

Relatório 4: Ondas AM

F429 - G.5 2º semestre 2016

Prof. Lázaro Padilha

Giovani Nascimento Pereira - 168609

Seong Eun Kim - 177143

Renan Adriani Sterle - 176536

Carlos Augusto Figueiredo Freire de Carvalho - 165684

*Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Campinas, SP*

26 de outubro de 2016

Resumo

Nesse experimento, montamos um receptor de ondas AM e estudamos o papel de seus componentes. Para isso, montamos, inicialmente, circuitos para a caracterização de um filtro LC e da curva da corrente pela tensão do diodo. Assim, obtivemos a tensão de cotovelo $V_c \simeq 0.9285V$, de forma que pudemos calcular a corrente de fuga $I_0 = 5.1203 \cdot 10^{-5}A$. Feito isso, construímos um circuito utilizando uma antena, um circuito ressonante como sintonizador, um diodo como demodulador e um alto-falante. A partir disso, pudemos compreender o funcionamento de um rádio galena, de transmissão em modulação AM, e explorar a relação entre a sintonização de frequências e o ajuste da capacitância do circuito ressonante.

Sumário

1	Introdução	3
2	Objetivos	3
3	Metodologia	3
4	Resultados	7
5	Análise de Dados	9
6	Discussão	10
7	Conclusão	10
8	Instrumentos utilizados	11

1 Introdução

O experimento 4 - Diodo semicondutor e receptor AM, foi feito com o intuito de investigar a função dos componentes de um receptor de ondas AM e realizar sua montagem. Para isso, estudamos a atuação de um filtro ressonante sintonizável sobre a frequência e a tensão. Caracterizamos, também, a curva $i \times V$ de um diodo, de forma que pudemos obter a tensão de cotovelo, a partir da qual o diodo passa a conduzir corrente elétrica. Além disso, pudemos, por fim, aplicar os novos conhecimentos para ouvir a uma estação de rádio, utilizando, para isso, de uma antena, o filtro LC, o diodo como demodulador e um alto-falante.

2 Objetivos

O experimento "Diodo semicondutor e Receptor AM teve como objetivo estudar e compreender o papel dos componentes de um Receptor de ondas AM no funcionamento durante a captação de ondas de rádio, através da caracterização da resposta em frequência de um circuito ressonante sintonizável, determinação da curva $i \times V$ de um diodo que permitiu a demodulação do sinal e com isso conseguir montar um circuito que permitia ouvir a uma emissora de rádio com modulação AM. Adotamos também o objetivo adicional de tentar sintonizar dois radiofaróis NDB de Campinas, CPN (515KHz) e IKP (370KHz), para ouvir o código Morse identificador.

3 Metodologia

O experimento 4 permitiu estudar a transmissão de informação através de ondas eletromagnéticas. Para que uma transmissão desse tipo ocorra, o sinal da informação é codificado na onda portadora de forma a ser transmitido e recebido em outro lugar.

A maneira de transmissão de informação através de uma onda eletromagnética varia de cada finalidade. Neste experimento estudamos mais a fundo as ondas de rádio AM (*Amplitude Modulation*), onde a informação é adicionada a uma variação na amplitude da onda, a modulação, com frequência bem menor à da onda portadora. No caso de ondas de rádio, essa modulação segue a forma da onda sonora codificada na onda eletromagnética. Um exemplo de modulação de ondas AM pode ser observada na fig. 1.

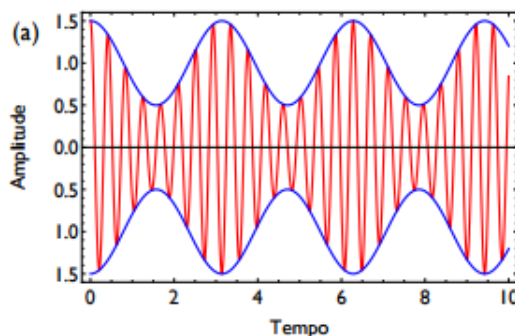


Figura 1: Esquematização de uma onda de rádio AM, onde a frequência fica constante e a onda é modulada por um sinal

Uma onda com modulação AM [4] pode ser descrita através da equação :

$$V = (1 + \delta(t))V_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

Onde ωt fazem referência a características da onda portadora, e sua frequência de transmissão, já o $\delta(t)$ representa a modulação da amplitude da onda que carrega a informação sonora.

O circuito do Receptor utilizado pode ser observado na fig. 2. A primeira parte destacada em pontilhados na fig. 2 descreve um filtro ressonante, constituído por um circuito LC em paralelo com um capacitor variável. Isso é importante para a montagem do receptor de rádio pois existem passando pelo local do experimento muitas frequências de ondas de rádio, ou outras ondas eletromagnéticas, e elas serão captadas pela antena do circuito. A fim de observar (ouvir) uma estação de rádio específica, é necessário filtrar essas ondas de rádio apenas na banda desejada. O filtro ressonante então funciona como um passa-banda, permitindo passar apenas as faixas próximas da estação de interesse (com frequências próximas).

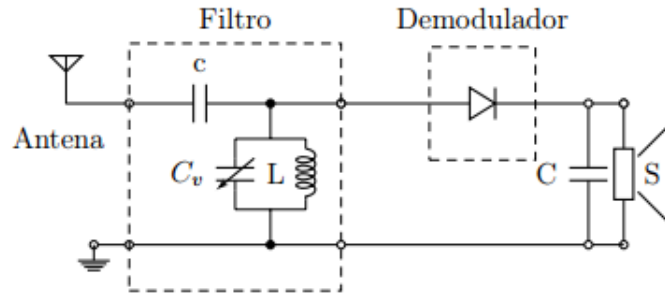


Figura 2: Circuito do Receptor AM montado. A primeira parte destacada refere-se ao filtro ressonante utilizado para filtragem das frequências recebidas pela antena, e a segunda parte destacada está diodo que funciona como o demodulador

O papel da antena acoplada ao circuito é transformar os sinais eletromagnéticos que incidem na mesma em sinais elétricos para o circuito. Quando uma onda eletromagnética, com frequência f_c e comprimento de onda $\delta = c/f_c$, incide sobre uma antena, um dipolo oscilante é induzido na antena, que induz uma corrente no circuito no qual ela está conectada.

Então, para o estudo do circuito, foi feita a montagem do circuito LC da fig. 2, conforme descrito na fig. 3.

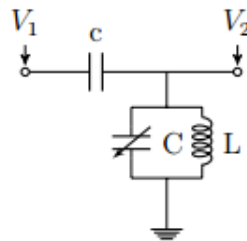


Figura 3: Circuito para caracterização do Filtro LC do Receptor AM da fig. 2

O filtro ressonante foi fornecido pronto constituído por um capacitor variável já ligado a um indutor e outro capacitor constante. Esse circuito todo foi ligado à alimentação através do gerador de

função a uma frequência de 200KHz numa onda senoidal e a entrada e saída ligados ao osciloscópio para observação. Depois, com o auxílio do MatLAB e com o osciloscópio e o gerador de função ligados ao computador, foi feita uma varredura a fim de caracterizar a transmitância do filtro.

A função resposta do filtro pode ser descrita como:

$$H(\omega) = \frac{X_C X_L}{X_C X_C + (X_C X_C) X_L} = \frac{\omega^2 Lc}{\omega^2 L(C + c) - 1} \quad (2)$$

A partir dessa equação é possível depreender que o circuito possui uma situação de ressonância ω_0 em:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C + c)}} \quad (3)$$

Pois $H(\omega_0) \rightarrow \infty$. Mas isso ocorre pois consideramos o indutor ideal, sem resistência. Adicionando o valor da resistência do indutor (r), é possível obter a expressão para a transmitância do circuito como:

$$T(\omega_0) = c^2 L^2 \omega_0^4 (1 + L^2 \omega_0^2 / r^2) \quad (4)$$

De forma que agora, a transmitância não explode em ω_0 , mas sim gera um pico na função. Ou seja, determina uma passagem de banda de frequência do circuito.

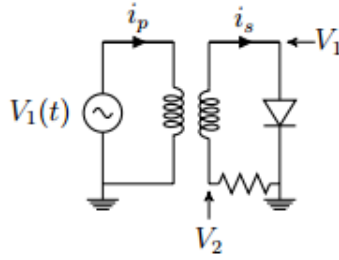


Figura 4: Circuito para caracterização da curva i-v do diodo

Com o filtro caracterizado, passamos para compreensão do decodificador, que é a segunda parte destacada na fig. 2 e composta por um diodo. O circuito da fig. 4 foi montado utilizando-se um transformador de isolamento ($N_p = N_s$), ou seja, que não aumentava nem diminuía a tensão aplicada, para isolar os circuitos eletricamente, devido ao fato de os dois canais do osciloscópio terem um aterramento comum.

Esse circuito permitia medir através do osciloscópio a tensão de alimentação do circuito, antes do diodo, (V_1), e a tensão de saída do diodo (V_2). Depois de montado, ele foi ligado ao osciloscópio para observação das formas de onda obtidas. Então, o osciloscópio foi ligado no modo XY para mostrar a curva i-v do diodo (É importante notar que se os canais forem invertidos, a curva mostrada nesta parte seria a curva v-i).

Por fim, o circuito da fig. 2 foi montado, utilizando o mesmo filtro da fig. 3, mas dessa vez com um diodo Schottky no lugar do demodulador (O motivo de usarmos este diodo, ao invés do diodo de silício, é que a tensão crítica na qual este diodo deixa passar corrente ($V_0 \approx 30\text{mV}$) é muito menor que o diodo de silício ($V_0 \simeq 700\text{mV}$). Isto o torna ideal para demodular sinais de pequena amplitude, como o que recebemos da antena).

A função do diodo pode ser descrita como:

$$I = I_0(e^{\beta v} - 1) \quad (5)$$

Sendo I_0 a corrente de fuga do diodo e $\beta = q/(TK_B)$ onde K_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura do diodo.

Sendo que, no cotovelo, a tensão pode ser aproximada por:

$$v_c \simeq -\ln(I_0)/\beta \quad (6)$$

E para situações próximas ao cotovelo do diodo, a equação pode ser aproximada por:

$$I(v) = av + bv^2 \quad (7)$$

Quando colocamos a função de entrada proveniente da antena, e que passou pelo filtro do passa banda, ou seja, a eq. (1), a onda é decomposta. Assumindo uma profundidade de modulação baixa, $\delta(t) \ll 1$, as componentes podem ser descritas (simplificadamente) através da equação a seguir:

$$I(t) = av(t) + bv(t)^2 = Dc + A\delta(t) + B\delta(t)\cos\omega t + C\delta(t)\cos2\omega t \quad (8)$$

Onde DC é um fator constante, A, B e C são constantes também que dependem das propriedades do circuito. O importante é notar que após a demodulação, um termo proporcional a $\cos\omega t$ surge, junto com um termo proporcional a $\cos2\omega t$ um termo constante (Dc) e uma oscilação proveniente da modulação do sinal que é $\delta(t)$. Como esses sinais depois passam por um filtro passa baixa, e como as frequências de transmissão de onda de rádio são de frequência alta (da ordem de Mega Hertz), e a frequência da modulação $\delta(t)$ representa a mesma frequência de ondas audíveis, ou seja, no intervalo de 20 a 20000 Hz, apenas os termos Dc e A $\delta(t)$ *passam* pelo filtro, sendo apenas o termo $A\delta(t)$ amplificado pelo amplificador e possível de ser ouvido.

Depois, com o circuito montado, a capacitância variável do filtro ressonante foi variada até que fosse possível ouvir a uma estação de rádio.

Ao final do experimento, foi ligado o amplificador diretamente ao gerador de função, para que fosse possível ouvir as ondas geradas por ele. Foram colocadas várias formas de onda em várias frequências e com comportamentos distintos, mas apenas para observação. Testamos também os limites das faixas audíveis de frequência para humanos.

4 Resultados

Ao montarmos o esquema representado na fig. 3, utilizando a capacitância mínima, fizemos a varredura da transmitância representada na fig. 5.

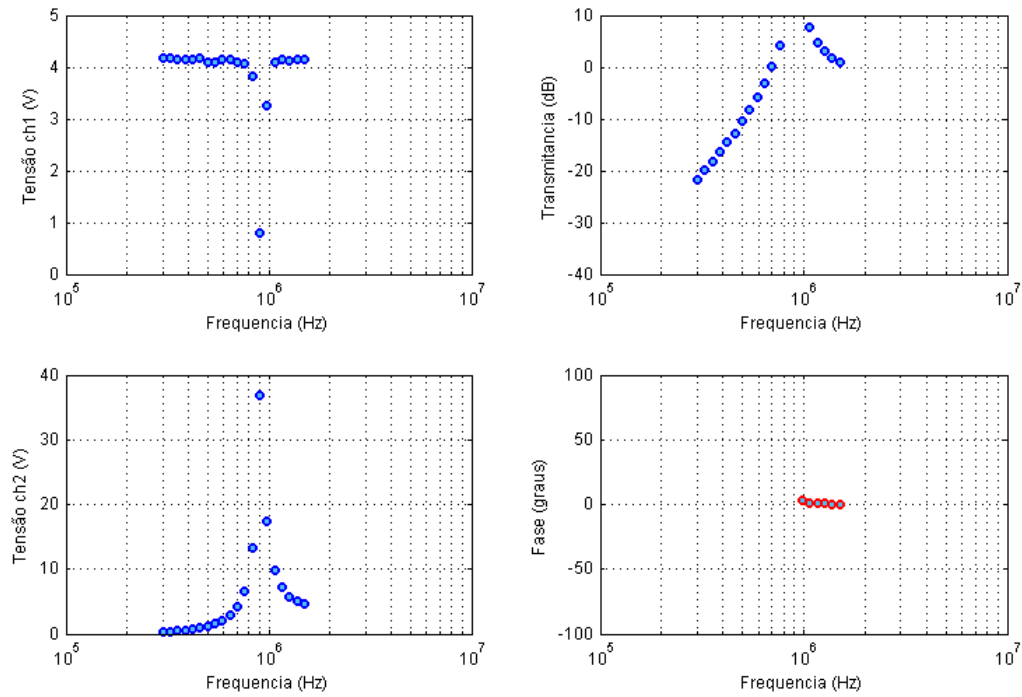


Figura 5: Imagem obtida através da varredura do osciloscópio para a transmitância do filtro LC, descrito na fig. 3, com o capacitor colocado na capacitância mínima

A partir do mesmo circuito, mas substituindo a capacitância mínima pela máxima, fizemos a varredura da transmitância do filtro ressonante LC, representada na fig. 6.

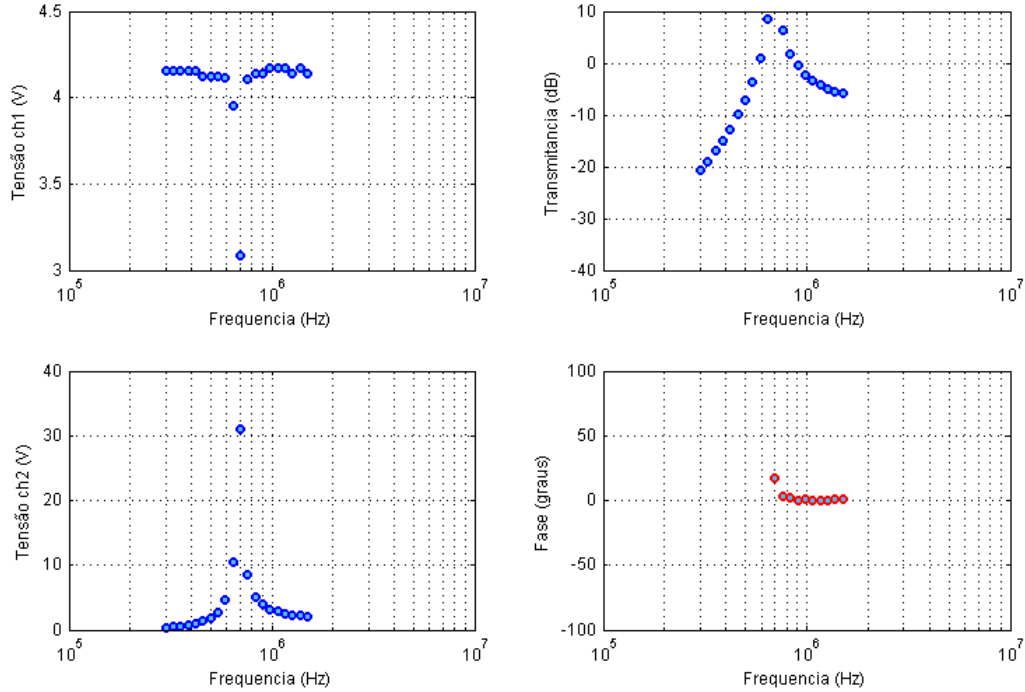


Figura 6: Imagem obtida através da varredura do osciloscópio para a transmitância do filtro LC, descrito na fig. 3, com o capacitor colocado na capacitância máxima

Ao montarmos a fig. 4, pudemos fazer a varredura e obter as seguintes curvas:

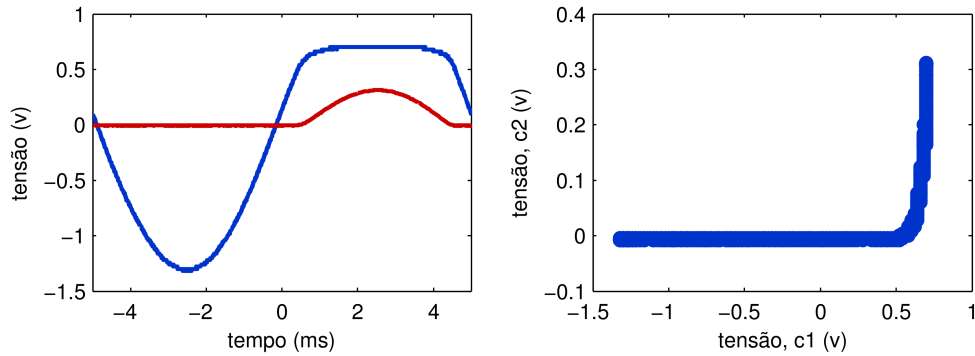


Figura 7: Imagem obtida através da varredura do osciloscópio para a curva da tensão no resistor pela tensão da fonte

5 Análise de Dados

Analisando as figuras fig. 5 e fig. 6, especialmente quanto às transmitâncias, podemos notar claramente que a alteração na capacitância do circuito ressonante muda a frequência de ressonância, deslocando o pico da transmitância. Para sintonizar frequências mais altas, devemos utilizar capacitâncias menores, e vice-versa.

Através dos dados obtidos da varredura feita com o auxílio do MATLAB do comportamento do diodo, foi possível chegar na fig. 8.

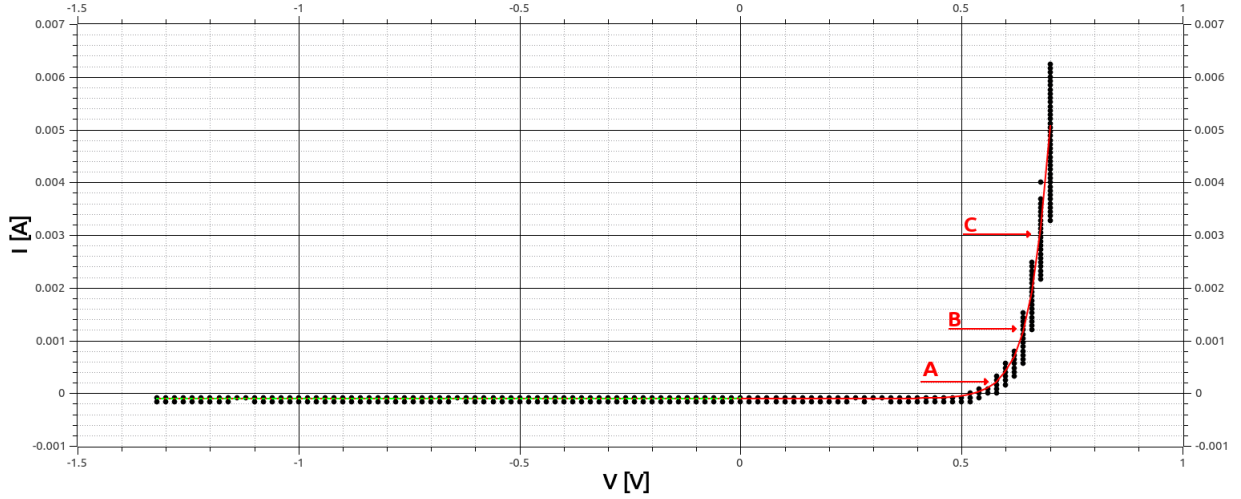


Figura 8: Gráfico $i \times V$ para o diodo de silício. A curva vermelha é a modelagem exponencial da corrente no diodo em todo o domínio ($I = I_0(\exp(\beta V) - 1)$, $I_0 = 5.1203 \cdot 10^{-5} A$, $\beta = 23.0391 \frac{1}{V}$). Em verde, a curva da corrente no diodo para a polaridade reversa. Os pontos A, B e C destacados são respectivamente (0.58, 0.00024), (0.64, 0.00120) e (0.68, 0.00304)

A curva obtida tem um comportamento exponencial, conforme previsto pela eq. (5). Através do gráfico, é possível obter os coeficiente β e I_0 da equação. Infelizmente, o software utilizado para a modelagem (SciDAVis 1.D009) não nos forneceu corretamente os erros de I_0 e β . Ambos os valores de erros tiveram grandeza na ordem de 10^{-160} , o que inviabilizou a propagação correta dos erros.

Agora, com esses valores podemos estimar a tensão de cotovelo V_c através da eq. (6), obtendo $V_c \simeq 0.9285V$, que é próximo do valor esperado pela literatura $\simeq 0.7V$.

Através do gráfico, pudemos modelar a curva do diodo para a polaridade reversa, e obter o coeficiente angular $M = (7 \pm 2) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\Omega}$ que está associado à corrente de fuga do diodo. De fato, o inverso deste coeficiente é a resistência equivalente do diodo para a polaridade invertida, sendo $R_d = (14 \pm 4) \cdot 10^4 \Omega$. Observamos que ela é muito grande.

Com a modelagem exponencial para a corrente no sentido direto, pudemos determinar a resistência equivalente do diodo. Especificamente, para os três pontos A, B, e C indicados em fig. 8, calculamos a resistência através do inverso do coeficiente angular de $I(V)$ em cada ponto. Assim obtivemos $R_A = 133.3\Omega$, $R_B = 33.4\Omega$ e $R_C = 13.3\Omega$. Esses valores indicam que conforme a tensão aumenta e se afasta da tensão de cotovelo em sentido positivo, a resistência equivalente do diodo diminui.

Com o circuito da fig. 2, e conectado corretamente ao terra externo, foi possível sintonizar o

circuito através da variação da capacitância do circuito, alterando a faixa de frequência que passava pelo filtro ressonante. Ao escutar a rádio sintonizada, foi possível descobrir que se tratava da Band AM, de frequência 1170 MHz.

Nós alteramos também o capacitor fixo de modo a permitir sintonizar os radiofaróis CPN e IKP. No entanto, para nenhum deles conseguimos ouvir o código Morse identificador. Isso pode ter sido causado pela dificuldade em sintonizar as frequências, e também devido ao fato de a intensidade do sinal do sinal ser reduzida especialmente em virtude da altitude relativa ao solo, visto que os radiofaróis NDB não são otimizados para emissão a baixas altitudes. Por fim, o amplificador foi ligado diretamente ao gerador de função. Isso permite que ele transforme em ondas sonoras as formas de onda geradas pelo gerador, e assim foi possível ouvir o comportamento das ondas geradas, sonoramente, e averiguar que aumentando a frequência o som se tornava mais agudo, diminuindo mais grave, e os diferentes timbres gerados para cada função de onda diferente.

6 Discussão

A curva obtida do diodo, teve a forma esperada de uma função exponencial [3], que representa o comportamento desse componente eletrônico. A tensão de cotovelo encontrada foi de $V_c \simeq 0.9285V$, sendo que o valor esperado era de $0.7V$ [7]. É possível notar uma diferença entre os valores obtidos e o esperado pela literatura, mas isso provém possivelmente porque a expressão da tensão cotovelo do diodo utilizada é uma aproximação. Como conseguimos *sintonizar* o circuito de forma a ouvir uma estação de rádio (a Bandeirantes AM, na frequência de 1170 MHz), foi possível notar que o circuito se comportava como esperado. De todas as ondas eletromagnéticas incidentes na antena receptora, apenas essa foi filtrada e demodulada de forma a ser ouvida pelo amplificador. Tal limitação se deve ao fato de que o capacitor variável fornecido variava dentro de um intervalo limitado, restringindo, assim, o intervalo de frequências que poderiam passar pelo filtro ressonante e, assim, ser captadas.

Isso demonstra tanto o funcionamento dos filtros que faziam parte do circuito, quanto o papel do demodulador.

No final, quando escutamos o som gerado pelas funções do gerador de função, diretamente, foi possível notar que o amplificador apenas transforma em ondas sonoras a forma de onda da corrente que entra no circuito.

Foi muito interessante testar os limites de audição das pessoas do laboratório, que fica realmente em torno de 20 a 20000 Hz, conforme o descrito para a literatura dos limites comuns da audição humana [6].

7 Conclusão

Portanto podemos concluir que o circuito utilizado funciona como um receptor de ondas de rádio AM, já que foi possível utilizar o circuito para ouvir uma estação de rádio. Confirmamos que o filtro ressonante LC que tem a capacitância variável permite uma passagem de banda com uma frequência próxima ao desejado da *sintonização* através da variação da capacitância do circuito. Foi possível confirmar o comportamento do diodo que retificava a onda, e permitia a passagem de tensão em apenas um sentido. Para o comportamento no *cotovelo* do diodo, encontramos a tensão de cotovelo como sendo $V_c \simeq 0.9285V$, através dos coeficientes da eq. (5) sendo $\beta = 23.0391\frac{1}{V}$ e a corrente de fuga $I_0 = 5.1203 \cdot 10^{-5}A$. Dessa forma, podemos concluir que o experimento cumpriu os seus objetivos e esteve de acordo com o esperado.

8 Instrumentos utilizados

Os instrumentos utilizados neste experimento foram,

- Osciloscópio Tektronix 10002B
- Gerador de funções arbitrárias BK Instruments 4052
- Multímetro DT830 Digital

Referências

- [1] Gustavo Wiederhecker e colaboradores, *Roteiros de F429 - Corrente alternada e óptica*. Compilado em 26 de setembro de 2016.
- [2] [Boyce and DiPrima, 2009 Boyce, W. E. and DiPrima, R. C. (2009)]. Elementary differential equations and boundary value problems. Wiley, Hoboken, NJ, 9th ed edition.
- [3] [Yaro Burian Jr. e Ana Cristina Lyra]. Circuitos Elétricos.
- [4] Fundamentos da Física, Volume 3 - 9ª edição.
- [5] [Gustavo S. Wiederhecker] Roteiros de F429 - Corrente alternada e óptica.
- [6] Human Audition Limits. Saiba mais sobre em: https://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_range
- [7] Diodos. Saiba mais em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Diode>