

## 1. Especificações do Projeto

### 1.1.Topologia

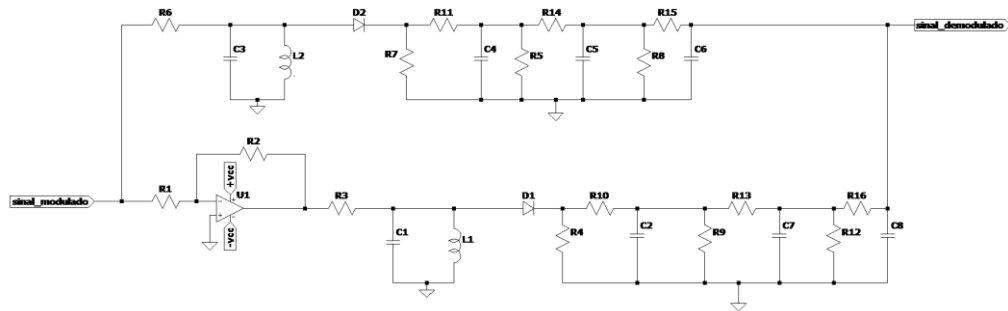


Figura 1: Diagrama esquemático do circuito demodulador FM balanceado.

A figura 1 mostra o diagrama esquemático do circuito demodulador FM balanceado. Inicialmente o objetivo é trabalhar com o circuito PLL, mas, como o circuito PLL não é disponível no simulador, então optamos por esta topologia.

O demodulador FM balanceado mostrado na figura 1, recebe como a entrada o sinal modulado e a saída o sinal demodulado. O sinal modulado é injetado num amplificador inversor, que tem como objetivo de gerar um sinal de fase  $0^0$  e um sinal de fase  $180^0$ .

Os filtros RLC servem para sintonizar as frequências superior e inferior do FI. Os filtros RC são os detectores de envoltória, que recupera o sinal modulante.

Os diodos funcionam como elemento quadrático, retificando o sinal FM convertido em AM e fazendo surgir a componente em frequência FM a partir do sinal convertido.

Os resistores R3 e R6 são limitadores de correntes.

## 1.2.Cálculo dos componentes do circuito demodulador FM balanceado.

Como o objetivo do amplificador é para fazer inversão de fase do sinal da entrada então o ganho deve ser unitário.

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

Portanto pela equação (1) escolhemos um resistor de  $1k\Omega$  para  $R_2$  e  $R_1$  temos um amplificador de ganho unitário.

Para os filtros RLC determinamos os valores dos seus componentes pela sua função de transferência descrita na equação (2).

$$|H(\omega)| = \frac{X_L X_C}{\sqrt{X_L^2 X_C^2 + (X_L R - X_C R)^2}} \quad (2)$$

Colocando a equação (2) no *matlab* e ajustar a frequência na região linear da função transferência do filtro de acordo com a frequência FI, temos:

R	C	L
$450\Omega$	$0.016\mu F$	$0.045mH$

Tabela 1: Resultado do cálculo dos valores dos componentes dos filtros LC.

Para os filtros RC determinamos os valores dos seus componentes pela sua função de transferência descrita na equação (3).

$$|H(\omega)| = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (3)$$

Colocando a equação (3) no *matlab* e ajustar a sua frequência de corte de acordo com a frequência do sinal modulante, temos:

R	C
$30k\Omega$	$1nF$

Tabela 2: Resultado do cálculo dos valores dos componentes dos filtros RC.

## 2. Resultados das Simulações do demodulador FM

Com os valores dos componentes do circuito calculados, o próximo passo neste projeto é simular o circuito com o software LTspice. Primeiro montamos o circuito de acordo com a figura 1, como mostrado na figura 2.

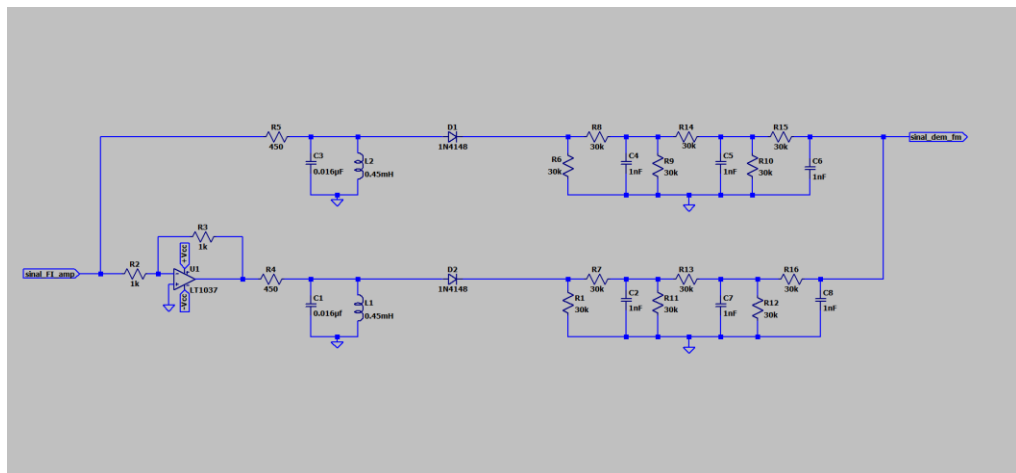


Figura 2: Circuito Simulado no LTspice.

Com a montagem de circuito acima, fizemos a simulação e obtivemos os seguintes resultados:

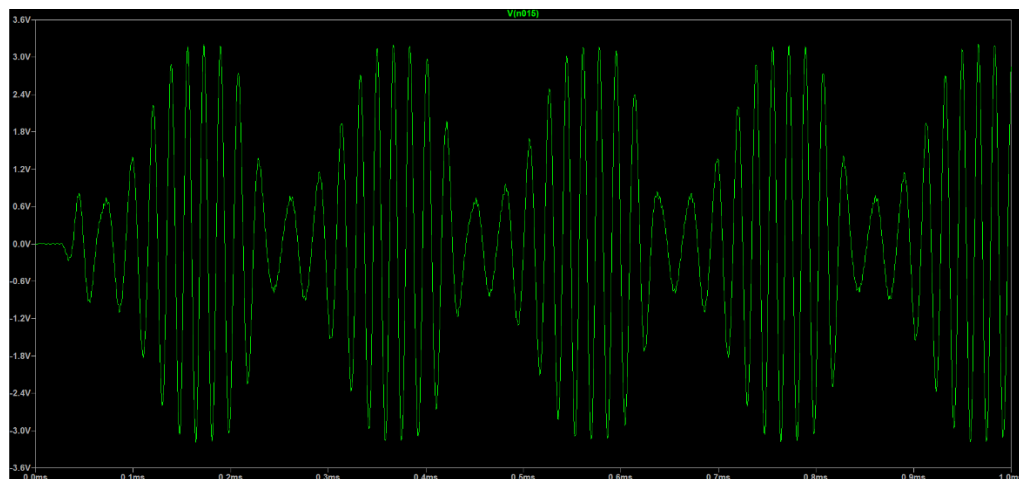


Figura 3: Sinal AM na saída depois do filtro LC do demodulador FM no domínio de tempo.

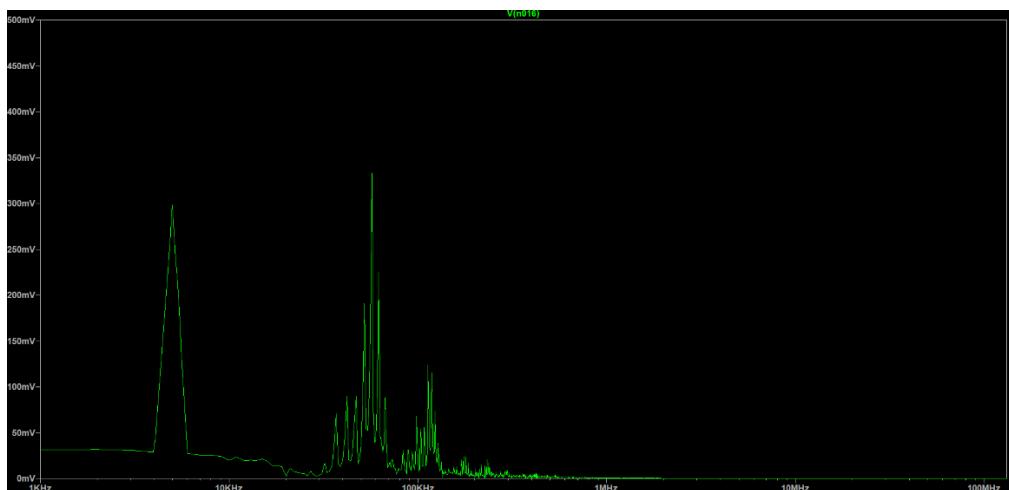


Figura 4: Sinal na saída depois do retificador (diodo) do demodulador FM no domínio da frequência.

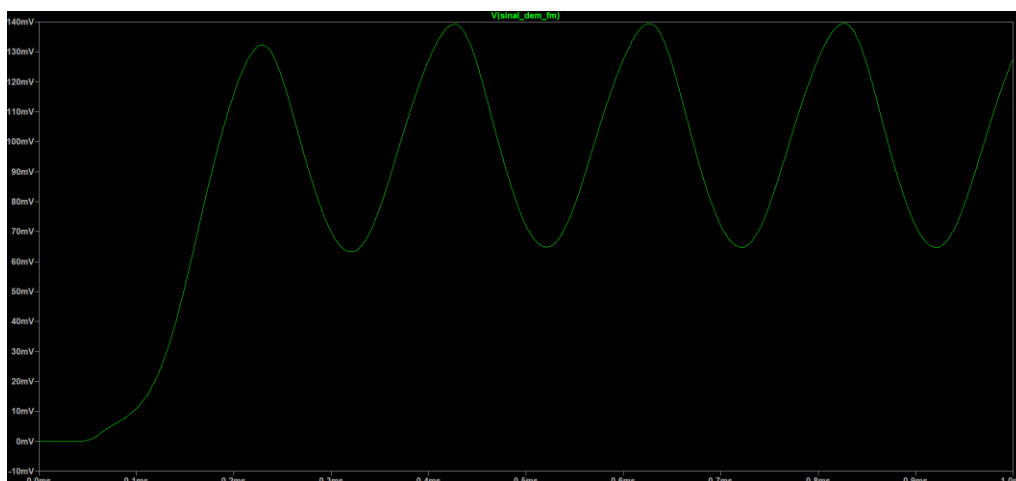


Figura 5: Sinal FM demodulado no domínio de tempo.

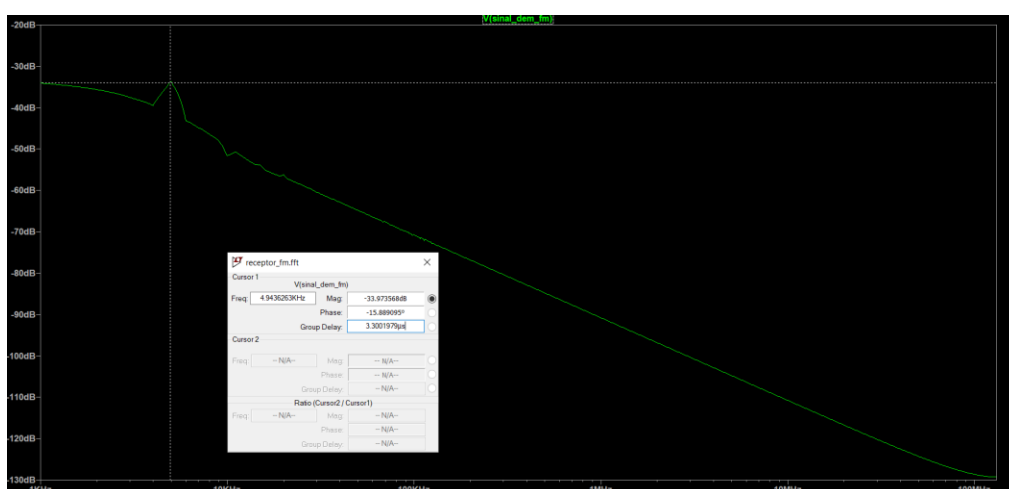


Figura 6: Sinal FM demodulado no domínio da frequência.

### 3. Resultados das Simulações do Receptor FM

Com o demodulador feito, o último passo no projeto é construir o receptor FM completo de acordo com o diagrama de bloco mostrado na figura 7.

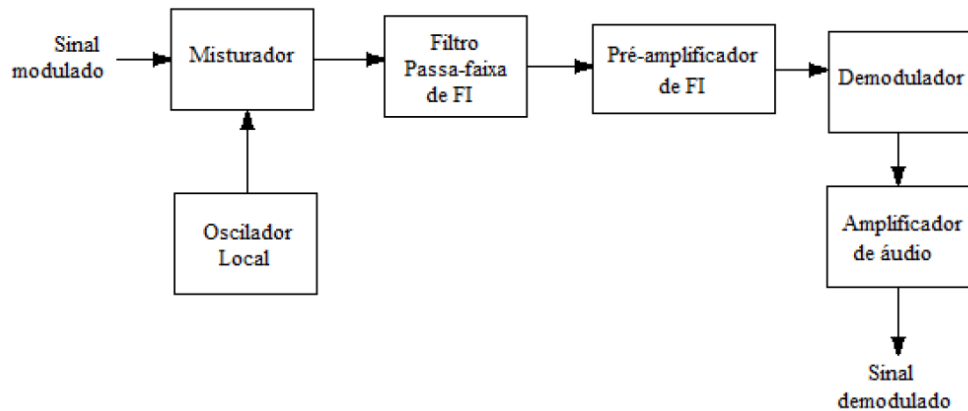


Figura 7: Diagrama de blocos do circuito receptor FM.

Nesse sentido, construímos o circuito do receptor FM equivalente da figura 7 no LTspice conforme mostra a figura 8.

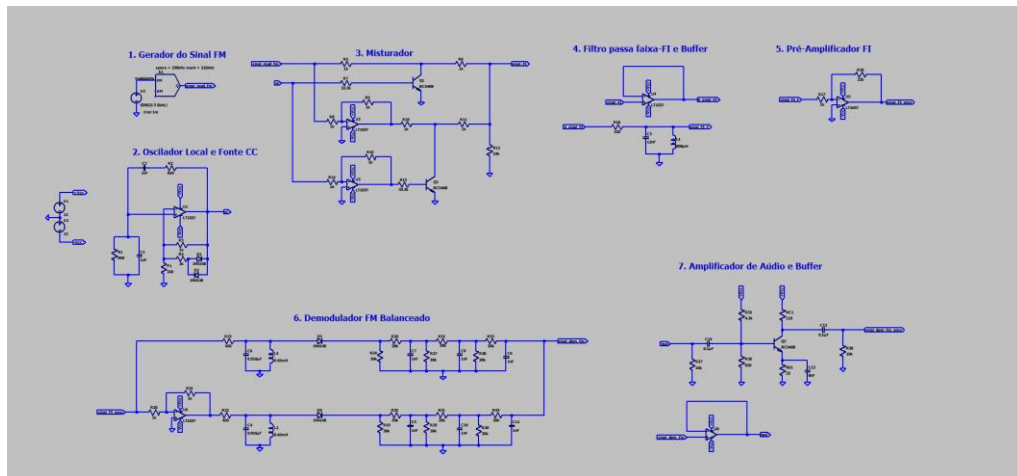


Figura 8: Circuito receptor FM em LTspice.

Com o circuito montado no LTspice, fizemos a simulação e medimos a saída de cada etapa mostrado na figura 8 e os resultados são mostrados nas figuras abaixo.

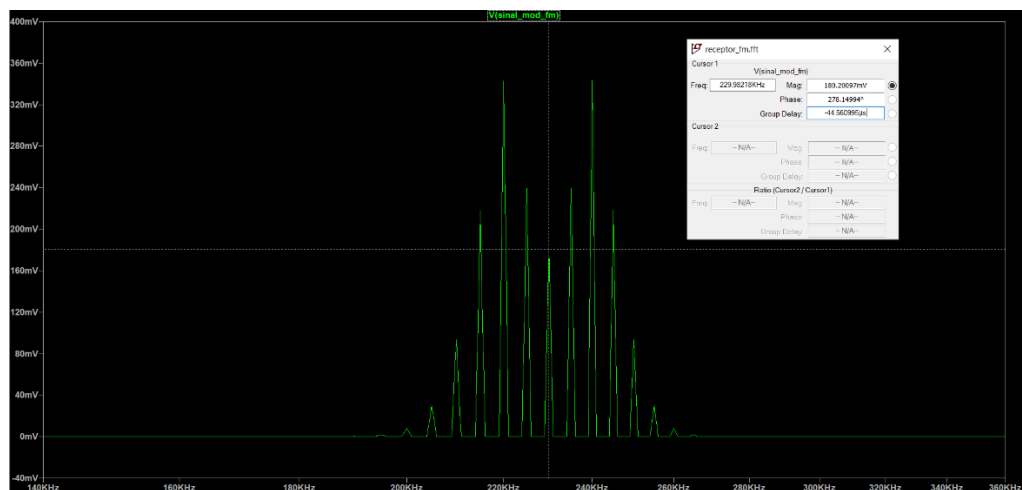


Figura 9: Espectro do sinal modulado em FM (saída da etapa 1 da figura 8).

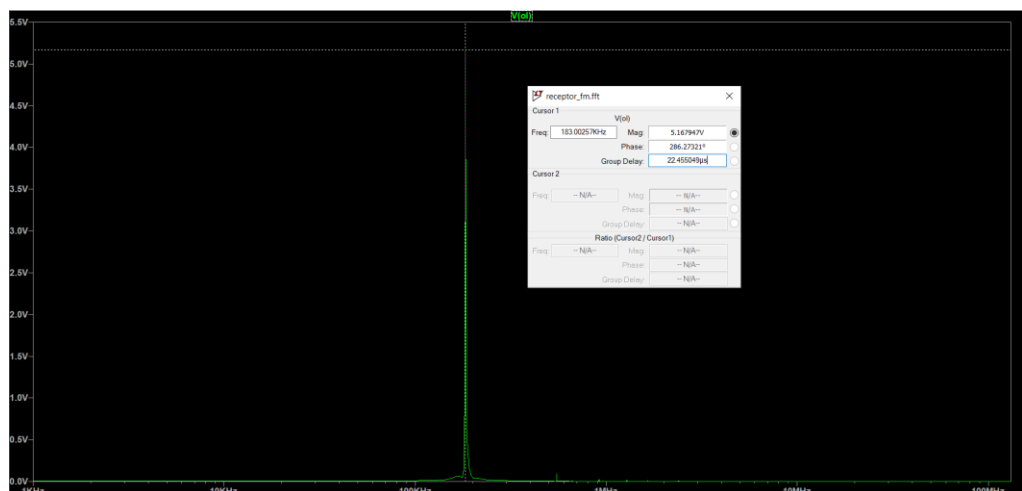


Figura 10: Espectro do oscilador local (saída da etapa 2 da figura 8).

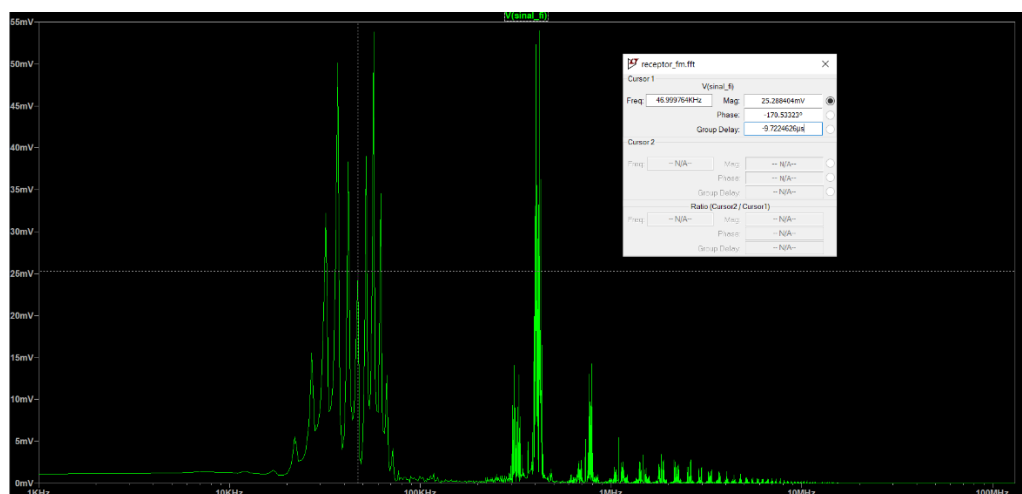


Figura 11: Espectro do sinal FI (saída da etapa 3 da figura 8).

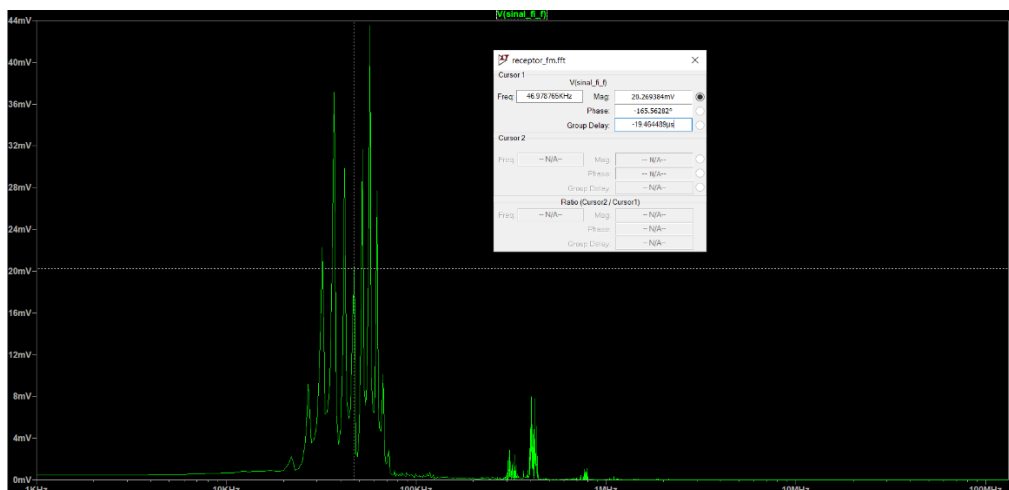


Figura 12: Espectro do sinal FI filtrado (saída da etapa 4 da figura 8).

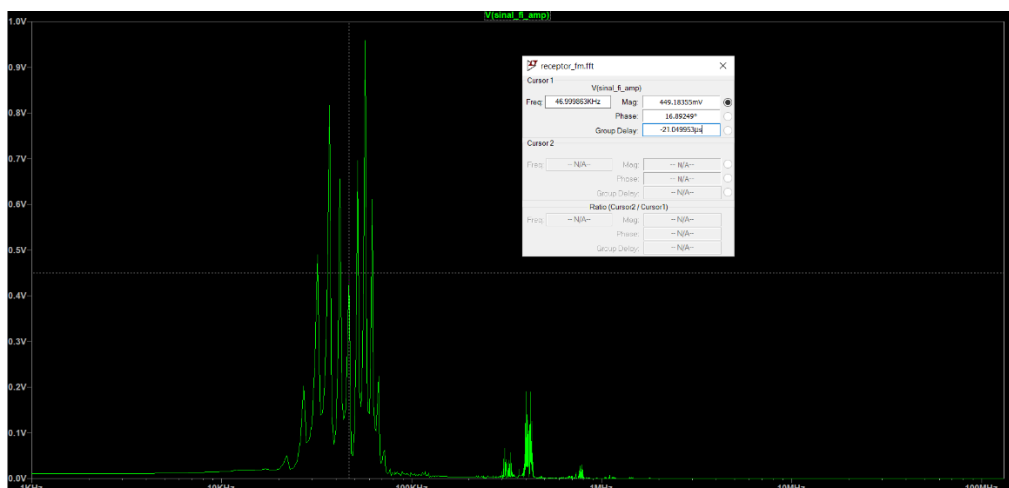


Figura 13: Espectro do sinal FI filtrado e amplificado (saída da etapa 5 da figura 8).

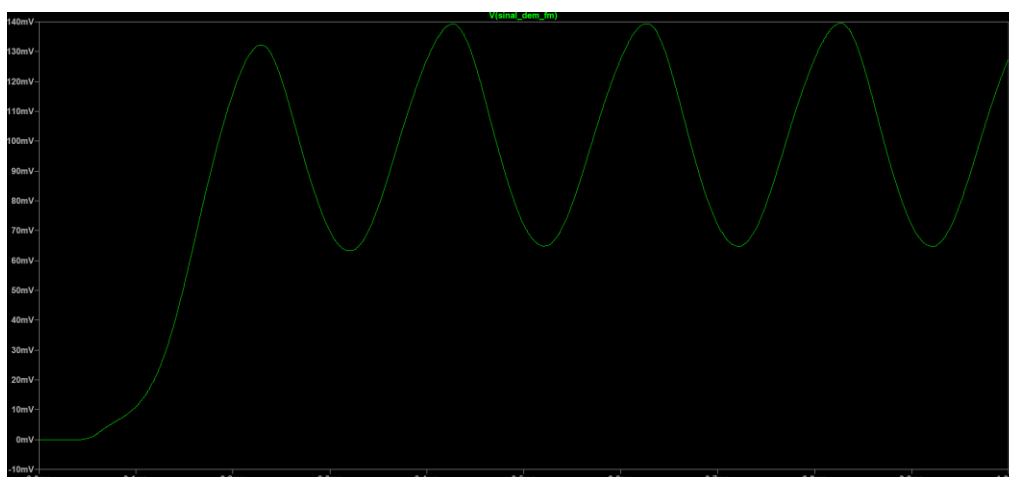


Figura 14: Sinal FM demodulado no domínio de tempo (saída da etapa 6 da figura 8).

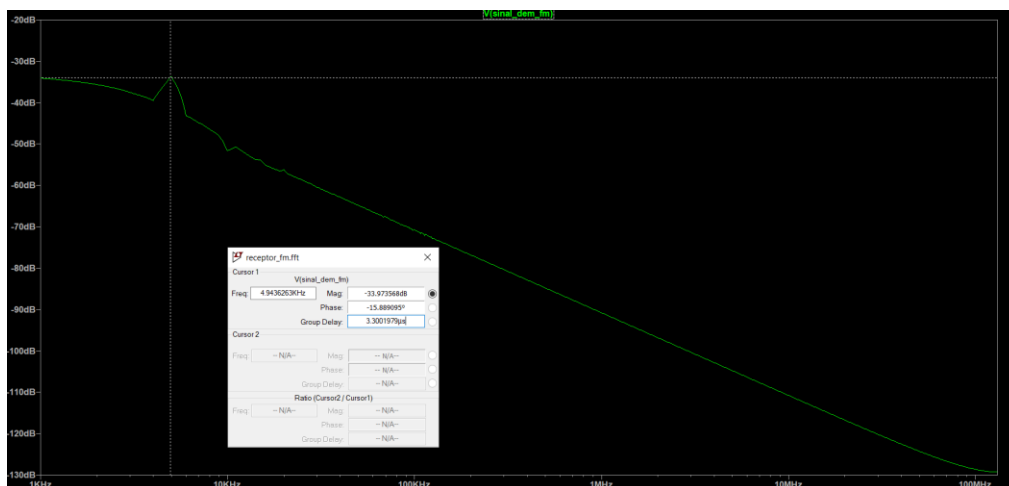


Figura 15: Sinal FM demodulado no domínio de frequência (saída da etapa 6 da figura 8).

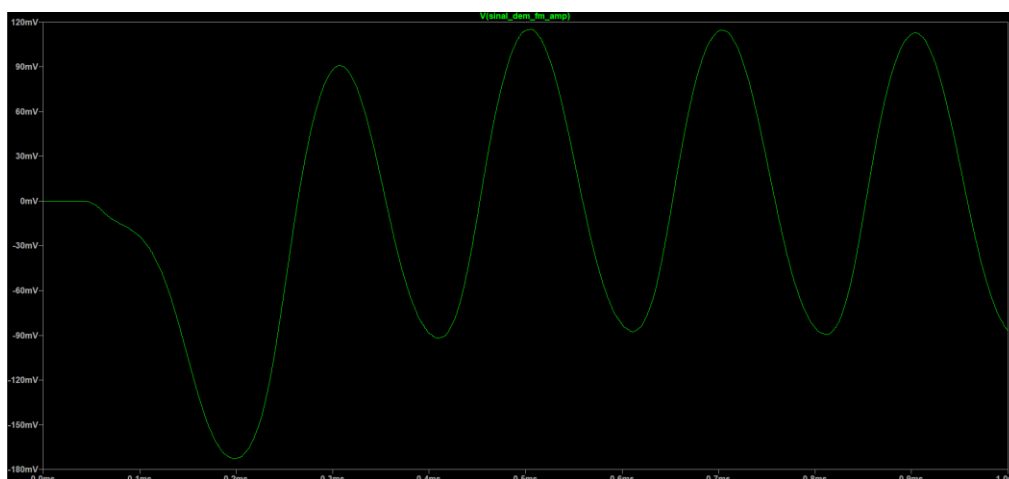


Figura 16: Sinal FM demodulado e amplificado no domínio de tempo (saída da etapa 7 da figura 8).

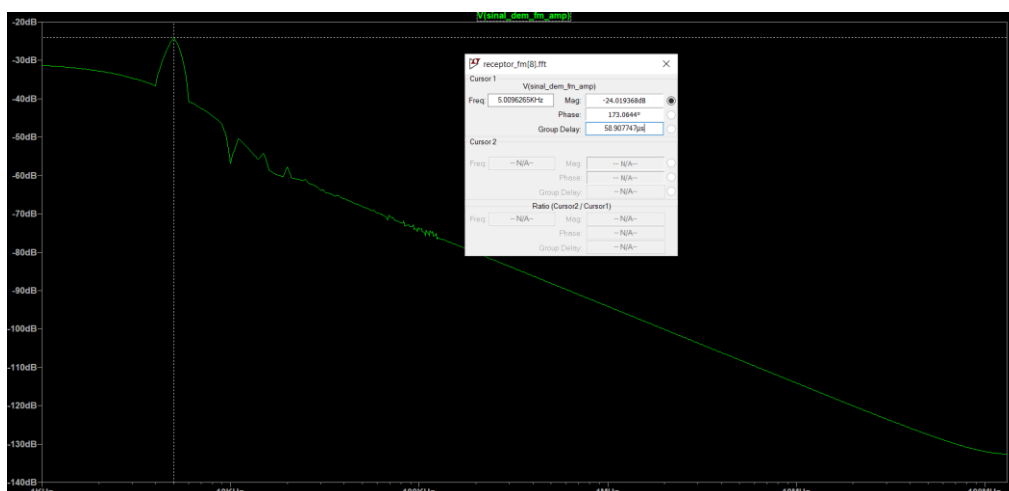


Figura 17: Sinal FM demodulado e amplificado no domínio de frequência (saída da etapa 7 da figura 8).



#### 4. Discussões

Partimos a nossa análise no demodulador FM balanceado mostrado na figura 2. O demodulador recebe como entrada o sinal FI gerado pelo misturador projetado no projeto anterior é mostrado na figura 8 na etapa 3. O sinal FI logo é filtrado e amplificado e o seu espectro é mostrado na figura 13, com a frequência aproximadamente 47 kHz e a amplitude aproximadamente de 450 mV. Este sinal logo é convertido para um sinal AM com o filtro LC conforme mostra a figura 3. Para converter de novo esse sinal para um sinal FM utilizamos um elemento quadrático (não linear), neste caso o diodo, o seu resultado podemos ver na figura 4. Note que, o sinal não é convertido totalmente para o sinal modulante porque ainda existe as raia laterais do sinal FI. Este fator ocorre devido a região linear da função de transferência do filtro LC não é totalmente linear. Dai que vem a importância do balanceamento. Com o balanceamento podemos eliminar estas raia restantes e deixar passar apenas o sinal modulante. Feito isto, o sinal é injetado a um filtro passa baixa passivo de 3ª ordem para obter o sinal original de 5 kHz conforme mostra a figura 5. O espectro do sinal modulado é mostrado na figura 6, com a frequência aproximadamente 5 kHz e amplitude aproximadamente de -34 dB.

Portanto, em resumo, o demodulador está funcionando de acordo como o que esperamos na teoria. Embora a amplitude está abaixo do sinal mínimo detectado isso, poderíamos resolver conforme montamos o sistema como um todo.

Agora vamos analisar o receptor FM completo conforme mostrado nas figuras 7 e 8. Na figura 7, o sinal modulado na entrada na figura 7 é gerado no LTspice usando o bloco FM conforme mostra a etapa 1 da figura 8. O espectro da saída deste sinal FM é mostrado na figura 9. Observe que, a frequência fundamental 230 kHz está com amplitude menor do que as raia laterais. Portanto, o sinal FM gerado está de acordo com a regra de Carson.

Na figura 7, o bloco de oscilador local, no LTspice é projetado com o oscilador de ponte de Wien modificado e o circuito é mostrado na figura 8 na

etapa 2. O sinal gerado pelo oscilador é de 183 kHz e a amplitude aproximadamente de 5.2 V. O resultado desta medição é mostrado na figura 10.

O bloco do misturador, na figura 7, no LTspice é projetado e mostrado na figura 8 na etapa 3. O resultado obtido na saída é a frequência FI de 50 kHz, embora na prática não é exatamente 50 kHz porque o oscilador local não é ideal. O sinal FI é obtido subtraindo a frequência da portadora e a frequência do oscilador local. Então, o sinal FI obtida com o misturador é aproximadamente 47 kHz com a amplitude de 25,3 mV. O resultado desta medição é mostrado na figura 11.

O bloco do filtro passa faixa FI, na figura 7, no LTspice é projetado e mostrado na figura 8 na etapa 4. Este filtro tem como objetivo de remover as raíais superiores (raíais maiores do que 3FI) do sinal FI, aumentar a seletividade e filtrar o ruído. Este resultado podemos observar ao comparar o resultado da simulação mostrado na figura 11 e 12.

Observe que o sinal FI tem a amplitude muito baixo. Isto ocorre devido a misturador que utiliza o somador resistivo e o fato de que o filtro seja um filtro LC passivo. Portanto para compensar esta perda, utilizamos um amplificador FI com ganho de 22 de acordo a equação (1) e um buffer. O objetivo do buffer é para isolar e conectar um estágio de alta impedância de entrada a uma carga de baixa impedância de saída. Com isso o sinal de FI filtrado é amplificado com a amplitude de 450 mV. O resultado desta medição podemos ver na figura 13 e o circuito podemos ver na figura 8 nas etapas 4 e 5 respectivamente.

Na figura 7, o bloco do demodulador é representado no LTspice na figura 8 na etapa 6. O sinal demodulado é mostrado na figura 14 no domínio de tempo e na figura 15 no domínio da frequência. A análise em relação a esta etapa já tínhamos feito anteriormente.

Finalmente, na figura 7, o bloco do amplificador de áudio é projetado no LTspice com um transistor de TBJ. O circuito é mostrado na figura 8 na etapa 7. Observe que nesta etapa também temos um detalhe, que o buffer, antes de

amplificar o sinal demodulado. O objetivo desse buffer é a mesma como mencionado na etapa de amplificação do sinal FI. O amplificador de áudio TBJ tem um ganho aproximadamente 3, então isso implica que o sinal demodulado tem a potência de -24 dB. Portanto agora temos um sinal demodulado com a potência acima do sinal mínimo detectável que é -30 dB.

## 5. Conclusões

Neste projeto foi desenvolvido um demodulador FM balanceado e a montagem do receptor FM completo. Este receptor FM é para receber o sinal FM e o demodular e recuperar a frequência do sinal original que é 5kHz. Os resultados calculados são analisados e caracterizados e concluímos que está de acordo com o que era esperado em teoria. Além disso, a amplitude do sinal também foi analisando e ajustado pela amplificação do sinal e o resultado está dentro do sinal mínimo detectável. Portanto podemos concluir que, o receptor FM e o demodulador projetado está de acordo com que esperamos em teoria.

## Referências

- [1]. A. L. P. Siqueira Campos. Laboratório de Princípios de Telecomunicações. 1 Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- [2]. A. L. P. Siqueira Campos. Notas de aula moduladores.
- [3]. Bruno Sanches Masiero, José Cândido Silveira Santos Filho, Lucas Heitzmann Gabrielli, Max Henrique Machado Costa, Michel Daoud Yacoub. Experimento 5. Demodulação AM e FM. Disponível em: <http://www.decom.fee.unicamp.br/>. Data de acesso: 11/12/2020.
- [4]. Parâmetros Dinâmicos. Disponível em: <http://www.labs.eletrica.unir.br/>. Data de acesso: 11/12/2020.