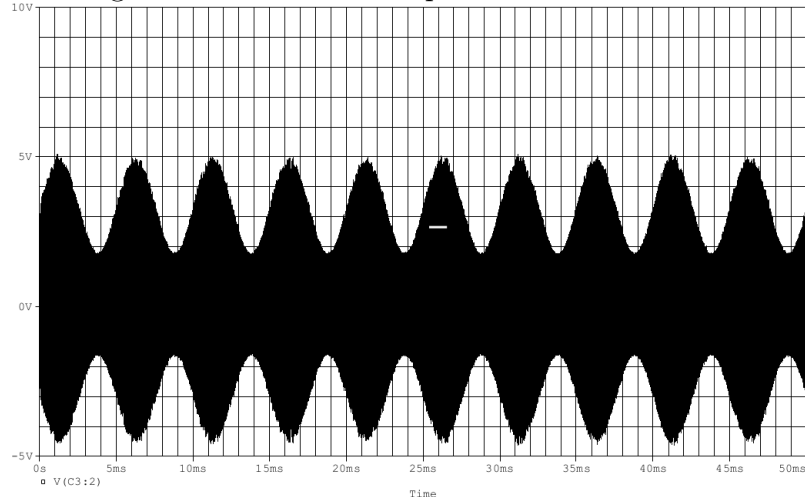
## 4 Resultados

### 4.1 Modulador série

#### 4.1.1 Sinal de saída

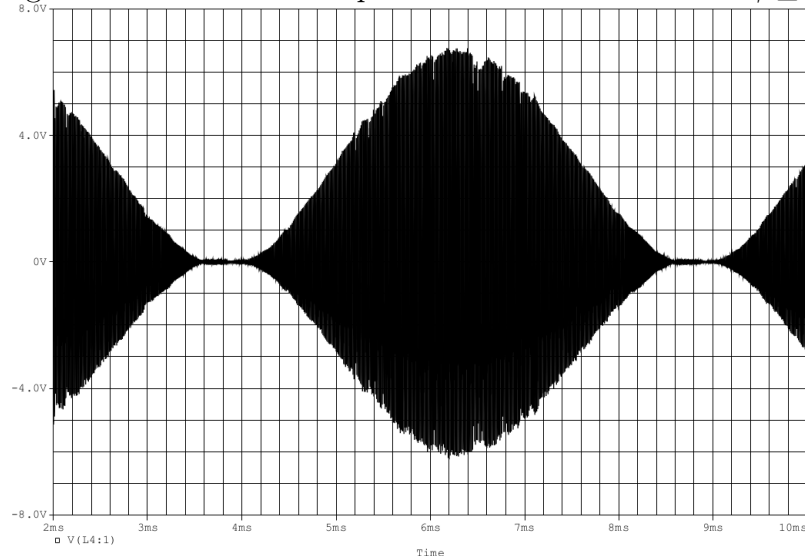
Após a simulação, obtemos a forma de onda mostrada na figura 9, com o potenciômetro na posição 0, ou seja, com o máximo índice de modulação.

Figura 9: Onda de saída para o modulador série.



Para um índice de modulação maior que 1, foi necessário aumentar a tensão do sinal modulante para  $4.5V_p$ . Dessa forma, obtivemos o sinal de saída da figura 10.

Figura 10: Onda de saída para o modulador série com  $\gamma \geq 1$ .



#### 4.1.2 Índice de modulação

Através do método 1, o valor de  $\gamma$  calculado foi de

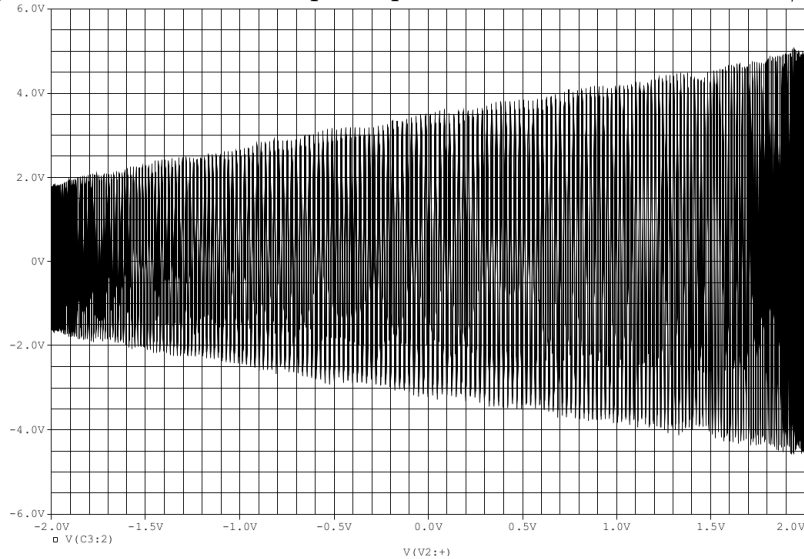
$$\gamma_1 = \frac{4.4988 - 1.7184}{4.4988 + 1.7184} = 0.4472.$$

Mudando o eixo X do gráfico para o sinal modulante, obtivemos a imagem da figura 11, de onde foi possível calcular

$$\gamma_2 = \frac{8.2133 - 3.4907}{8.2133 + 3.4907} = 0.4435$$

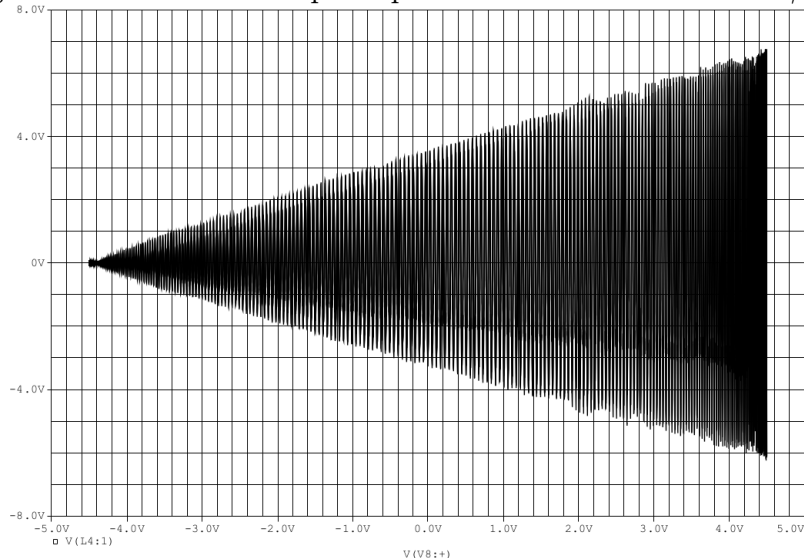
Como podemos observar, os dois métodos deram resultados bastante próximos. O desvio observado se deve ao fato da dificuldade em se obter uma medida precisa no gráfico do trapézio.

Figura 11: Método do trapézio para o modulador série com  $\gamma \leq 1$ .



Para  $\gamma > 1$ , o método do trapézio resultou na imagem da figura 12. É possível observar a não linearidade das amplitudes na curva. Sendo assim, o método do trapézio não é válido para moduladores com índice de modulação maior que 1.

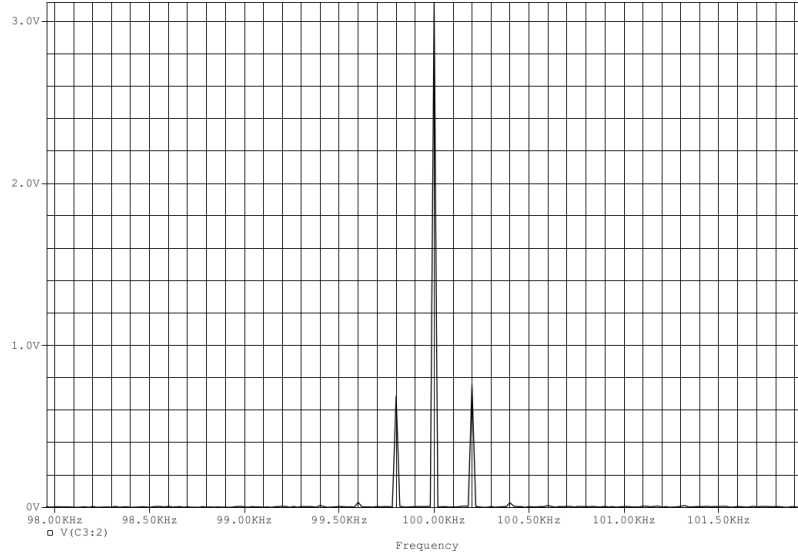
Figura 12: Método do trapézio para o modulador série com  $\gamma > 1$ .



### 4.1.3 Espectro

O espectro do sinal modulado da figura 9 é apresentado na figura 13. Podemos observar a portadora (com maior energia) na frequência  $f_c = 100kHz$  e as raia laterais em  $f_c \pm 2$ , características do modulador AM/DSB.

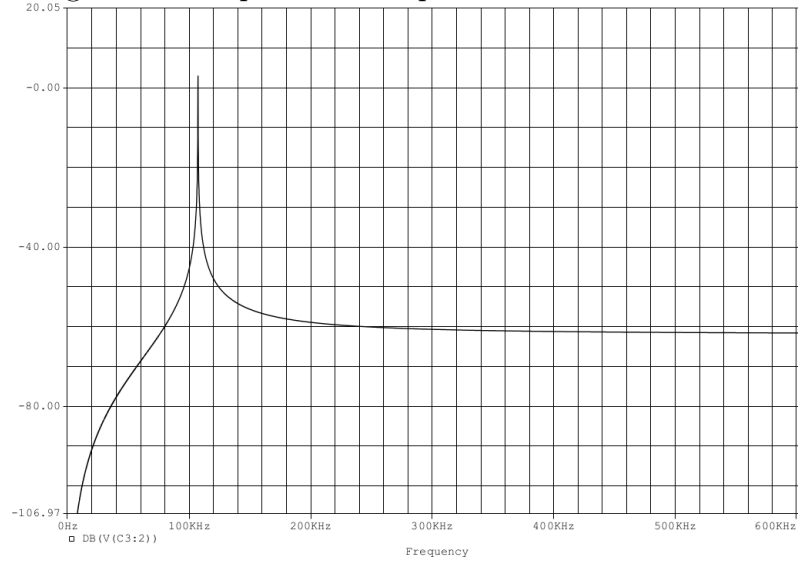
Figura 13: Espectro do sinal da figura 9.



#### 4.1.4 Fator de mérito

Para o cálculo do fator de mérito do circuito, o sinal modulante foi substituído por uma fonte do tipo  $V_{ac}$  e foi realizada uma simulação do tipo varredura em frequência (*Frequency Sweep*), resultando no gráfico da figura 14.

Figura 14: Resposta em frequência do modulador série.



Com base no gráfico da figura 14, a largura de banda encontrada foi  $BW_{3db} = 54.70 Hz$  e a frequência central  $f_c = 106.98 kHz$ . Assim, o fator de mérito do circuito é de

$$Q_{load} = \frac{106.98 * 10^3}{54.70} = 1955,6$$

Nota-se que o circuito, apesar de simples, possui um fator de mérito bastante elevado.

## 4.2 Modulador a diodo

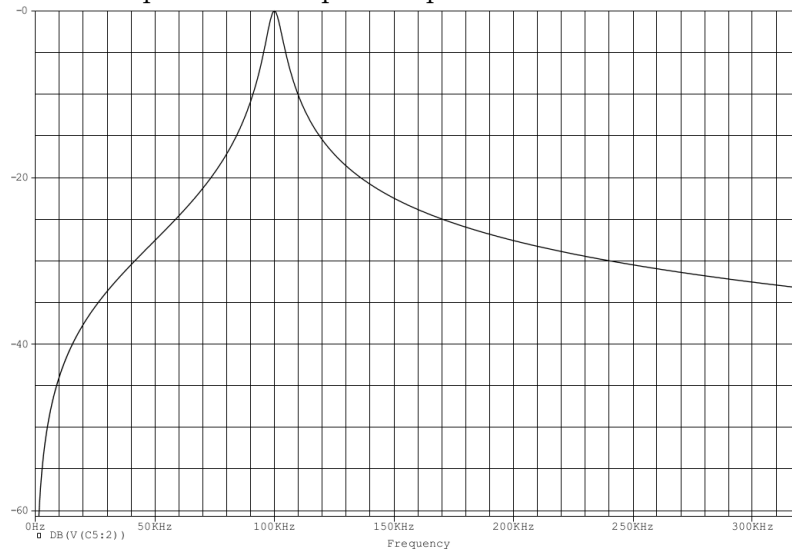
### 4.2.1 Filtro

Para o calculo do filtro, foi mantida a indutância de 1 mH, sendo assim, foi calculado o valor de  $C_1$  de modo que a frequência central do filtro fosse de 100 kHz. Então

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 L} = \frac{1}{(2\pi 100 * 10^3)^2 1 * 10^{-3}} = 2.53 pF$$

Foi, então, simulada a resposta em frequência do filtro, conforme mostra a figura 15, onde pode-se observar que a frequência central está, de fato, em 100kHz.

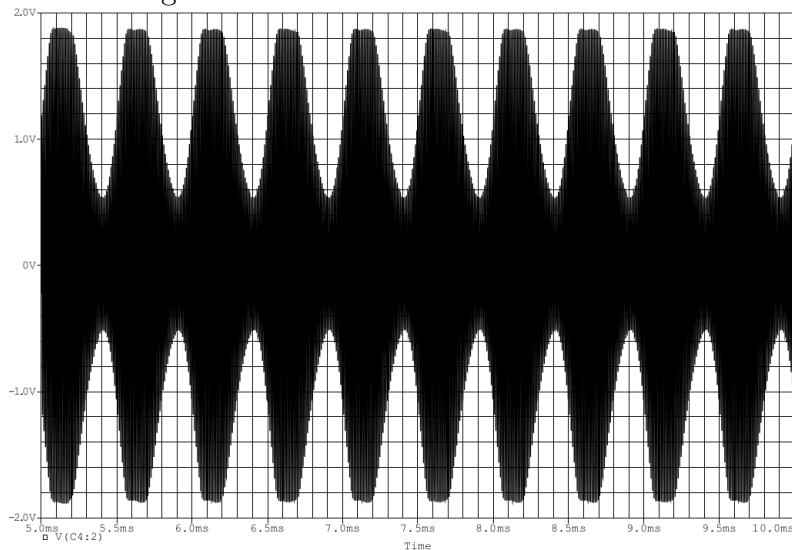
Figura 15: Resposta em frequência para filtro do modulador a diodo.



### 4.2.2 Sinal de saída

Após a simulação, obtemos o sinal de saída mostrado na figura 16. Pode-se observar um pequeno ceifamento do sinal de saída do modulador. Isso ocorre devido as características do diodo utilizado.

Figura 16: Saída do modulador a diodo.



Ao abrir a chave s1, foram observadas as formas de onda, na saída do modulador, das figuras 17 e 18, antes e depois do diodo  $D_1$ , respectivamente.

Figura 17: Saída do modulador a diodo com a chave s1 aberta (antes do diodo  $D_1$ ).

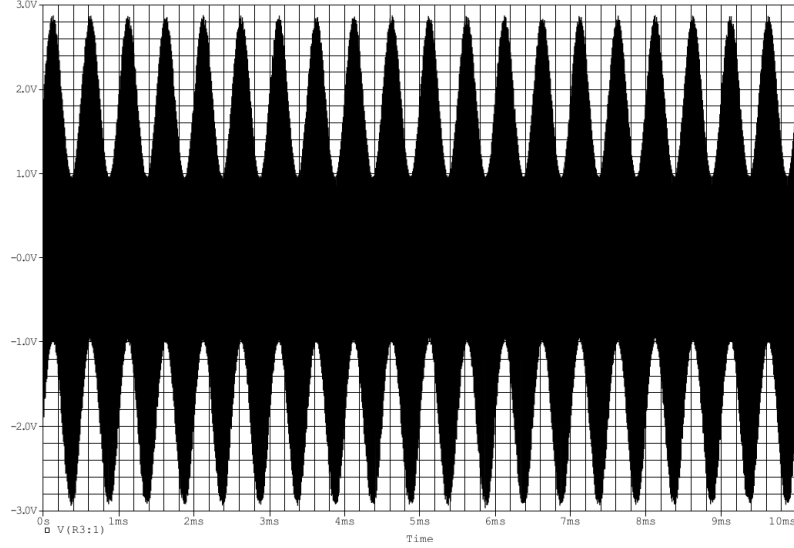
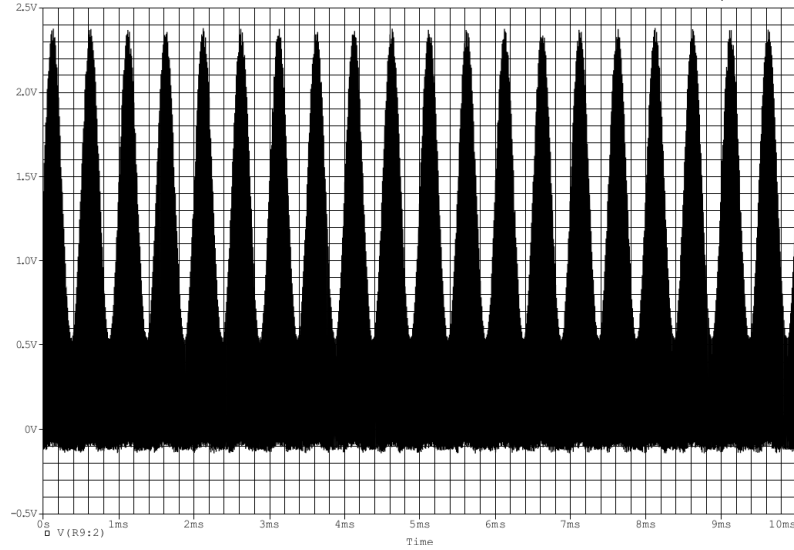


Figura 18: Saída do modulador a diodo com a chave s1 aberta (após o diodo  $D_1$ ).



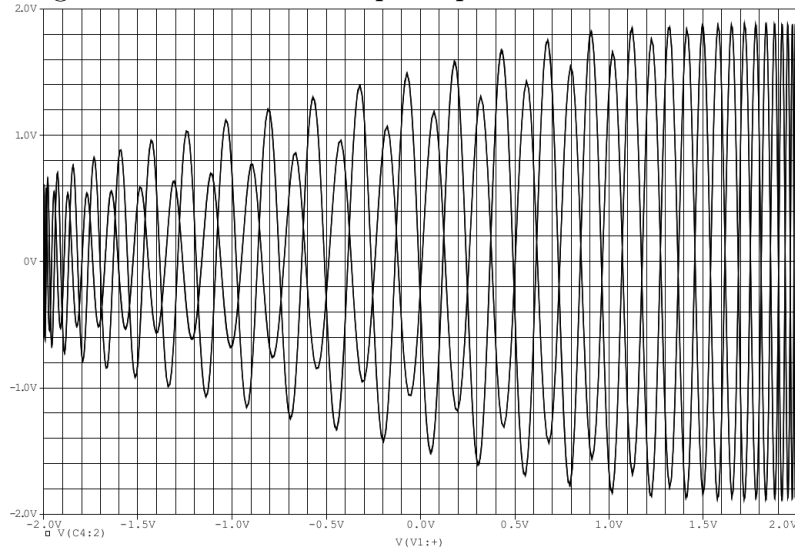
#### 4.2.3 Índice de modulação

O índice de modulação calculado a partir do sinal da figura 16, utilizando o método 1, foi de  $\gamma = 0.6462$ .

A figura 19 mostra o resultado do método do trapézio (método 2). Como pode ser observado, a curva não é linear em amplitude, devido as distorções causadas pelo diodo. Sendo assim, não foi possível a obtenção do índice de modulação, de forma precisa, a partir deste método.



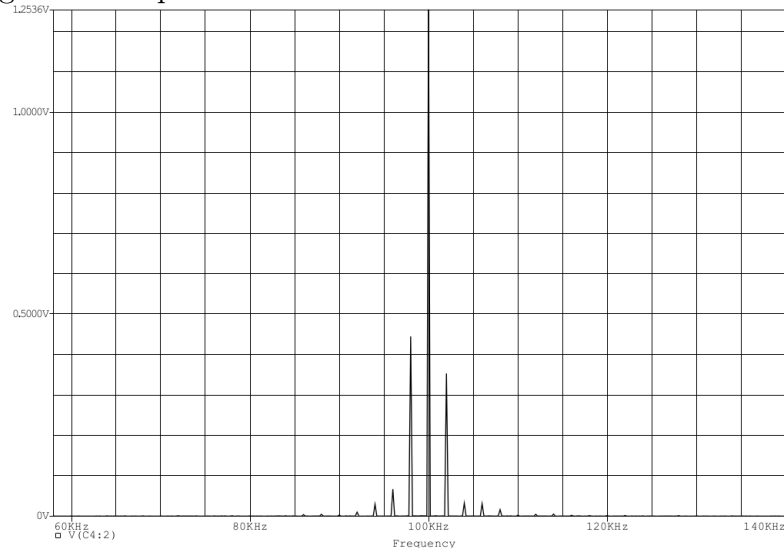
Figura 19: Método do trapézio para modulador a diodo.



#### 4.2.4 Espectro do sinal modulado

A figura 20 mostra o espectro do sinal de saída do modulador a diodo. Observa-se, novamente, a presença da portadora e das duas raias laterais do sinal AM modulado, que são as características da modulação AM/DSB. Porém, é notável a presença de outras componentes harmônicas no sinal.

Figura 20: Espectro do sinal modulado com modulador a diodo.

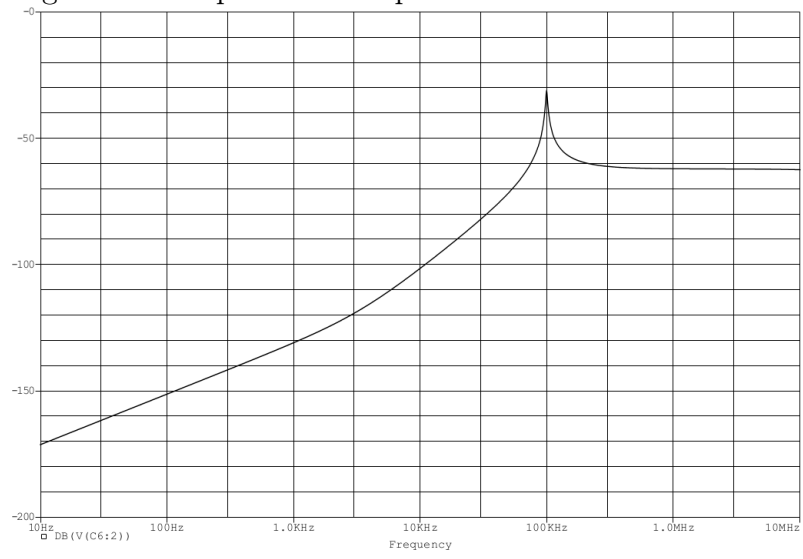


#### 4.2.5 Fator de mérito

O gráfico da resposta em frequência do modulador a diodo é apresentado na figura 21, de onde podemos extrair o valor de  $BW_{3dc} = 2.83kHz$  e  $f_c = 99.54kHz$ . Assim, o fator de mérito do circuito é

$$Q_{diodo} = \frac{99.54 * 10^3}{2.8 * 10^3} = 35.14.$$

Figura 21: Resposta em frequência do modulador a diodo.



## 5 Discussão e Conclusão

Neste experimento foi possível analisar o projeto de dois circuitos moduladores de AM/DSB, onde foi possível constatar que a teoria envolvida na análise da modulação AM é coerente e se aplica na prática. Um dos fatores importantes observado foi em relação ao cálculo do índice de modulação ( $\gamma$ ) através do método do trapézio para quando  $\gamma > 1$ . Observou-se que, devido a curva de amplitudes não ser linear, o valor obtido não foi o real. Notório também é a diferença de qualidade, do sinal modulado, entre as duas topologias. O modulador a diodo, apesar de possuir fácil implementação e baixo custo, possui um fator Q (índice de mérito) baixo, o que faz com que mais energia seja perdida em frequências próximas à frequência da portadora e das bandas do sinal modulante.

## Referências

- [1] T. Abrao, *Notas de aula - Circuitos de Comunicação*. publisher, 2002.