

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Jucélio Vilmar Schetz

TRANSMISSOR DE RÁDIO AM PARA TELEFONE CELULAR

Florianópolis
2023

Jucélio Vilmar Schetz

TRANSMISSOR DE RÁDIO AM PARA TELEFONE CELULAR

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Márcio Cherem Schneider, Dr..

Florianópolis
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schetz, Jucélio Vilmar
TRANSMISSOR DE RÁDIO AM PARA TELEFONE CELULAR /
Jucélio Vilmar Schetz ; orientador, Márcio Cherem
Schneider, 2023.
67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

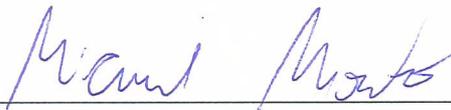
1. Engenharia Elétrica. 2. Modulador AM. 3. Oscilador.
4. Transmissor. 5. Demodulador. I. Schneider, Márcio
Cherem. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Jucélio Vilmar Schetz

TRANSMISSOR DE RÁDIO AM PARA TELEFONE CELULAR

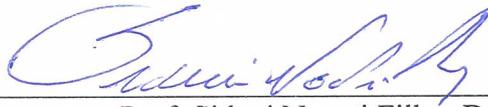
Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 07 de julho de 2023.

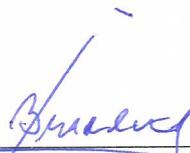


Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Sidnei Noceti Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Richard Demo Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe pelo apoio durante esse tempo de graduação, sem ela ficaria bem mais difícil. Aos professores da UFSC pelo conhecimento compartilhado comigo que foram essenciais para minha formação. Sou grato à PRAE pelo apoio financeiro que tive durante o curso com o auxílio da bolsa estudantil, isenção do RU e isenção dos cursos extracurriculares; sem isso a minha formação não seria tão completa.

Ao meu orientador, professor Márcio Cherem Schneider, agradeço pela orientação neste trabalho, pelo apoio e pelo aprendizado que adquiri sobre o assunto. Aos funcionários da UFSC por manterem a universidade funcionando em bom estado. Ao povo brasileiro por financiarem esta educação pública e gratuita.

Agradeço aos professores Jefferson Luiz Brum Marques, Richard Demo Souza e Sidnei Noceti Filho por aceitarem fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é projetar e montar um transmissor de rádio AM para telefone celular. Os objetivos secundários são a simulação e análise do transmissor. As etapas do transmissor envolvem as análises e simulações do oscilador e do modulador. O circuito do transmissor é montado em protoboard e em placa de circuito impresso para testes de laboratório. A metodologia empregada para realizar este trabalho consiste inicialmente de revisão teórica da literatura técnica sobre o tema, a fim de obter conhecimento sobre o tipo de transmissão. Serão selecionados o modulador e o oscilador. Inicialmente, são feitos o projeto e a simulação dos blocos separadamente, em seguida, o conjunto foi simulado visando à obtenção de um sinal de saída modulado em amplitude adequado à aplicação. O circuito foi montado inicialmente em protoboard e testado em laboratório. Finalmente, o transmissor é montado em placa de circuito impresso para os testes de funcionalidade.

Palavras-chave: Transmissor de rádio AM. Oscilador. Modulador. Protoboard. Placa de circuito impresso.

ABSTRACT

The main objective of this work is to design and assemble an AM radio transmitter for a cell phone. The secondary objectives are transmitter simulation and analysis. The transmitter comprises stages such as oscillator and modulator analyses and simulations. The transmitter circuit is mounted on a breadboard and printed circuit board for laboratory tests. The methodology used to carry out this work initially consists of a theoretical review of the technical literature on the subject to obtain knowledge about the transmission type. The modulator and oscillator will be selected. Initially, the design and simulation of the blocks are done separately. Next, the circuit is simulated to obtain an amplitude-modulated output signal suitable for the application. The circuit is initially assembled on a protoboard and tested in the laboratory. Finally, the transmitter is mounted on a printed circuit board for functionality testing.

Keywords: AM radio transmitter. Oscillator. Modulator. Breadboard. Printed circuit board.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Blocos do Módulo Transmissor.....	19
Figura 2 - Modulador AM de alto nível.....	23
Figura 3 - Modulador AM com amplificador classe C.....	24
Figura 4 - Modulador <i>chopper</i>	24
Figura 5 - Fluxograma do modulador.....	25
Figura 6 - Célula de <i>Gilbert</i>	26
Figura 7 - Cristal e circuito equivalente.....	27
Figura 8 - Oscilador Colpitts a cristal: a)circuito completo; b)modelo AC.....	28
Figura 9 - Esquemático do Modulador.....	29
Figura 10 – Circuito demodulador.....	30
Figura 11 - Esquemático para simulação.....	31
Figura 12 - Sinal Modulado, portadora de 1 MHz e sinal modulador de 400 Hz.....	31
Figura 13 - Circuito com fonte V1 desligada.....	32
Figura 14 - Varredura da Moduladora de -1 a 1 V.....	33
Figura 15 - Esquemático do oscilador.....	34
Figura 16 – Sinal de saída do oscilador após o atenuador resistivo.....	34
Figura 17 – Sinal da portadora no domínio do tempo e da frequência.....	35
Figura 18 – Sinal da moduladora no domínio do tempo e da frequência.....	35
Figura 19 - Sinal modulado antes e depois do filtro passa-altas, respectivamente.....	36
Figura 20 – Circuito completo.....	37
Figura 21 – Sinal modulado do circuito completo.....	38
Figura 22 – Espectro do circuito completo.....	38
Figura 23 – Sinal demodulado.....	39
Figura 24 – Sinal transmitido (preto) x Sinal demodulado (azul).....	40
Figura 25 – Sinal modulado de uma modulação AM por meio de fontes de tensão ideais.....	40
Figura 26 – Faixa de operação do modulador em função da temperatura.....	41

Figura 27 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 50 Hz.....	42
Figura 28 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 50 Hz.....	43
Figura 29 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 400 Hz.....	43
Figura 30 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 400 Hz.....	44
Figura 31 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 3400 Hz.....	44
Figura 32 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 3400 Hz.....	45
Figura 33 - Oscilador montado na protoboard.....	45
Figura 34 – Sinal de saída do oscilador.....	46
Figura 35 - Modulador montado na protoboard.....	46
Figura 36 – Sinal modulado ligado ao gerador de funções de 1 MHz.....	47
Figura 37 – Sinal modulado.....	47
Figura 38 – Oscilador na placa de circuito impresso.....	48
Figura 39 – Sinal de saída do oscilador na placa de circuito impresso.....	49
Figura 40 – Modulador na placa de circuito impresso.....	50
Figura 41 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 50 Hz.....	51
Figura 42 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 400 Hz.....	51
Figura 43 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 3400 Hz.....	52
Figura 44 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 50 Hz.....	52
Figura 45 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 400 Hz.....	53
Figura 46 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 3400 Hz.....	53
Figura 47 - Circuito equivalente (amplificador em emissor comum) de pequenos sinais do modulador para a entrada de portadora.....	58
Figura 48 - Circuito equivalente para cálculo do ganho em base comum.....	61
Figura 49 - Circuito equivalente de pequenos sinais do transistor em base comum.....	62
Figura 50 – Modelo DC do Oscilador.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do modulador.....	66
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada - <i>Alternating Current</i>
AF	Áudio Frequência
AM	Modulação em Amplitude - <i>Amplitude Modulation</i>
BJT	Transistor de Junção Bipolar - <i>Bipolar Junction Transistor</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
CD	Disco Compacto - <i>Compact Disc</i>
DC	Corrente Contínua – <i>Direct Current</i>
DSB	Banda Lateral Dupla - <i>Double-Side Band</i>
DSB-FC	Banda Lateral Dupla com Portadora – <i>Double - Side Band Full Carrier</i>
DSB-SC	Banda Lateral Dupla com Portadora Suprimida - <i>Double-Side Band Supressed Carrier</i>
EBC	Empresa Brasil de Comunicação
EDA	Automação de projeto eletrônico - <i>Electronic Design Automation</i>
FM	Modulação em Frequência – <i>Frequency Modulation</i>
INEP	Instituto de Eletrônica de Potência
LABEX	Laboratório de Ensino de Experimentação em Eletrônica
LTSpice	Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados da empresa Tecnologia Linear – <i>Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis</i>
KVL	Lei das Tensões de Kirchhoff – <i>Kirchhoff's Voltage Law</i>
MEC	Ministério da Educação
PCB	Placa de Circuito Impresso - <i>Printed circuit board</i>
PCI	Interconexão de componentes periféricos - <i>Peripheral Component Interconnect</i>
QAM	Modulação de Amplitude em Quadratura - <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>

QPSK Chaveamento de Mudança de Fase em Quadratura - *Quadrature Phase Shift Keying*

RF Radiofrequência

RMS Raiz da Média Quadrática - *Root Mean Square*

SD Digital Seguro - *Secure Digital*

SSB-SC Banda Lateral Única com Portadora Suprimida - *Single-Side Band, Supressed Carrier*

SW Chave – *Switch*

THD Distorção Harmônica Total - *Total Harmonic Distortion*

TV Televisor

USB Porta Serial Universal - *Universal Serial Bus*

.OP Ponto de Operação – *Operating Point*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
a	Amplitude da portadora
C	Capacitor
C_{out}	Capacitor de saída
D	Diodo
f	Frequência do sinal modulador
F	Farad
f_c	Frequência de corte do filtro passa-altas
G	Ganho
g_m	Transcondutância
H	Henry
H	Resposta em frequência do filtro
h	Horas
Hz	Hertz
h_{ie}	Resistência de entrada do transistor em emissor comum
I	Corrente
I_b	Corrente da base
I_c	Corrente do coletor
I_{Cq}	Corrente do coletor do oscilador
I_{Rb}	Corrente do resistor da base do oscilador
j	$\sqrt{-1}$
k Ω	Quilohms
k	Quilo
kHz	Quilohertz
L	Indutor

$L1$	Indutor 1
$L2$	Indutor 2
L_b	Indutor b
L_s	Indutor série do cristal oscilador
m	Índice de modulação
m	Mili
$N1$	Número de espiras do primário transformador
$N2$	Número de espiras do secundário transformador
n	Nano
p	Pico
P	Potência do sinal transmitido
Q	Transistor
R	Resistor
R_{BB}	Resistor equivalente da base
R_C	Resistor do coletor
R_{CC}	Resistor equivalente do coletor
R_e, R_E, r_e	Resistor do emissor
R_L	Resistor do indutor
R_{load}	Resistor de carga
R_{out}	Resistor de saída
R_s	Resistor série do cristal oscilador
R_{ser}	Resistor série
S	Siemens
t	Tempo
v	Tensão
V_{CC}	Tensão da fonte de alimentação positiva
V_m	Amplitude do sinal modulador

V_{pp}	Tensão pico-a-pico
X_L	Reatância do indutor L
X_{TAL}	Cristal oscilador
Z	Impedância
ω	Frequência angular
ω_m	Frequência angular do sinal modulador
ω_P	Frequência ressonante em paralelo
ω_S	Frequência ressonante em série
ω_0	Frequência de oscilação
2N2222	Transistor 2N2222
β	Ganho de corrente em emissor comum
μ	Micro
Ω	Ohm
.tran	Operação transiente
ϕ_t	Tensão térmica
η	Eficiência do sinal transmitido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	MOTIVAÇÃO.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos.....	20
2	TÉCNICAS DE MODULAÇÃO EM AMPLITUDE.....	20
2.1	Introdução sobre tópicos estudados.....	20
2.2	Métodos de Modulação em Amplitude.....	21
2.3	Circuitos Moduladores em Amplitude.....	22
2.3.1	Modulador AM de Alto Nível.....	22
2.3.2	Modulador AM de Alto Nível com Amplificador Classe C.....	23
2.3.3	Modulador <i>Chopper</i>	24
2.3.4	Modulação AM por Dispositivo Não Linear.....	25
2.3.5	Multiplicador Analógico - Célula de <i>Gilbert</i>	25
2.4	Osciladores.....	26
2.4.1	Oscilador a cristal.....	27
2.4.2	Oscilador Colpitts a Cristal.....	27
3	Análise do Modulador.....	29
4	Análise do Oscilador.....	33
5	BLOCO DE ENTRADA, ESTÁGIO DE SAÍDA E ANTENA.....	36
6	INTERCONEXÃO.....	37
7	RESULTADOS & COMPARAÇÃO TEÓRICA.....	37
8	Resultados da Protoboard.....	45
9	Circuitos Montados em Placa de Circuito Impresso.....	48
10	CONCLUSÃO.....	54
10.1	Trabalhos Futuros.....	54

REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE A – Projeto do Modulador.....	56
APÊNDICE B – Análise CA do Modulador.....	58
APÊNDICE C – Ganho em Base Comum.....	61
APÊNDICE D – Dados do Oscilador.....	63
APÊNDICE E – Custos.....	66

1 INTRODUÇÃO

Em 1906, Reginald Fessenden começou as primeiras transmissões utilizando a modulação em amplitude. A modulação AM era usada apenas para transmissões musicais e recados diversos antes da Primeira Guerra Mundial. Com o início da era de ouro do rádio, da década de 20 até os anos 50, a situação mudou com o surgimento das rádios comerciais [2].

Na emissora de Roquette-Pinto, que em 1923 fundou a Rádio Sociedade do Rio de Janeiro começaram as primeiras transmissões AM no Brasil. O ensino à distância é transmitido pelo país quando a rádio se tornou em Rádio Ministério da Educação em 1936. A Rádio MEC da EBC (antiga Radiobrás) é o nome dessa rádio atualmente [2].

Em meados do século XX as transmissões em amplitude modulada foram fundamentais na vida do brasileiro. Os times cariocas e paulistas de futebol foram divulgados por todo o Brasil atingindo quase 100% do território nacional através das emissoras de longo alcance, como a Rádio Nacional do Rio de Janeiro, a Rádio Tupi, Rádio Globo e a Rádio Record. Muitas rádios AM da época estão transmitindo sua programação em FM [2].

Transmitia-se uma mensagem com uma portadora e amplitude específica quando se queria usar a modulação em amplitude. Essa modulação ficou conhecida como AM DSB-FC (double-sideband full carrier) . As bandas laterais, com a mensagem, são transmitidas juntamente com a portadora neste tipo de modulação [4].

A DSB-FC e a DSB-SC (double-sideband suppressed carrier) vieram da modulação AM DSB (double-sideband) [5].

O espectro do sinal contém a portadora e duas bandas laterais, no método clássico DSB-FC [6], onde a amplitude da portadora varia em função do sinal modulador. A informação sobre a portadora não é transmitida, porém as duas bandas laterais são, no DSB-SC [3]. Apenas uma das bandas laterais é necessária para transmitir o conteúdo da informação, devido a modulação DSB-SC possuir duas bandas laterais simétricas em torno da frequência da portadora [3].

Quando se precisa diminuir a faixa de frequências do sinal pela metade da faixa dos casos anteriores é usado o método SSB-SC (single-side band, suppressed carrier), devido ao seu conteúdo espectral [3] .

A possibilidade de se construir um receptor barato (composto basicamente por um resistor, um diodo e um capacitor), mesmo com perda de

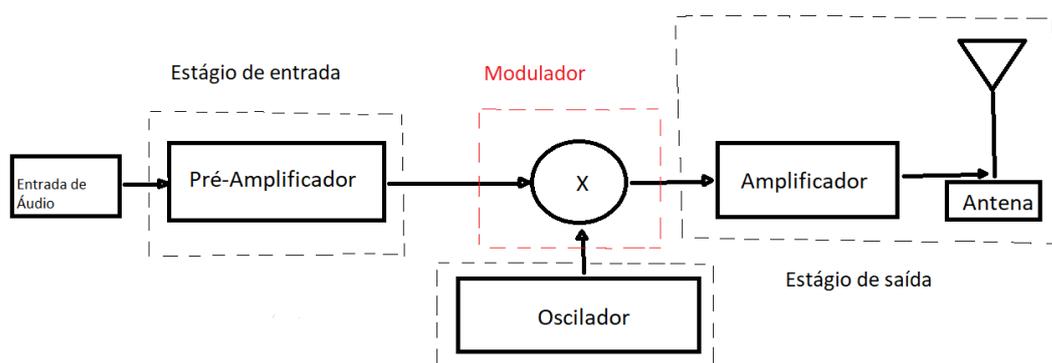
potência foi uma das grandes motivações para a criação da radiodifusão AM comercial [7]. Esse é um dispositivo não linear (diodo) seguido de um filtro, constituído por um capacitor em paralelo com um resistor. Esse receptor utiliza o princípio da detecção de envoltória [7].

1.1 MOTIVAÇÃO

Este projeto possui como motivação o fato de algumas pessoas possuírem aparelhos de rádio nos automóveis mais antigos e assim possibilitar o uso destes para transmitir sinais de áudio produzidos pelos telefones celulares.

Devido a muitos automóveis antigos não possuírem as entradas de USB, Bluetooth e SD, e têm somente as entradas de CD e rádio. O projeto se trata de um modulador AM responsável por transmitir o sinal de áudio de um telefone celular através da saída de áudio modulado em amplitude com portadora de 1 MHz para o receptor de rádio antigo. Assim, os usuários poderão utilizar um rádio antigo desses aparelhos como um rádio moderno com entrada de mídia para celulares. Para o celular será como estar conectado a um fone de ouvido por meio do Jack de áudio e, para o carro será como estar conectado a uma rádio AM convencional.

Figura 1 - Diagrama de Blocos do Módulo Transmissor



Fonte: Autor (2023)

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é projetar e montar um transmissor de rádio AM para telefone celular.

1.4 Objetivos Específicos

Como objetivos secundários, podemos destacar a simulação e análise do transmissor. As etapas do transmissor envolvem as análises e simulações do oscilador e do modulador. O circuito do transmissor será montado em protoboard e em placa de circuito impresso para testes de laboratório.

2 TÉCNICAS DE MODULAÇÃO EM AMPLITUDE

2.1 Introdução sobre tópicos estudados

A modulação AM é a técnica de transmitir um sinal de informação, utilizando um sinal de alta frequência para transportar a informação, a onda portadora. A modulação em amplitude AM consiste em modificar a amplitude da onda portadora para transmitir a informação. A frequência e fase da onda portadora não são alteradas. O sinal a ser transmitido é o sinal modulante [8].

Nos próximos tópicos veremos alguns métodos de modulação em amplitude como a modulação DSB-FC, a AM DSB, a DSB-FC, a DSB-SC, SSB-SC e a modulação de amplitude em quadratura. Também apresentaremos circuitos moduladores em amplitude, como o modulador AM de alto nível, o modulador AM de alto nível com amplificador classe C, o modulador *Chopper*, a modulação AM por dispositivo não linear e o multiplicador analógico - célula de *Gilbert*. Por fim, foi feita uma breve explicação sobre osciladores, oscilador a cristal e o oscilador Colpitts a cristal [8].

2.2 Métodos de Modulação em Amplitude

A modulação em amplitude era realizada transmitindo-se uma portadora com uma amplitude de base e modificando-se esta amplitude em função da mensagem que se desejava transmitir. Este método de modulação foi nomeado de AM DSB-FC (*double-side-band full carrier*) [4].

A modulação AM DSB (*double-sideband*) é a que originou outros tipos de modulação em amplitude, como a DSB-FC (*double-side-band full carrier*) e a DSB-SC (*double-side-band suppressed carrier*) [4].

Na técnica clássica DSB-FC [6], no qual a amplitude da portadora se altera em função do sinal modulador, o espectro do sinal possui a portadora e duas bandas laterais. Já no DSB-SC, as duas bandas laterais são transmitidas, mas a informação sobre a portadora não o é [3]. Como a modulação DSB-SC têm duas bandas laterais iguais em torno da frequência da portadora, somente uma das bandas laterais é indispensável para transmitir o conteúdo da informação [6].

Por causa desse excesso no conteúdo espectral, o método SSB-SC (Single-side band, suppressed carrier) foi aproveitado quando se queria diminuir a banda de frequências do sinal à metade da faixa dos métodos anteriores [3].

A **modulação de amplitude em quadratura** (do inglês *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*), usada quando se deseja sinais modulados em amplitude, porém com diferença de fase de 90° , é usada em TV digital e outros sistemas que precisam de alta taxa de transferência de informação como TV a cabo e alguns sistemas usados por radioamadores para transmissões em pacotes para transferência de dados [3].

Uma das grandes motivações para a criação do AM comercial foi a chance de se produzir um receptor barato (formado por um resistor, um diodo e um capacitor), embora com gasto adicional de potência [7]. Tal receptor utiliza a teoria da detecção de envoltória, que emprega um dispositivo não linear (diodo) acompanhado de um capacitor em paralelo com um resistor [7].

2.3 Circuitos Moduladores em Amplitude

Nesta seção apresentaremos alguns tipos de moduladores, pois como o objetivo principal deste trabalho é projetar um transmissor AM, temos que conhecer os tipos de moduladores AM.

Em seguida relataremos sobre o oscilador a cristal que foi escolhido devido fato deste possuir uma frequência bastante precisa.

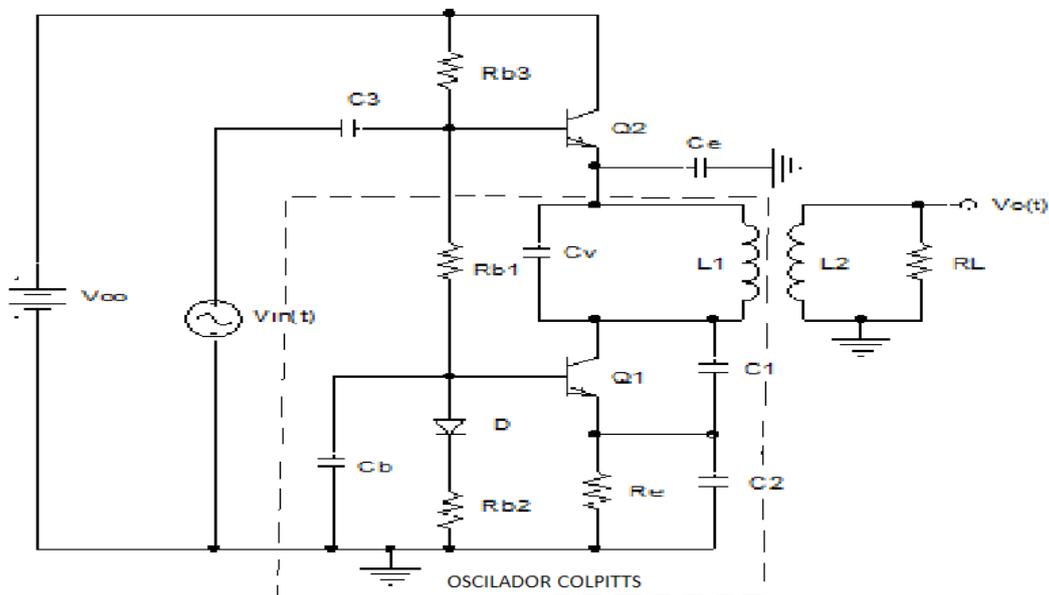
2.3.1 Modulador AM de Alto Nível

Um amplificador, quando excitado por um sinal de entrada sinusoidal muito elevado, restringe o sinal de saída causando distorção harmônica [8]. Se um circuito sintonizado muito seletivo, em torno da frequência do sinal de entrada for colocado na saída do amplificador, as harmônicas resultantes são filtradas e o sinal de saída é, praticamente, uma cópia do sinal de entrada. Como o sinal de saída do amplificador é limitado pela fonte de alimentação, então a amplitude do sinal da saída do filtro pode ser modulada através da variação da fonte de alimentação [8].

É possível utilizar este resultado para produzir um modulador AM, apenas alterando a tensão de alimentação de forma proporcional ao sinal modulador [8].

Visualize o circuito da Figura 3 [8]. O transistor Q1 pertence a um oscilador *Colpitts*, em base comum, alimentado pelo emissor de Q2. Quando polarizarmos Q2 para que a tensão no seu emissor fique $\frac{V_{CC}}{2}$, a amplitude do sinal no coletor de Q1 variará de zero a V_{CC} . Ao empregarmos a tensão AC $V_{in}(t)$ à base de Q2, a tensão no seu emissor ficará $\frac{V_{CC}}{2} + V_m(t)$. Em consequência, o sinal no coletor de Q1 irá variar de zero a $V_{CC} + 2 * V_{in}(t)$, aproximadamente. A análise detalhada do circuito da Figura 2 é apresentada no capítulo 6 da referência [8].

Figura 2 - Modulador AM de alto nível



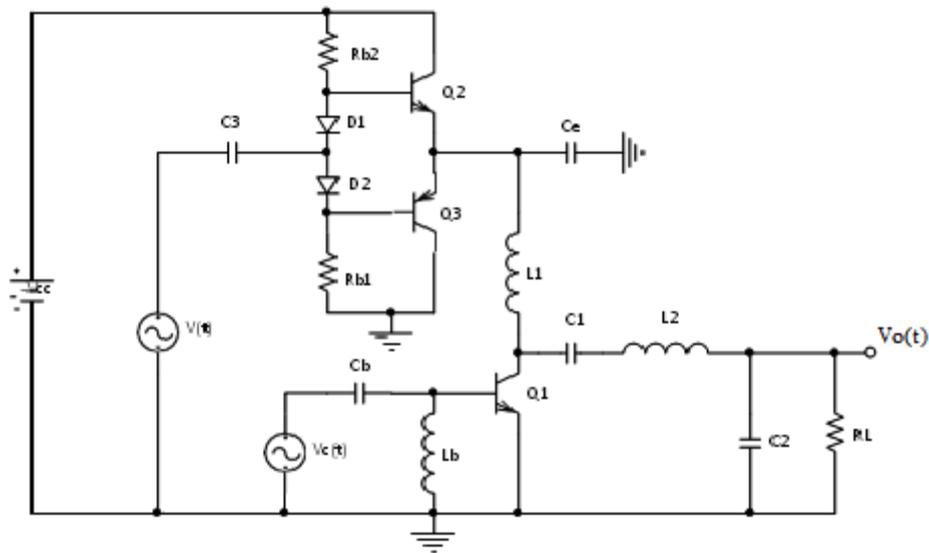
Fonte: Barúqui (2002)

2.3.2 Modulador AM de Alto Nível com Amplificador Classe C

Se almejarmos um sinal modulado em AM com alta potência como um transmissor, podemos fazer a modulação em um amplificador classe C [8]. Esses amplificadores têm a amplitude do sinal de saída gerada pela fonte de alimentação. A Figura 3 é um exemplo de modulador, no qual a carga sintonizada é uma rede de casamento de impedâncias [8].

A fonte de sinal $V(t)$ é responsável por modular a tensão de alimentação do amplificador classe C por meio do estágio de saída em push-pull, composto por Q2 e Q3, sendo indispensável por causa da alta potência fornecida ao amplificador [8]. Assim, a portadora é produzida pela fonte V_c [8].

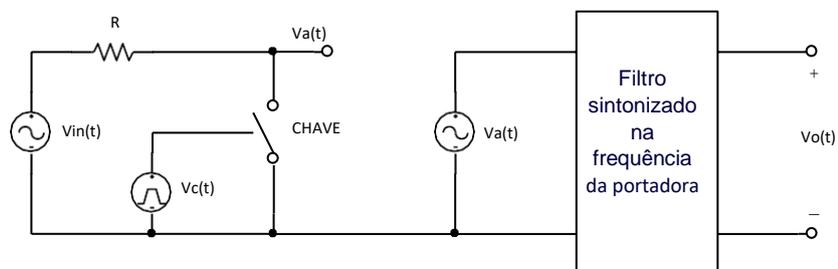
Figura 3 - Modulador AM com amplificador classe C.



Fonte: Barúqui (2002)

2.2.3 Modulador Chopper

O modulador chopper corresponde em multiplicar o sinal modulador $V_{in}(t)$ por uma onda quadrada de frequência ω_0 [8]. Depois dessa multiplicação, o sinal é filtrado por um amplificador ajustado, de acordo com a Figura 4. A operação de multiplicação é feita por uma chave analógica SW, que obstrui o sinal $V_{in}(t)$, controlada por uma onda quadrada $v_C(t)$ de frequência ω_0 , e amplitude V_C [8].

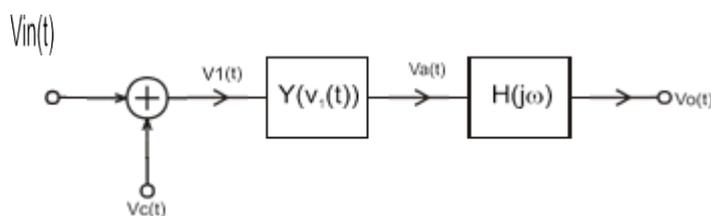
Figura 4 - Modulador *chopper*

Fonte: Barúqui (2002)

2.3.4 Modulação AM por Dispositivo Não Linear

A técnica serve para adicionar os sinais modulador $V_{in}(t)$ e de portadora $V_c(t)$ e entregá-los a um componente não linear [8]. Desta forma, obtemos um sinal $V_a(t)$ que é composto por uma série de termos, e dentre eles algumas multiplicações cruzadas $V_{in}(t) \times v_c(t)$. O sinal $V_a(t)$ é filtrado por um amplificador específico, harmonizado na frequência da portadora ω_0 , ocasionando em saída modulada em amplitude $V_0 = a * [1 + mf(t)]\cos(\omega_0 t)$, em que m é o índice de modulação. O Fluxograma do modulador da Figura 5 mostra o método de produção do sinal AM a partir de um dispositivo não linear [8].

Figura 5 - Fluxograma do modulador

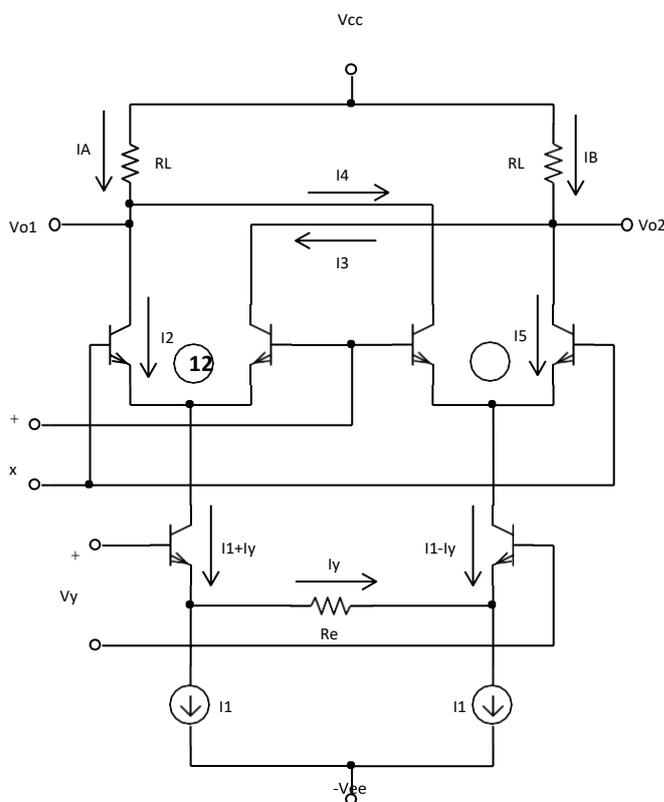


Fonte: Barúqui (2002)

2.3.5 Multiplicador Analógico - Célula de Gilbert

Os multiplicadores analógicos de quatro quadrantes são dispositivos bastante usados em modulação e demodulação de amplitude, circuitos de *mixers*, multiplicadores de frequência, detectores de fase, circuitos de processamento de sinais, etc [8]. Uma arquitetura bem habitual para montagem dos aparelhos citados é a célula de *Gilbert*. O circuito da Figura 6 é um exemplo de célula de *Gilbert*, usada em circuitos integrados. A célula é formada por dois amplificadores diferenciais, sendo que as correntes de polarização são influenciadas por um sinal externo. As correntes do circuito são apresentadas na Figura 6[8].

Figura 6 - Célula de Gilbert



Fonte: Barúqui(2002)

2.4 Osciladores

Um **oscilador** é um dispositivo eletrônico que gera um sinal periódico, usualmente uma onda senoidal ou uma onda quadrada, sem precisar de aplicação de um sinal externo [9].

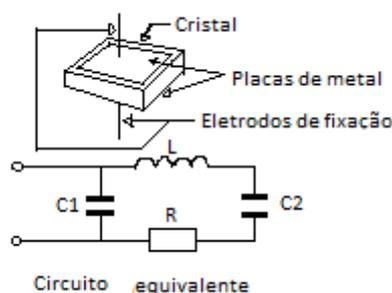
Um oscilador consiste em um circuito amplificador e uma malha de realimentação positiva, que leva a uma operação que acaba em oscilação. Para que o circuito oscilador funcione é necessário que duas situações (de Barkhausen) façam-se satisfeitas [9]:

1. O ganho de malha tem que ser levemente superior a 1.
2. O deslocamento total da fase do sinal no circuito tem que ser de 0 ou periódicos 2π radianos [9].

2.4.1 Oscilador a cristal

Um **oscilador a cristal** é um dispositivo eletrônico que usa a ressonância de um cristal piezoelétrico para gerar um sinal elétrico com uma frequência fixa. Sua frequência é frequentemente utilizada para avaliar exatamente o tempo, como em relógios de quartzo, assim como para consolidar frequências de transmissores de rádio. O cristal piezoelétrico mais usado é o de quartzo. Esse cristal comprime quando sujeito a uma tensão elétrica, e o tempo de compressão se altera com a construção do cristal. Quando a contração chega a um determinado ponto, o circuito libera a tensão e o cristal relaxa. Os tempos de compressão e descanso desse período geram a frequência de operação. Os osciladores a cristal são dispositivos de dois terminais, que usam um circuito efetivo, por exemplo um amplificador, conectado a um cristal piezoelétrico interno [8].

Figura 7 - Cristal e circuito equivalente



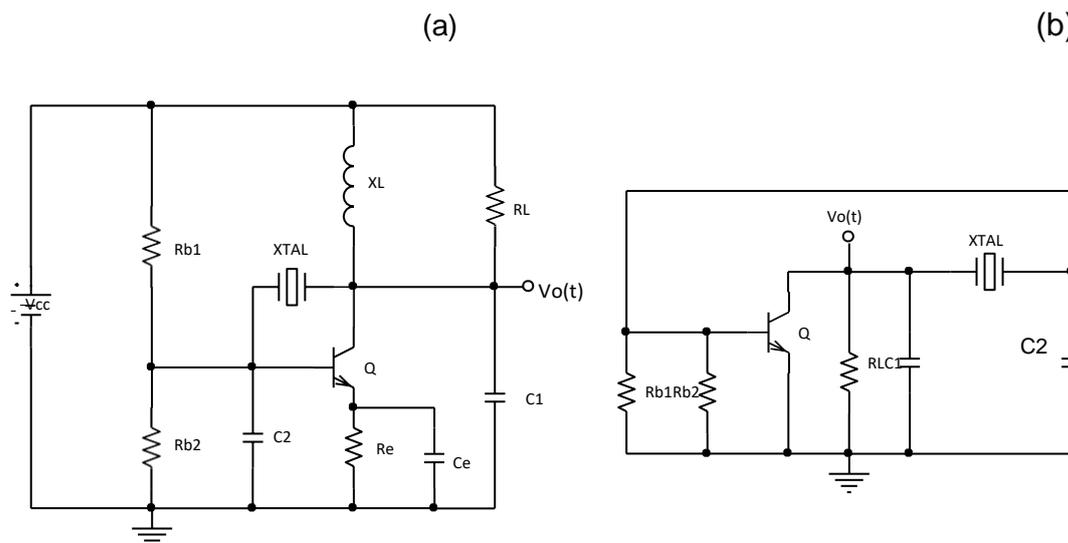
Fonte: Barúqui (2002)

2.4.2 Oscilador Colpitts a Cristal

O cristal tem reatância indutiva para todas as frequências no intervalo $[\omega_S, \omega_P]$, e a impedância equivalente se altera aproximadamente de zero a infinito, sendo ω_S a frequência ressonante série, e ω_P a frequência ressonante paralela. Se trocarmos o indutor do oscilador *Colpitts* pelo cristal, esta admitirá a sua função. A frequência de oscilação se encontrará entre ω_S e ω_P , que são bastante próximas [9].

O circuito da Figura 8 é um oscilador Colpitts a cristal, em emissor comum, chamado de oscilador Pierce. O Indutor X_L tem o objetivo de polarizar o transistor, porém opera como um elemento de altíssima impedância na frequência de oscilação [9].

Figura 8 - Oscilador Colpitts a cristal: a) circuito completo; b) modelo AC.



Fonte: Barúqui(2002)

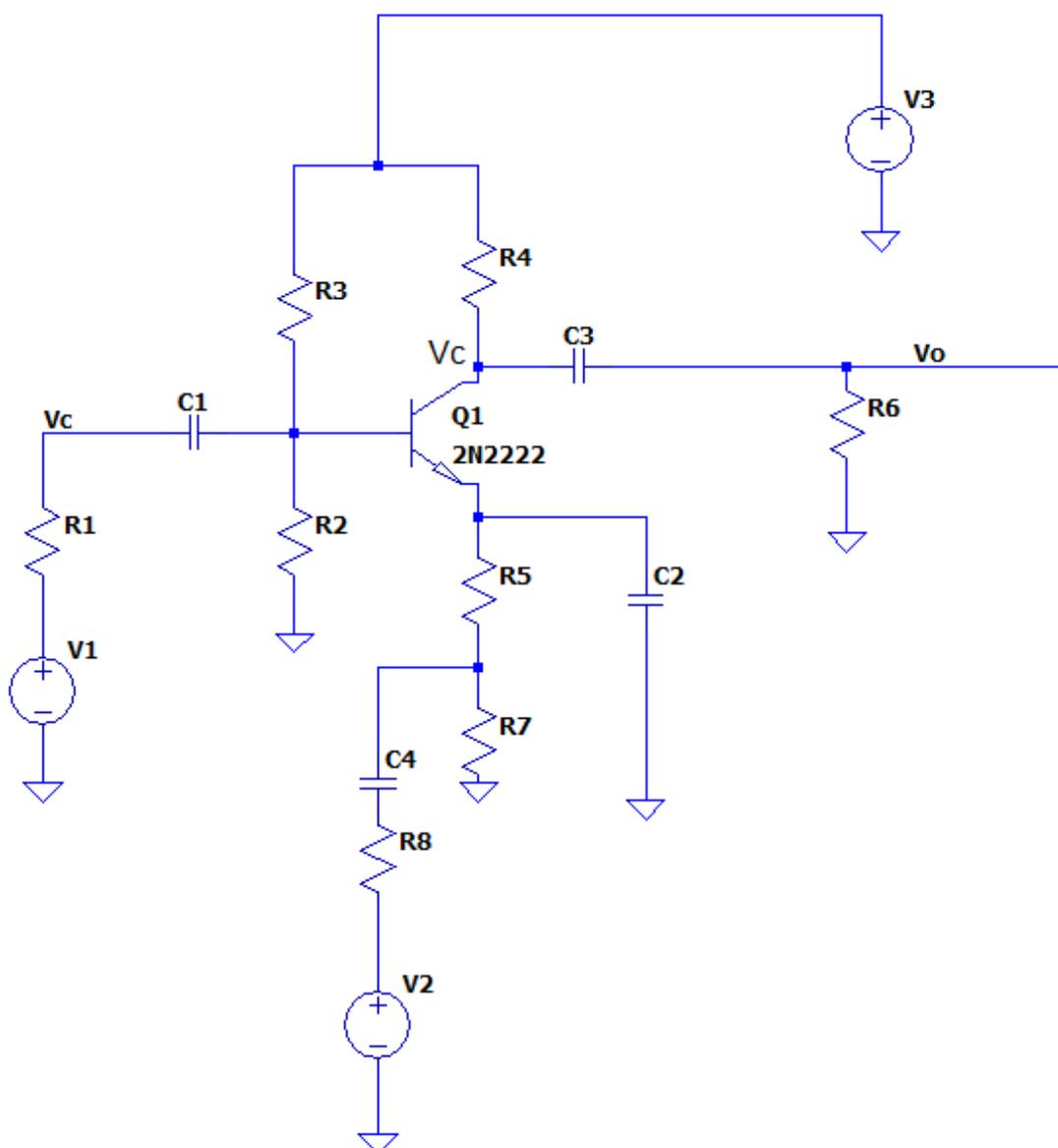
Com os circuitos apresentados é possível projetar um transmissor AM. Procurando-se um oscilador preciso para produzir o sinal de portadora, foi selecionado o oscilador a cristal de quartzo para gerar a oscilação almejada. O cristal de quartzo tem propriedades piezo elétricas que fazem este reaja de maneira mecânica por impulsos elétricos e vice-versa. Assim é possível que sua oscilação possa ser bastante precisa ao controlar suas propriedades geométricas no procedimento de lapidação. Também a maioria dos osciladores a cristal possuem um baixo consumo de potência [8].

O projeto do modulador foi realizado com um amplificador com ganho variável, de forma a amplificar o sinal da portadora em função do sinal a ser transmitido, produzindo uma saída que seja o sinal da portadora, com amplitude modulada pelo sinal de áudio [8].

O método selecionado para a modulação em amplitude foi o de um amplificador transistorizado com um BJT em emissor comum, empregando na entrada do amplificador o sinal de portadora e o sinal a ser transmitido no emissor, depois do resistor de degeneração [8].

3 Análise do Modulador

Figura 9 - Esquemático do Modulador



Fonte: Autor (2023)

O circuito do modulador é um amplificador em emissor comum com degeneração. O sinal da portadora, V1, é aplicado na entrada do amplificador. Por sua vez, o sinal modulador, V2, é aplicado ao resistor de degeneração, fazendo com que a corrente de coletor varie linearmente com a tensão V2.

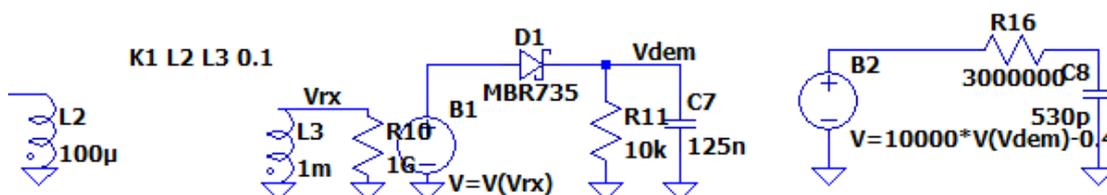
Como consequência, a transcondutância do BJT, que é proporcional à corrente de coletor, varia linearmente com o sinal modulador. Como o ganho deste amplificador é proporcional à transcondutância do BJT, a saída do amplificador contém o sinal de portadora modulado em amplitude, adicionado ao sinal modulador que é transferido à saída do amplificador com o ganho do amplificador em base comum. Para obter o sinal AM, um filtro passa-altas é inserido na saída, eliminando o sinal modulador de baixa frequência.

O projeto dos componentes do modulador é detalhado no APÊNDICE A.

O transistor selecionado foi o 2N2222, fabricado pela NXP Semiconductors, porque possui as propriedades apropriadas ao projeto do Modulador. Seu exemplar está disponível na biblioteca padrão do LTSpice e é um dispositivo muito comum e custo relativamente baixo.

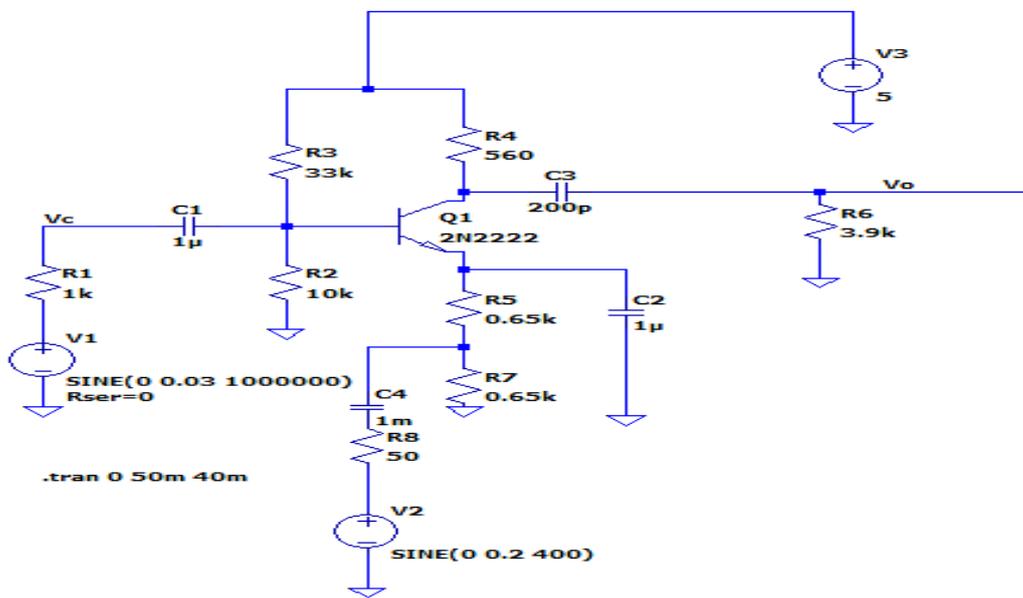
Selecionado o componente ativo, os outros componentes foram calculados para alcançar uma baixa corrente quiescente e modulação linear. Assim, foi possível modular de maneira adequada sinais na banda de áudio. Na Figura 11, é visto o circuito modulador projetado para uma portadora de 1 MHz. O sinal modulado é apresentado na Figura 12, onde o sinal modulador de 400 Hz se mostra como envoltória do sinal transmitido. Além disso, foi projetado um demodulador simples por detecção de envoltória, conforme a Figura 10, que acusou distorção harmônica de 5,55%, por simulação no LTSpice. A análise CA do modulador é apresentada no APÊNDICE B.

Figura 10 – Circuito demodulador



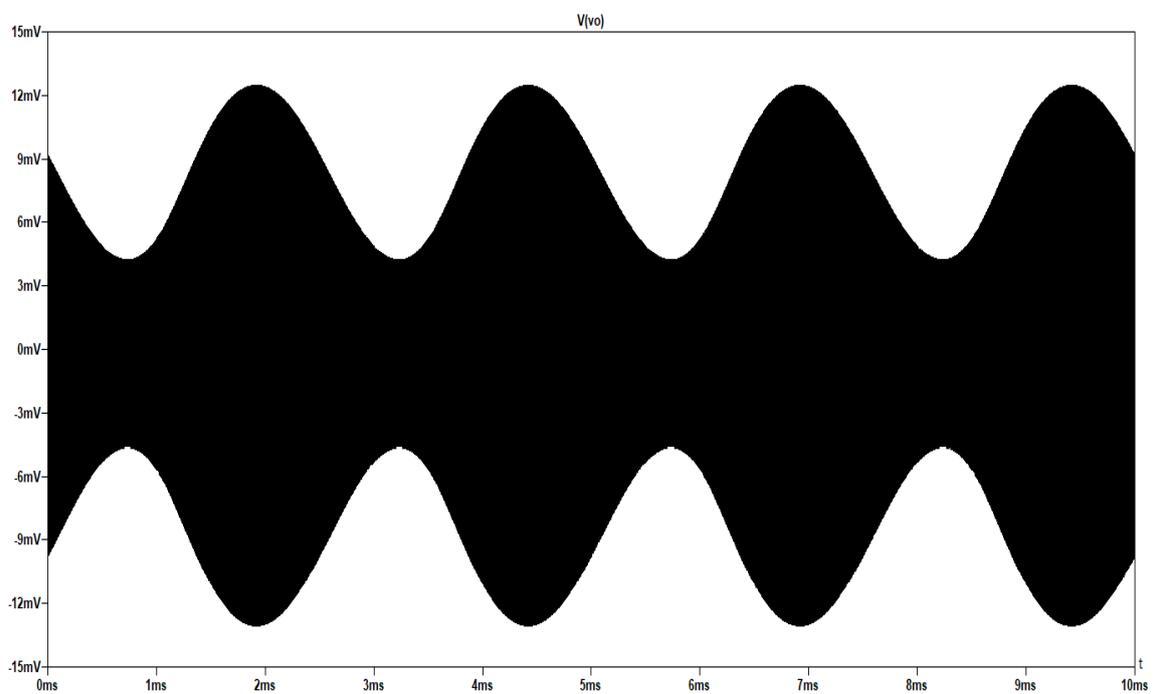
Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Esquemático para simulação



Fonte: Autor (2023)

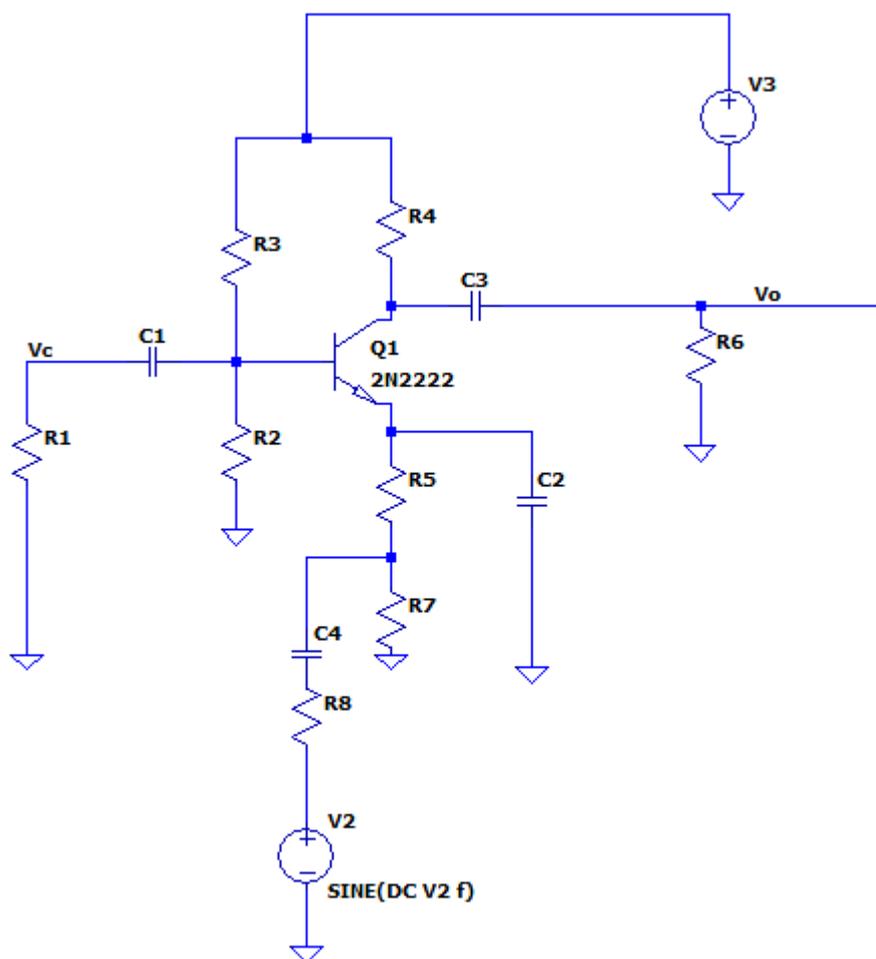
Figura 12 - Sinal Modulado, portadora de 1 MHz e sinal modulador de 400 Hz



Fonte: Autor (2023)

Para saber em quais faixas de amplitudes de V2 o circuito funcionaria como modulador AM e com pouca distorção foi feita uma varredura das amplitudes de V2 entre -1 a 1. Desligando a portadora é possível visualizar o comportamento da corrente no coletor em função de V2.

Figura 13 - Circuito com fonte V1 desligada

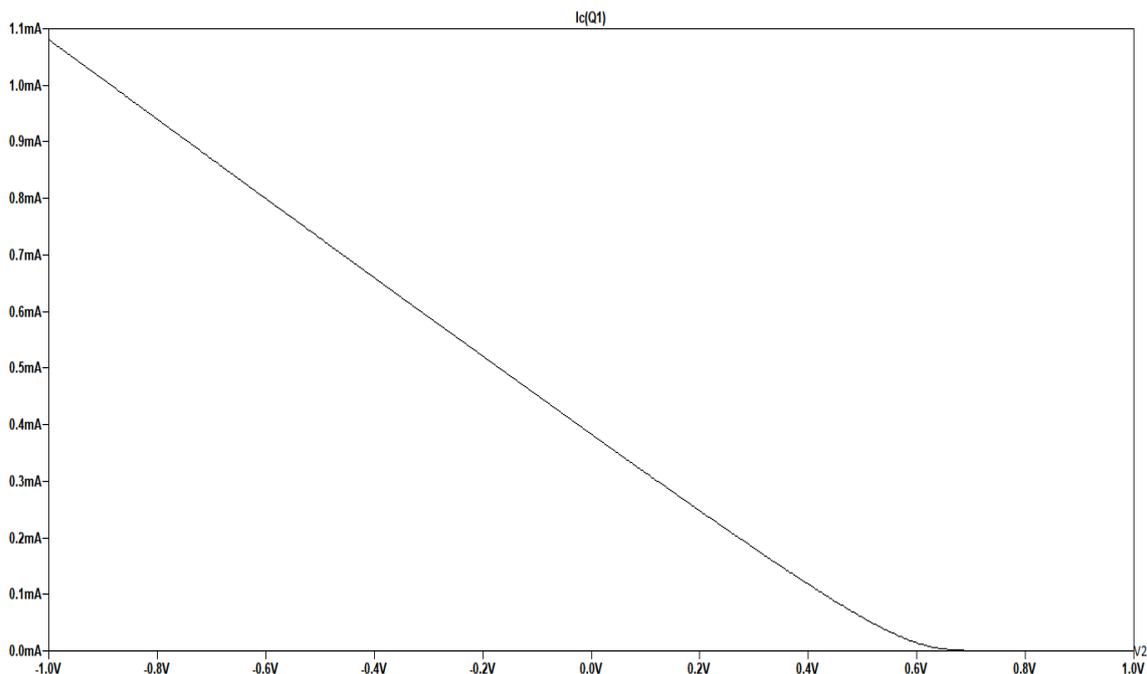


Fonte: Autor (2023)

Varredura de V2:

Fonte V2 de -1 a 1

Figura 14 - Varredura da Moduladora de -1 a 1 V



Fonte: Autor (2023)

No gráfico da Figura 14 observa-se que a corrente do coletor é função linear de V_2 entre -1 V a 0,6 V. Fora dessa faixa de valores de V_2 , a distorção do sinal AM é elevada. O objetivo de ter sido feita essa medida foi definir a amplitude do sinal modulador de forma a não introduzir distorção excessiva.

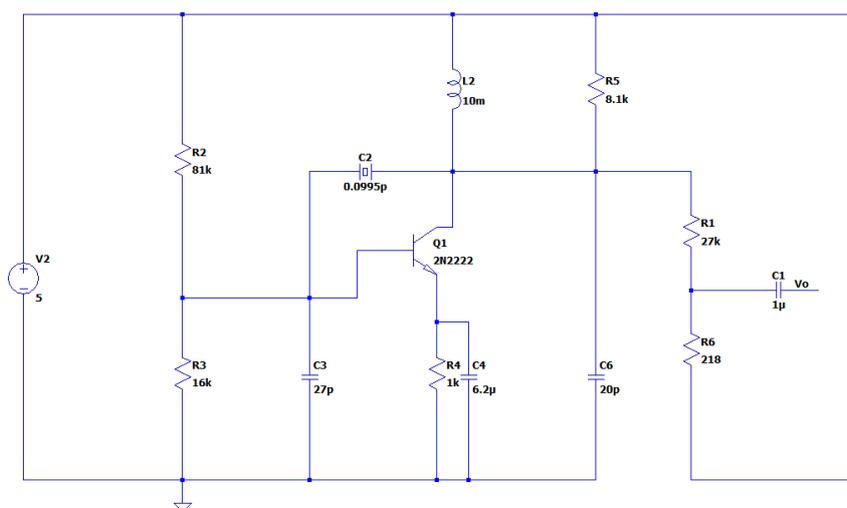
4 Análise do Oscilador

O bloco oscilador produz a onda portadora, na faixa de frequência das emissoras de rádio AM, isto é, de 530 kHz a 1600 kHz. Selecionamos 1 MHz para a frequência da portadora. Existem muitas maneiras de se projetar um oscilador como os osciladores Colpitts e Hartley, por meio de composições de inversores ou por de componentes eletromecânicos. Foi selecionado o oscilador a cristal de quartzo para gerar oscilação com frequência precisa.

O oscilador projetado é um Colpitts a cristal, que é um amplificador realimentado por meio do cristal de quartzo. O oscilador foi simulado no software LTSpice com o esquemático apresentado na Figura 15.

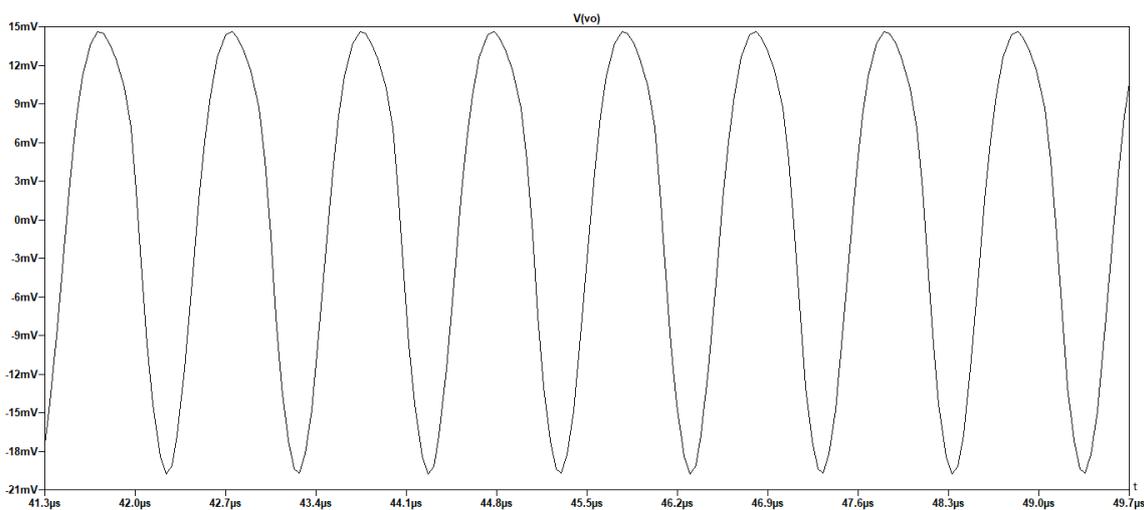
Com o circuito alcançamos uma saída oscilando a 1 MHz com tensão pico a pico da ordem de 9 V no coletor de Q1. Um divisor de tensão, constituído por R6 e R1, foi utilizado para reduzir o sinal a um nível adequado ao modulador. O sinal obtido na saída do divisor de tensão deve ser aproximadamente de 30 a 40 mV pico-a-pico.

Figura 15 - Esquemático do oscilador



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 – Sinal de saída do oscilador após o atenuador resistivo

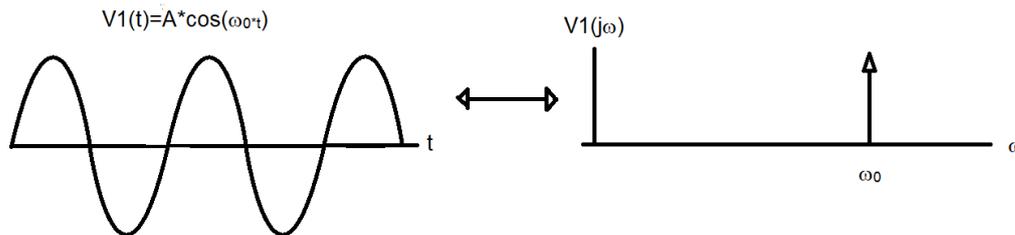


Fonte: Autor (2023)

O projeto do oscilador se encontra no APÊNDICE D.

A seguir temos o sinal V1 no domínio do tempo e da frequência.

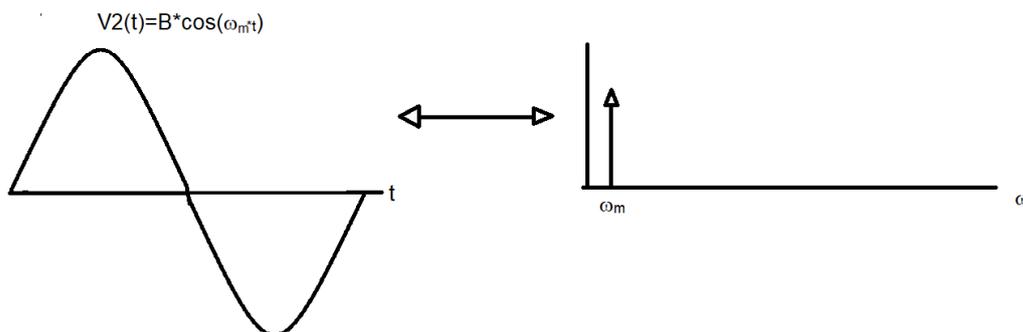
Figura 17 – Sinal da portadora no domínio do tempo e da frequência



Fonte: Autor (2023)

A seguir temos o sinal V2 no domínio do tempo e da frequência

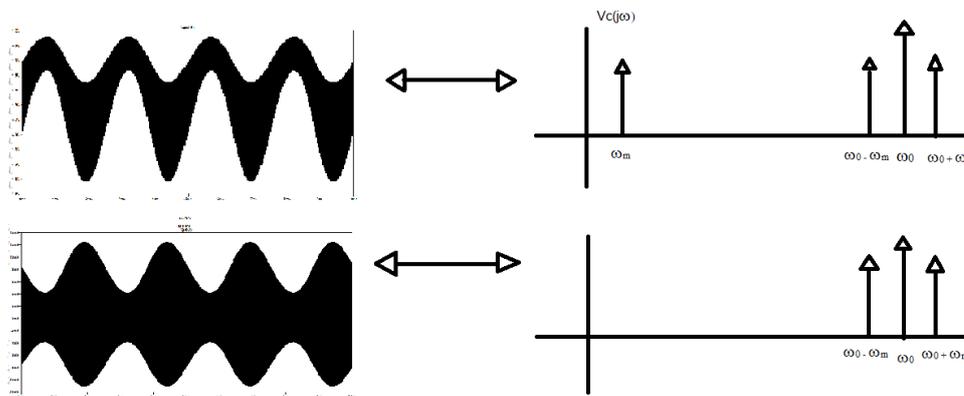
Figura 18 – Sinal da moduladora no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 19 vemos o sinal modulado antes e depois do filtro passa-altas.

Figura 19 - Sinal modulado antes e depois do filtro passa-altas, respectivamente



Fonte: Autor (2023)

5 BLOCO DE ENTRADA, ESTÁGIO DE SAÍDA E ANTENA

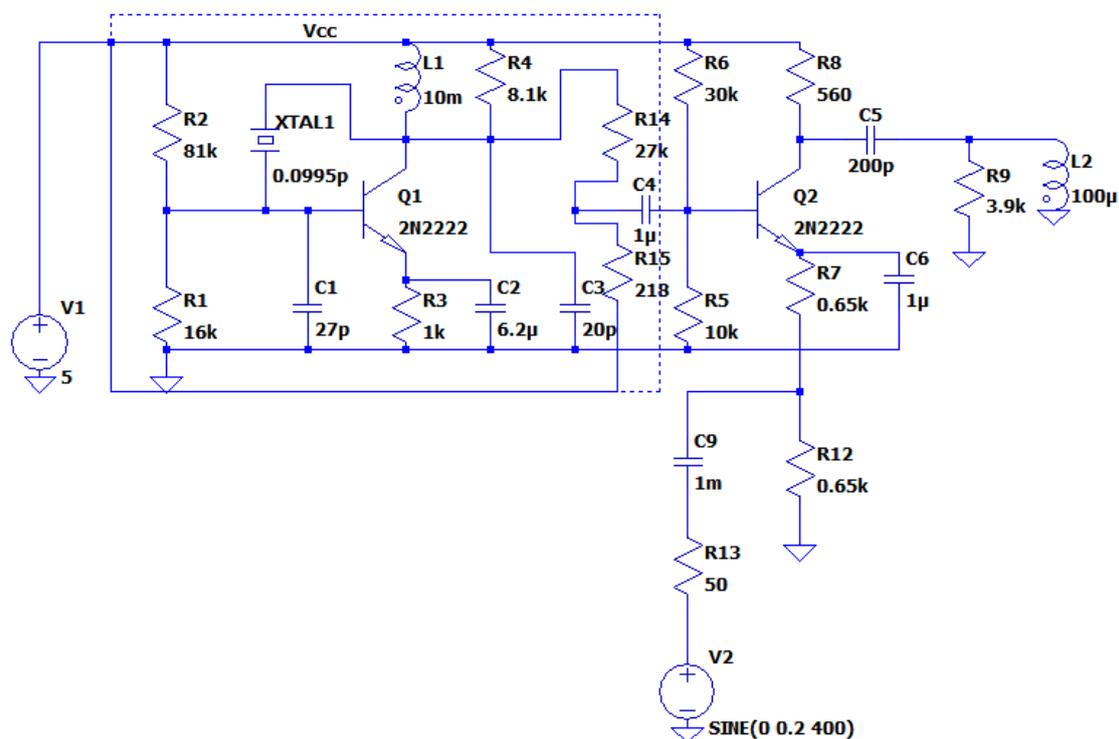
A saída de áudio do celular usualmente tem impedância na casa das dezenas de Ohms e amplitude em cerca de $2 V_{pp}$. Para manter o modulador na região linear, o sinal modulator não deve ultrapassar cerca de aproximadamente $0,6 V_{pp}$, como mostra a Figura 14. A consequência foi um sinal pouco assimétrico, com o lado positivo maior que o negativo, mas isso não comprometeria a interpretação e, assim, não foi julgado como um problema, conforme é visto na Figura 21.

Para simulação foi colocado um indutor de $100 \mu\text{H}$ após o filtro passa-altas como estágio de saída. O indutor tem a função de substituir a antena para efeito de simulação, por meio de acoplamento indutivo para transmitir o sinal para o demodulador.

6 INTERCONEXÃO

Na conexão dos blocos modulador e oscilador foi necessário um divisor de tensão para adequar o sinal de saída do oscilador à entrada do modulador e usar o acoplamento AC através de um capacitor de $1\mu\text{F}$.

Figura 20 – Circuito completo



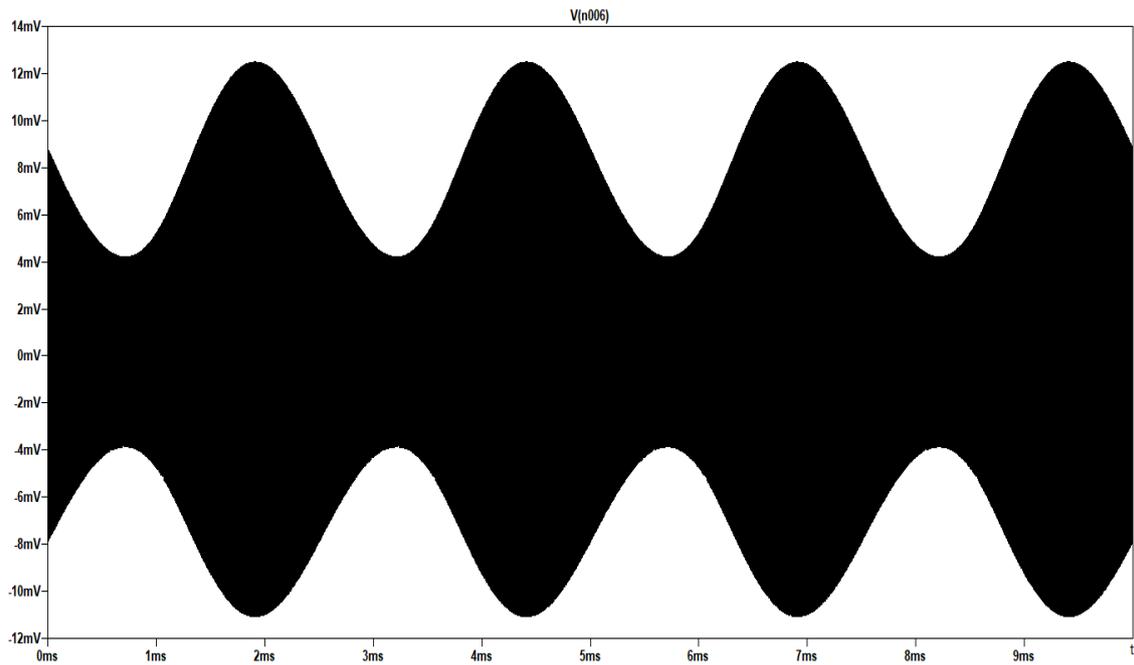
Fonte: Autor (2023)

7 RESULTADOS & COMPARAÇÃO TEÓRICA

O funcionamento do modulador foi verificado por meio de dois testes principais. O primeiro foi realizado para averiguar de maneira simples o desempenho do modulador.

Assim, foi empregada na entrada do sinal modulador uma senoide de 400 Hz e $0,2 \cdot V_{pp}$. O sinal modulado tem índice de modulação de 0,49.

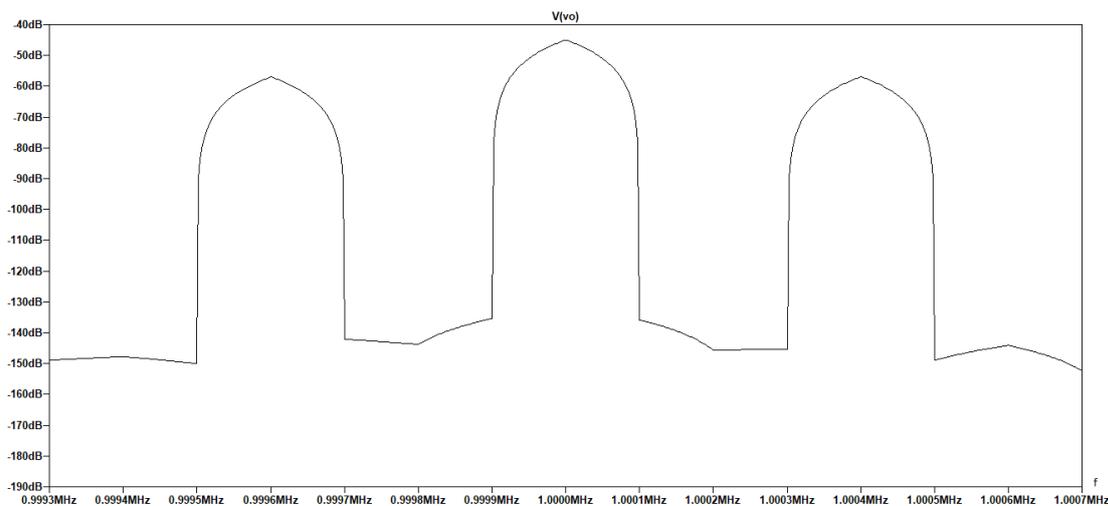
Figura 21 – Sinal modulado do circuito completo



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 22 podemos ver o espectro do sinal modulado, onde aparece a portadora em 1 MHz e os pulsos em ± 400 Hz.

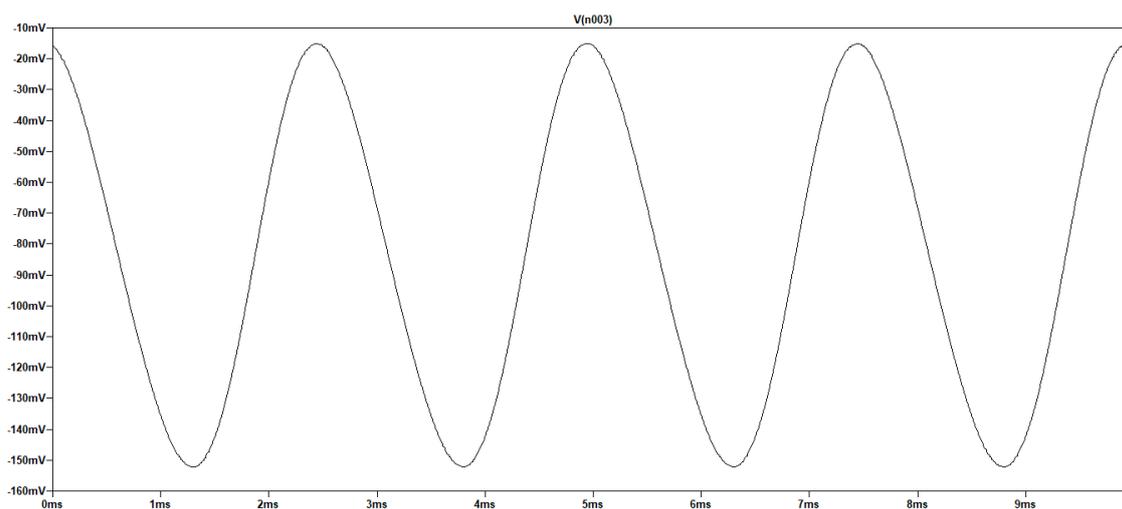
Figura 22 – Espectro do circuito completo



Fonte: Autor (2023)

Para determinar a distorção sofrida pelo sinal de áudio, o sinal AM foi demodulado por meio de um detector de envoltória. O sinal de saída apresentou distorção harmônica total de 6,83%:

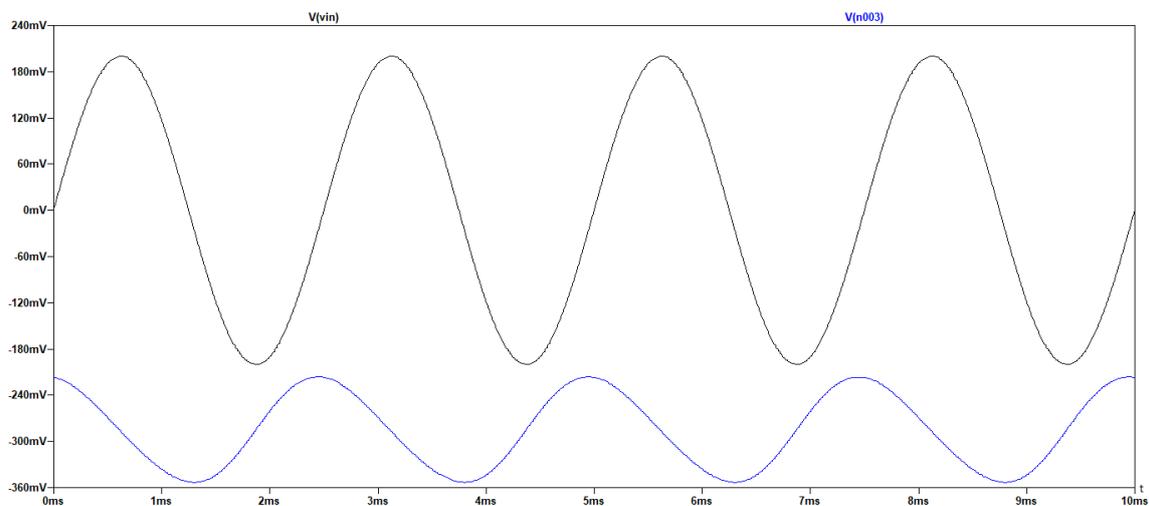
Figura 23 – Sinal demodulado



Fonte: Autor (2023)

A Figura 24 mostra a comparação do sinal modulante (em preto) com a do sinal demodulado (em azul). Observa-se que o sinal recuperado é muito próximo ao modulante.

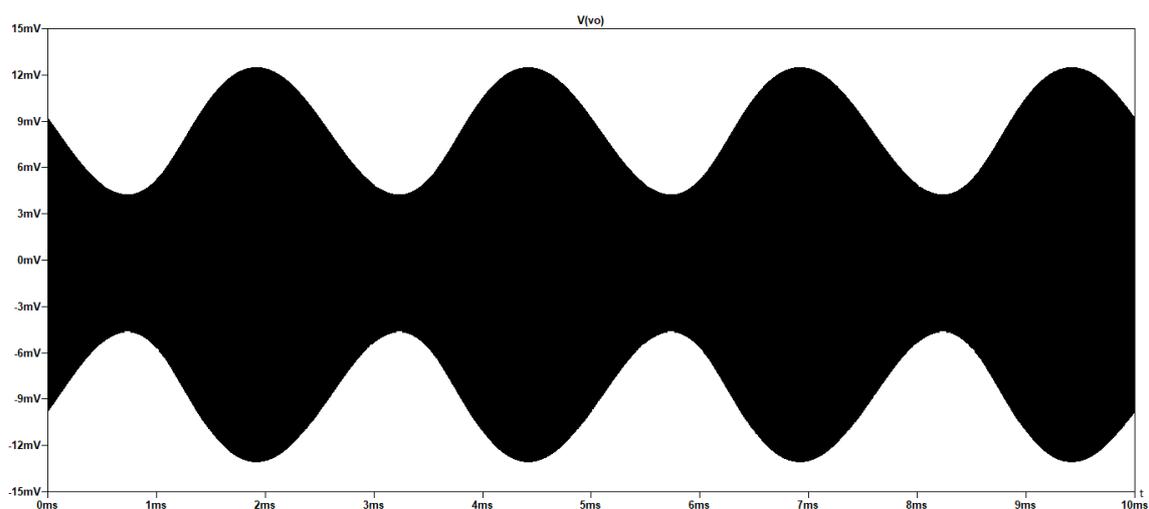
Figura 24 – Sinal transmitido (preto) x Sinal demodulado (azul)



Fonte: Autor (2023)

Também foi realizada uma simulação pensando uma modulação AM ideal por meio de fontes ideais, assim, chegou-se em resultados bastante próximos aos alcançados por meio do circuito projetado, confirmando a simplicidade e eficácia do projeto. A simulação do circuito da Figura 11 é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Sinal modulado de uma modulação AM por meio de fontes de tensão ideais

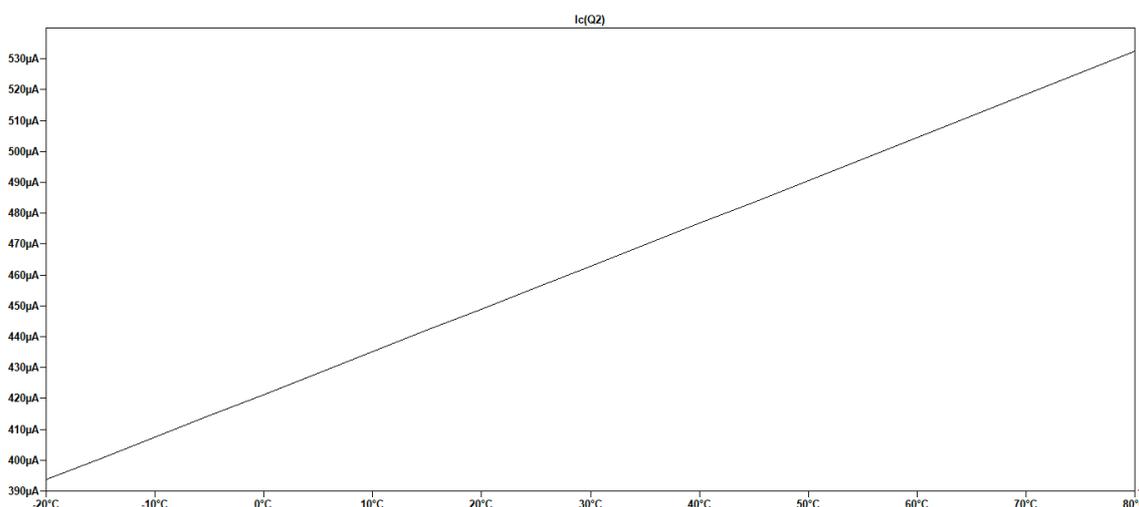


Fonte: Autor (2023)

Já às faixas de temperatura de operação estão entre -10° a 40° , foi analisado por meio da simulação com entrada de 400 Hz. Observou-se que o circuito funcionava de maneira adequada. Isso ocorre devido ao projeto dos módulos principais que experimentaram minimizar as propriedades intrínsecas dos transistores que sofrem mais com a variação de temperatura. Também pensando em uma variação na tensão de alimentação entre 3,25 V e 6,25 V ($\pm 25\%$), ocorre uma variação linear da amplitude da saída em função dessa alimentação, como se acreditava.

Na Figura 26 é apresentada a corrente do coletor em função da temperatura, onde a corrente do coletor varia de forma linear na faixa de -20° a 80° .

Figura 26 – Faixa de operação do modulador em função da temperatura



Fonte: Autor (2023)

Sobre o consumo:

P = Potência do sinal transmitido

V_m = Tensão do sinal modulante

a = Amplitude da portadora

$$P = \frac{V_m^2}{4} + \frac{a^2}{2} \quad (1)$$

Sendo a potência do sinal transmitido normalizada por um resistor de 1 Ω .

$$P = 0,039 \text{ mW}$$

η = Eficiência da modulação AM

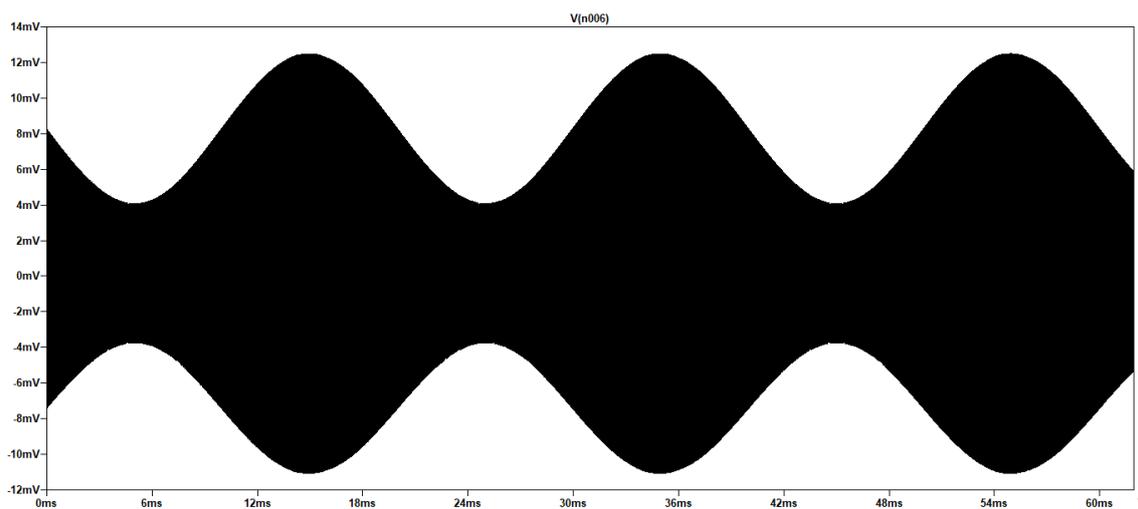
$$\eta = \left(\frac{\frac{V_m^2}{2}}{\frac{V_m^2}{2} + a^2} \right) * 100\% \quad (2)$$

$$\eta = 10,79 \%$$

A voz humana emite sinais na faixa de frequências de 50 a 3400 Hz. Simulações foram feitas para saber se o circuito tem comportamento adequado para modular sinais de voz.

- Para 50 Hz

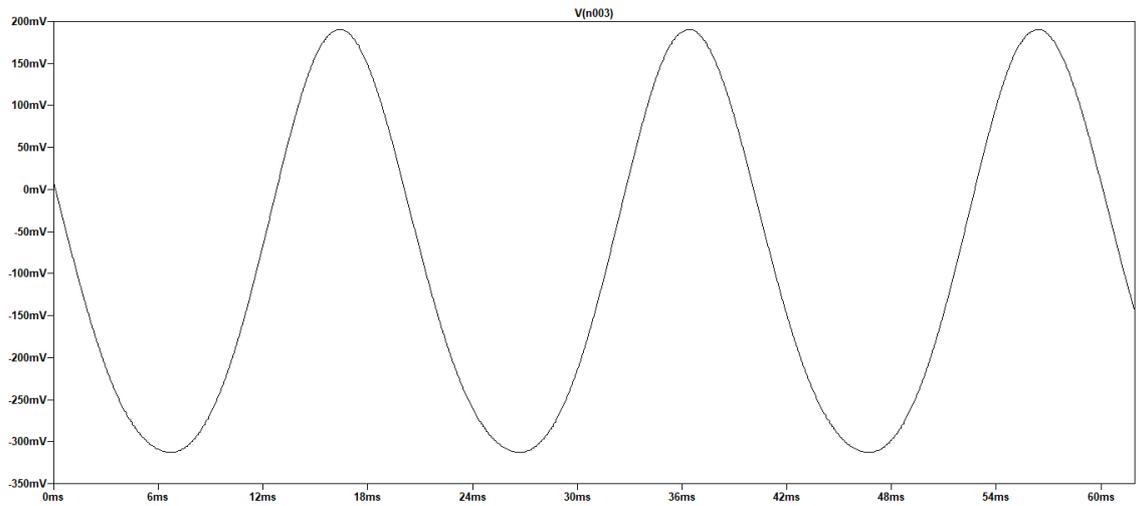
Figura 27 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 50 Hz



Fonte: Autor (2023)

$$\text{THD} = 9,34\%$$

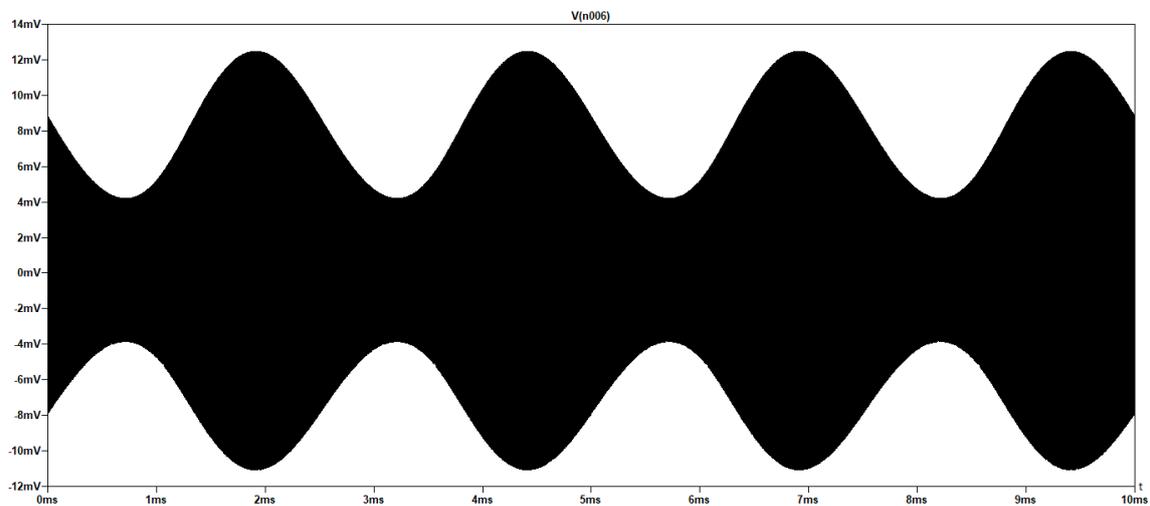
Figura 28 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 50 Hz



Fonte: Autor (2023)

- Para 400 Hz

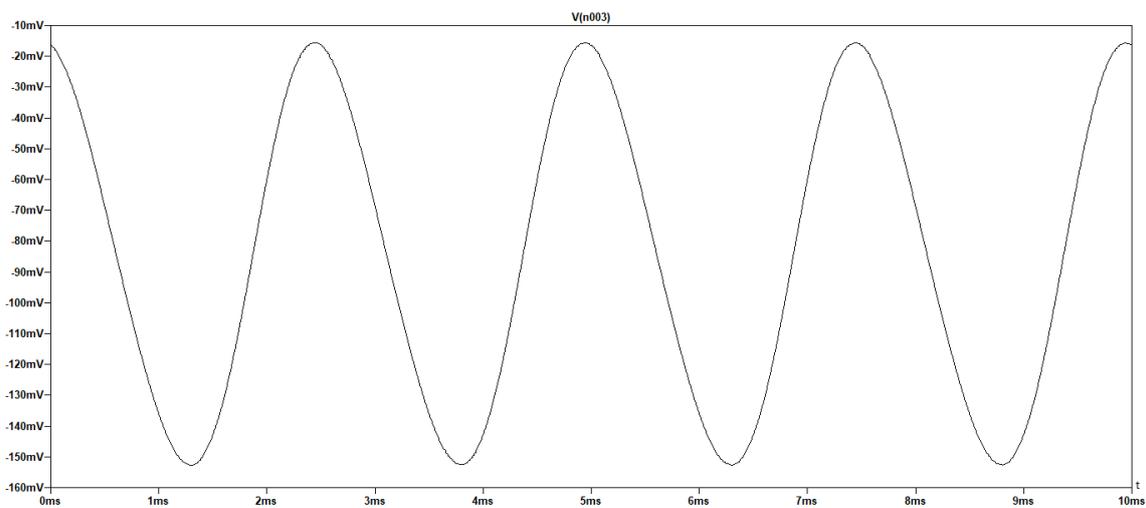
Figura 29 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 400 Hz



Fonte: Autor (2023)

THD=6,84%

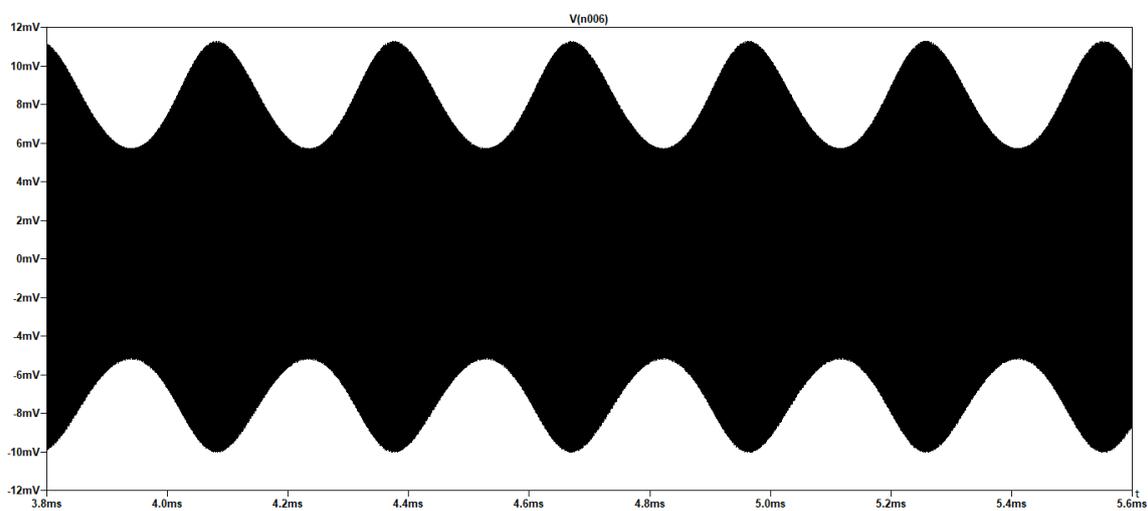
Figura 30 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 400 Hz



Fonte: Autor (2023)

- Para 3400 Hz

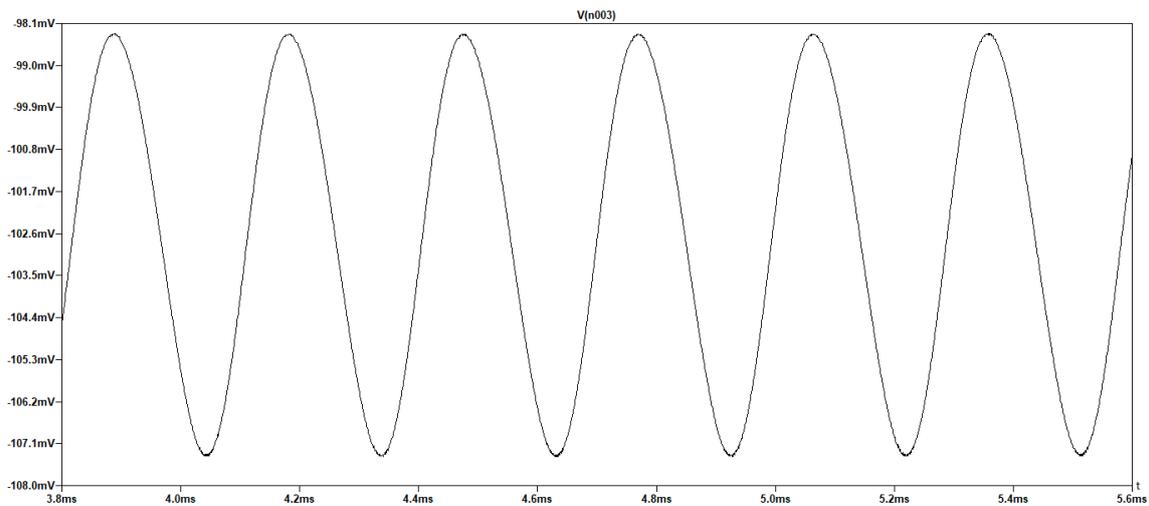
Figura 31 – Sinal modulado com frequência do sinal modulante em 3400 Hz



Fonte: Autor (2023)

THD = 5,22%

Figura 32 – Sinal demodulado com frequência do sinal modulante em 3400 Hz



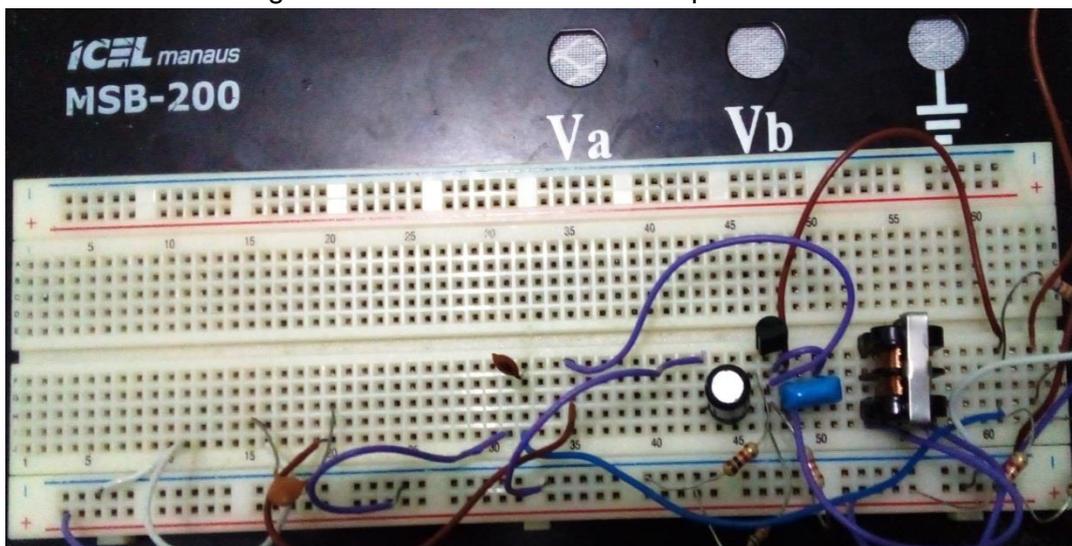
Fonte: Autor (2023)

8 Resultados da Protoboard

Montagem:

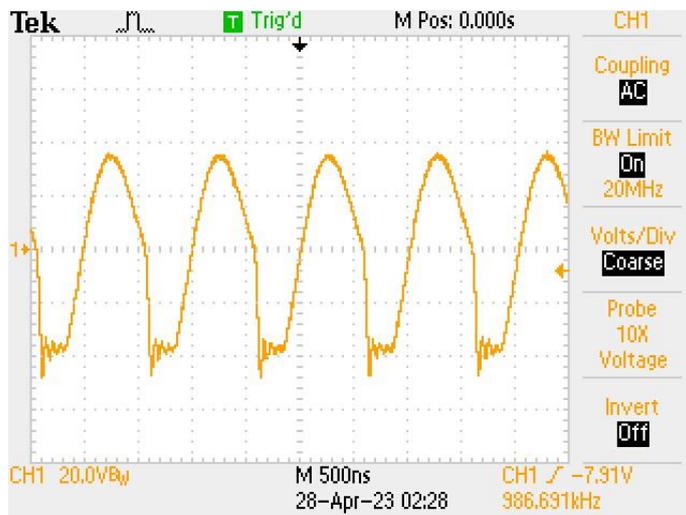
Primeiramente montou-se o oscilador em protoboard conforme mostrado no sinal na Figura 34.

Figura 33 - Oscilador montado na protoboard.



Fonte: Autor (2023)

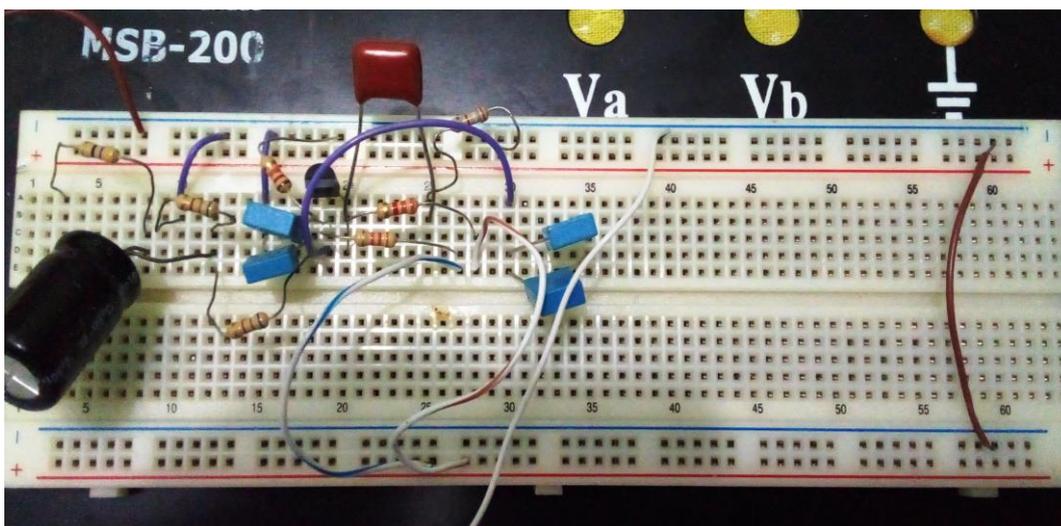
Figura 34 – Sinal de saída do oscilador



Fonte: Autor (2023)

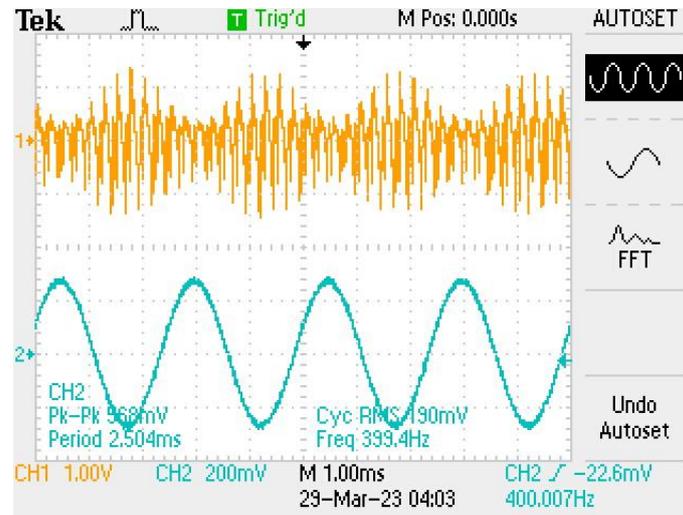
Foi feita a montagem do modulador em protoboard, conforme a Figura 35, com uma bancada de fonte DC de 5V, um osciloscópio, um gerador de funções com frequência em 1 MHz e um outro gerador com frequência de 400 Hz. O sinal obtido na saída do modulador é mostrado na Figura 36.

Figura 35 - Modulador montado na protoboard



Fonte: Autor (2023)

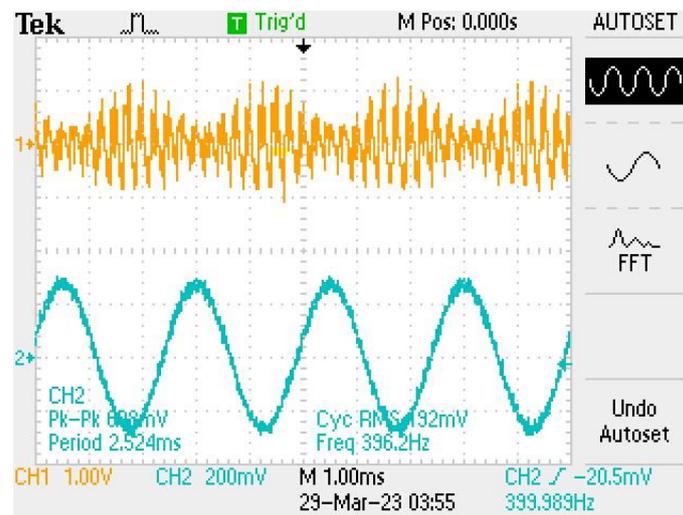
Figura 36 – Sinal modulado ligado ao gerador de funções de 1 MHz



Fonte: Autor (2023)

37. Depois se ligou o oscilador ao modulador e chegou-se no sinal da Figura

Figura 37 – Sinal modulado



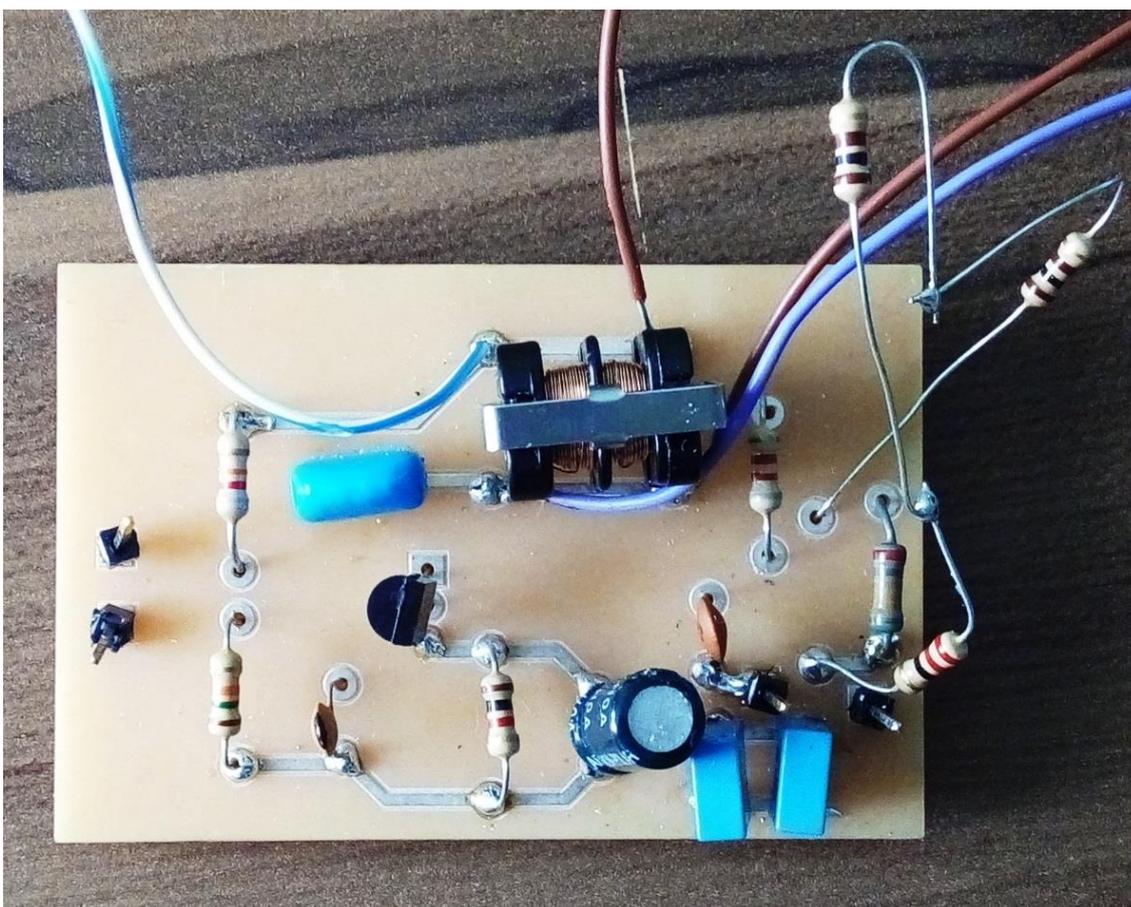
Fonte: Autor (2023)

9 Circuitos Montados em Placa de Circuito Impresso

Foram usados capacitores cerâmicos, de tântalo e alumínio. O cristal de 1 MHz foi substituído por um ressonador cerâmico devido a pouca oferta de cristais de quartzo no Brasil e ao seu alto custo. A Tabela 1 de componentes se encontra no APÊNDICE E.

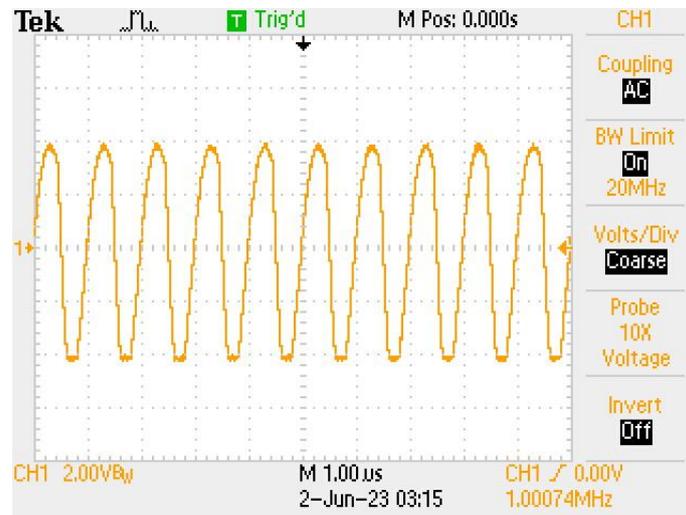
A seguir são mostradas as imagens das PCBs do modulador e do oscilador. O sinal de saída do oscilador antes do divisor de tensão é apresentado na Figura 39, onde consegue-se observar a frequência de 1 MHz no osciloscópio.

Figura 38 – Oscilador na placa de circuito impresso



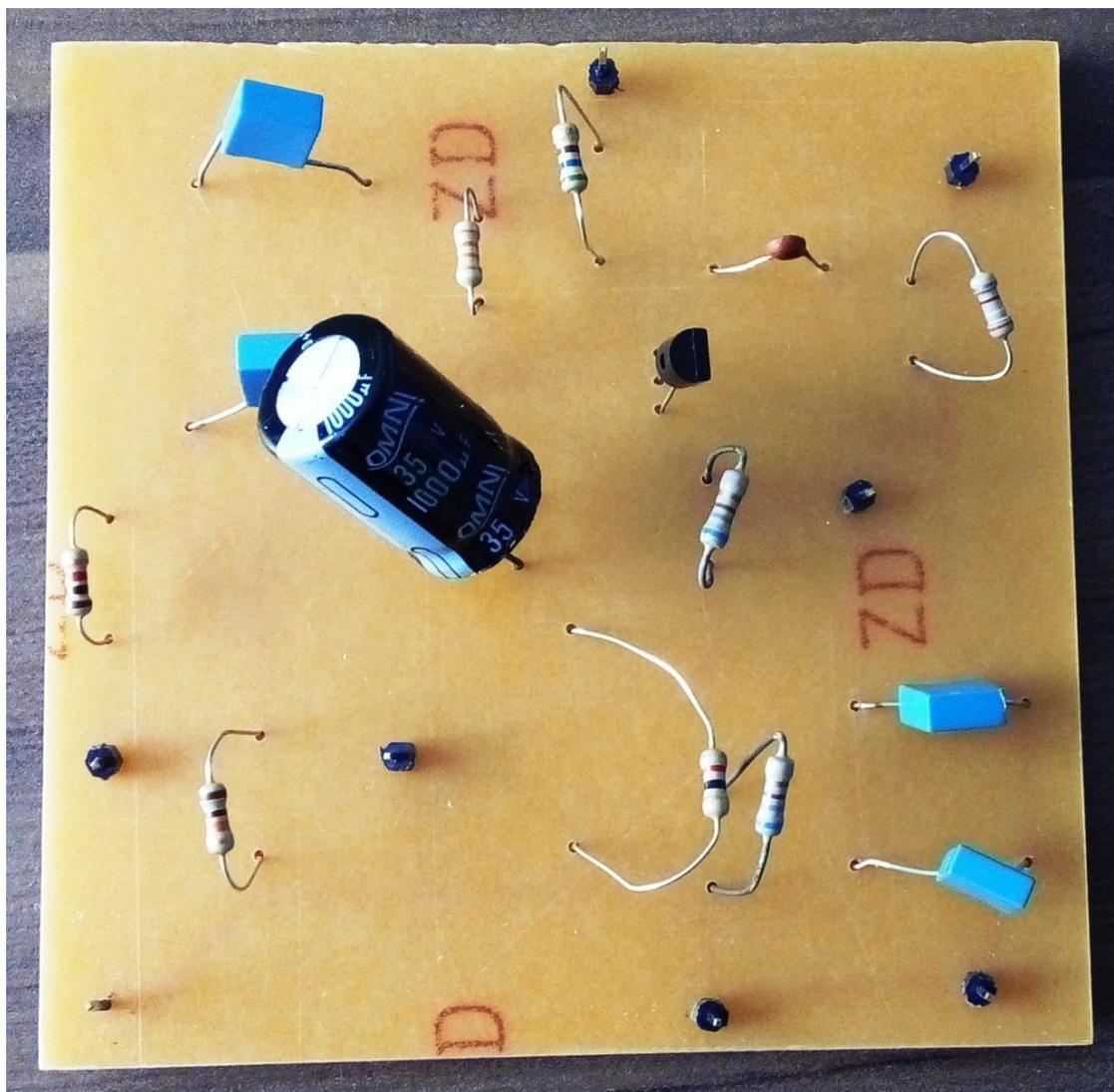
Fonte: Autor (2023)

Figura 39 – Sinal de saída do oscilador na placa de circuito impresso



Fonte: Autor (2023)

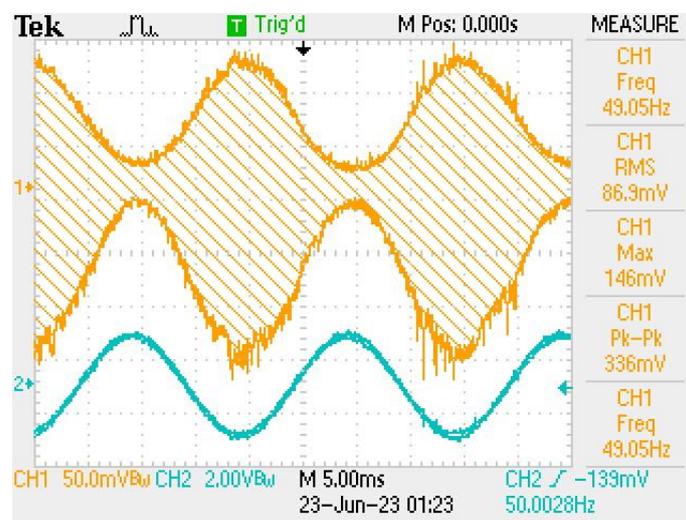
Figura 40 – Modulador na placa de circuito impresso



Fonte: Autor (2023)

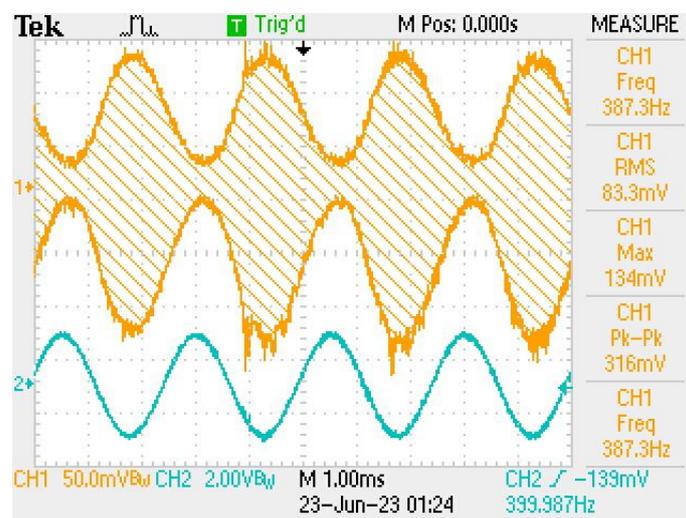
Nas Figuras 41, 42 e 43 serão apresentados os sinais modulados, do modulador ligado ao gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 50, 400 e 3400 Hz na placa de circuito impresso.

Figura 41 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 50 Hz



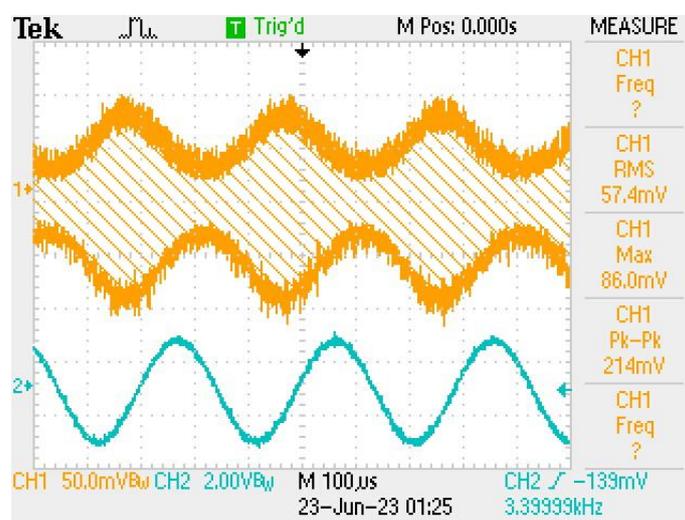
Fonte: Autor (2023)

Figura 42 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 400 Hz



Fonte: Autor (2023)

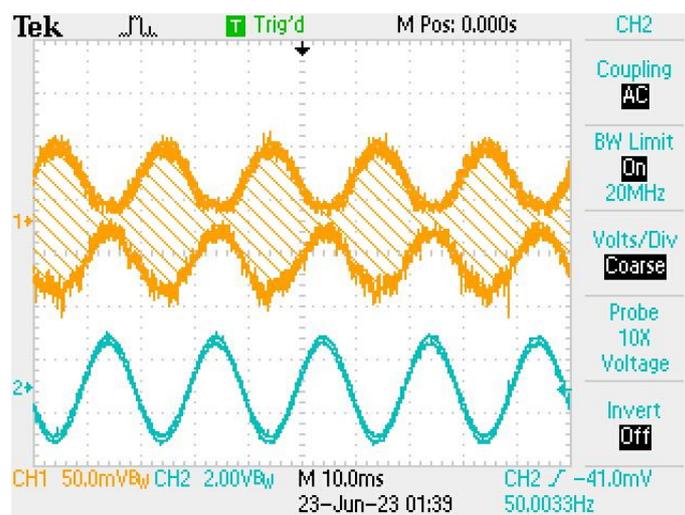
Figura 43 - Sinal modulado com gerador de funções e com frequência do sinal modulante em 3400 Hz



Fonte: Autor (2023)

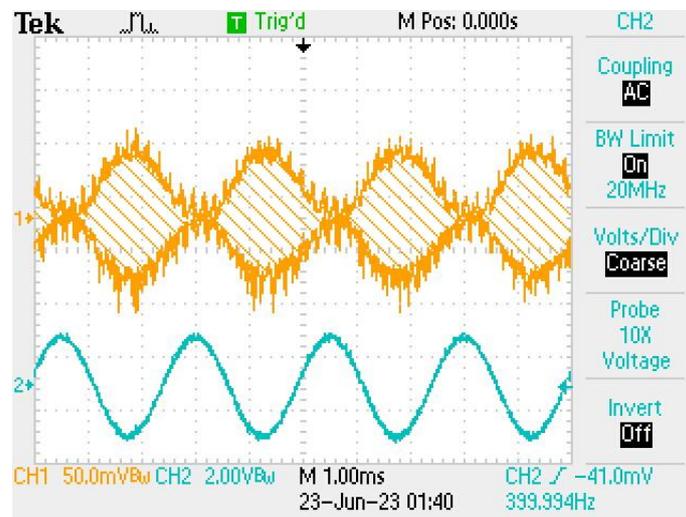
Nas seguintes figuras serão apresentados os sinais modulados, do modulador ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 50, 400 e 3400 Hz na placa de circuito impresso.

Figura 44 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 50 Hz



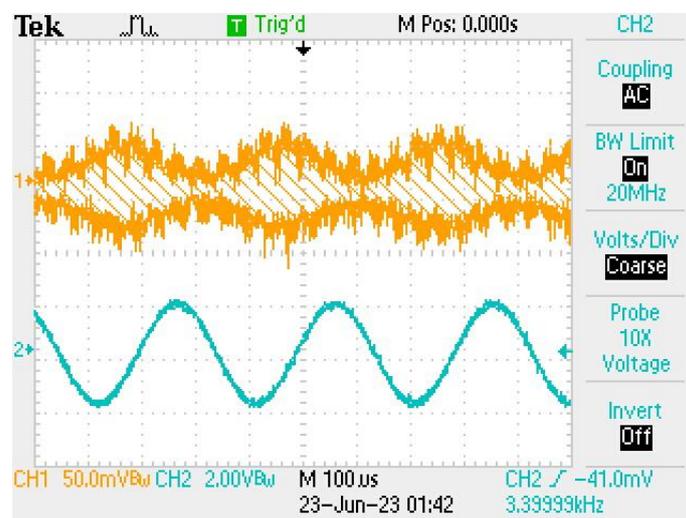
Fonte: Autor (2023)

Figura 45 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 400 Hz



Fonte: Autor (2023)

Figura 46 - Sinal modulado ligado ao oscilador e com frequência do sinal modulante em 3400 Hz



Fonte: Autor (2023)

10 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo desenvolver um transmissor de rádio AM para telefone celular. A motivação para seleção deste projeto é possibilitar o uso de aparelhos de rádio em automóveis mais antigos para transmitir sinais de áudio produzidos por telefones celulares.

Vários aparelhos de rádio de automóveis mais antigos não têm entradas de mídia moderna, mas somente a entrada de CD. Este projeto é o de um radiotransmissor que tem por objetivo transmitir o sinal de áudio de um telefone celular (pela saída de áudio) modulado em amplitude com portadora de 1 MHz para o receptor (rádio antigo). Logo, é possível usar um rádio antigo desses aparelhos como um rádio moderno com entrada de mídia para celulares. Para o celular é como se mesmo estivesse conectado a um fone de ouvido (por meio do Jack de áudio) e para o carro seria como se estivesse conectado a uma rádio AM convencional.

As etapas do transmissor envolveram as análises e simulações do oscilador e do modulador. O circuito do transmissor foi montado em protoboard e em placa de circuito impresso para testes de laboratório. O sinal AM foi testado para as faixas de áudio do sinal de voz e apresentou boa resposta com pouca distorção.

10.1 Trabalhos Futuros

As sugestões de trabalhos futuros seriam projetar um estágio de entrada para o sinal modulante, um amplificador de potência para o sinal AM, antena de transmissão e um modulador AM com alimentação de 12 V.

REFERÊNCIAS

- [1] https://www.mundodaradio.info/historia/radio_da_galena_ao_transistor.html
- [2] <https://soundcloud.com/abertbr>
- [3] http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/pcom/pcom_aula04_08.pdf
- [4] <https://embarcados.com.br/aprenda-sobre-modulacao-am/>
- [5] <https://web.archive.org/web/20110824042541/http://www.eps.ufsc.br/disserta96/tafner/cap4/cap4.htm#>
- [6] <http://www.wjrteleco.jdbte.com.br>
- [7] <https://rota61.webnode.com.br/historia-do-radio-amador/>
- [8] http://www.pads.ufrj.br/~fbaruqui/Arquivos/Apostila_EletIV.pdf
- [9] [P. Horowitz, W. Hill. A Arte da Eletrônica. Porto Alegre, Bookman](#)
[Barúqui Fernando Antônio Pinto , “Eletrônica IV”, apostila.](#)
- [10] https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7643337/mod_resource/content/1/Modulacao_AM_uv.pdf
- [11] https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/0/00/Mod_AM_aula2.pdf
- [12] <https://www.uece.br/biblioteca/wp-content/uploads/sites/27/2020/03/GUIA-UECE-2020-FINAL.pdf>
- [13] B. Lathi. Sinais e Sistemas Lineares. Brookman, 2006.
- [14] AZADMEHR Mehdi, Igor Paprotny, and Luca Marchetti. 100 Years of Colpitts Oscillators: Ontology Review of Common Oscillator Circuit Topologies. IEEE CIRCUITS AND SYSTEMS MAGAZINE, p.8 – 27, novembro, 2020.
- [15] http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/analise/analise_aula09.pdf
- [16] https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/Modula%C3%A7%C3%A3o_AM_-_t%C3%A9cnico
- [17] <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/95753/000914782.pdf?sequence=1>
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=6nlzJ5uWBSk>
- [19] <https://www.gov.br/mcom/pt-br/noticias/2021/setembro/radio-no-brasil-a-modernizacao-das-transmissoes>

APÊNDICE A – Projeto do Modulador

Considerações:

i) Os valores dos componentes serão aproximados para o valor comercial mais próximo do calculado.

A seguir apresentaremos os cálculos dos componentes do modulador para seu funcionamento.

ii) Características do transistor: O valor do V_{BE} é estimado a partir do datasheet em função da corrente de polarização (0,45mA).

$$\begin{aligned} V_{BE} &= 650 \text{ mV} \\ I_C &= 0,45 \text{ mA} \\ \beta &= 200 \end{aligned}$$

iii) Condições extras:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= 5 \text{ V} \\ G &= 10 \text{ (ganho DC)} \end{aligned}$$

Cálculos:

$$\boxed{C_{in} = C_E = 1 \mu\text{F}} \rightarrow Z_{C_{in}} = Z_{C_E} = \frac{1,6}{10} = 0,16 \Omega \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{R_{B1}} &= I_{BASE} + I_{R_{B2}} \\ \frac{5 - V_{BASE}}{R_{B1}} &= \frac{0,45 \cdot 10^{-3}}{200} + \frac{V_{BASE}}{R_{B2}} \rightarrow \begin{cases} R_{B1} = 33 \text{ k}\Omega \\ R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Para calcular os resistores se considera V_{BASE} como:

$$V_{BASE} = 1150 \text{ mV}$$

$$V_{BE} = V_{BASE} - V_{EMISSOR} \quad (5)$$

$$0,65 = 1150 - V_{EMISSOR}$$

$$V_{EMISSOR} = 518 \text{ mV}$$

$$R_E = \frac{518 \cdot 10^{-3}}{0,45 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{1}{200}\right)} = 1145 \Omega \quad (6)$$

$$\boxed{R_E = 1300 \Omega}$$

$$G = -\frac{R_C I_C}{\Phi_T} \quad (7)$$

$$R_C = \frac{10 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{0,45 \cdot 10^{-3}} = 555,56 \Omega$$

$$\boxed{R_C = 560 \Omega}$$

Sendo $f_c = 200\text{kHz}$ a frequência de corte do filtro passa-altas.

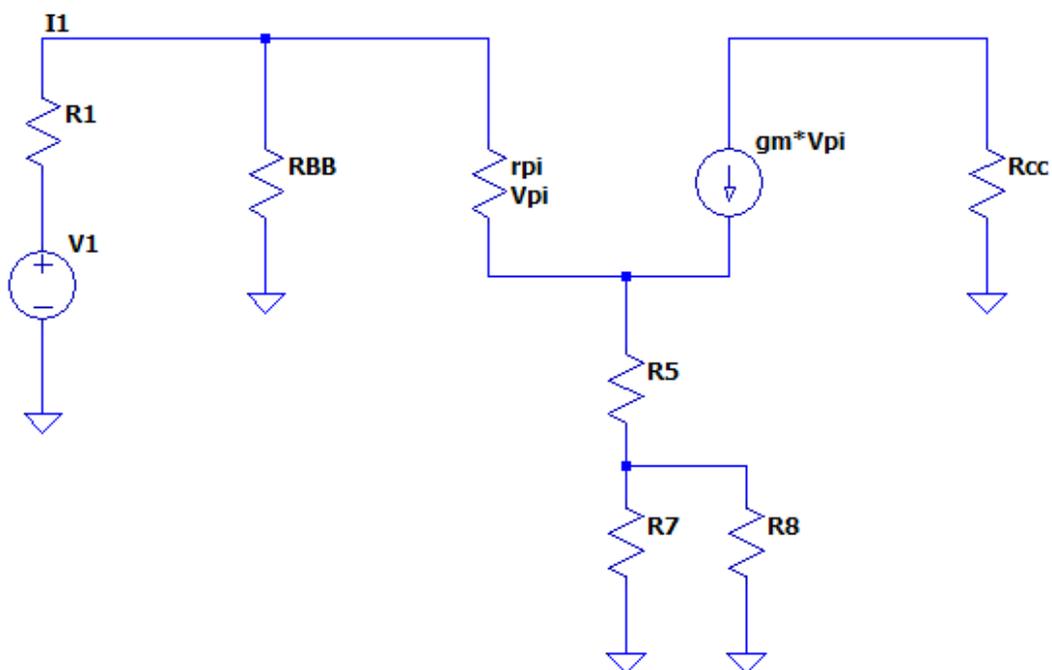
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \rightarrow \begin{cases} R_{\text{out}} = 3,9 \text{ k}\Omega \\ C_{\text{out}} = 200 \text{ pF} \end{cases} \quad (8)$$

APÊNDICE B – Análise CA do Modulador

Para a entrada de portadora, o modulador funciona como um amplificador em emissor comum.

Análise CA:

Figura 47 - Circuito equivalente (amplificador em emissor comum) de pequenos sinais do modulador para a entrada de portadora



Fonte: Autor (2023)

Cálculo da transcondutância:

$$g_m = \frac{I_c}{\phi_t} \quad (9)$$

$$g_m = 0,018 \text{ S}$$

Cálculo da resistência r_{pi} :

$$r_{pi} = \frac{\beta}{g_m} \quad (10)$$

$$r_{pi} = 5555,56 \Omega$$

Cálculo do R_{BB} :

$$R_{BB} = \frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2} = 7674,42 \Omega \quad (11)$$

Cálculo do R_{cc} :

$$R_{cc} = \frac{R_4 * R_6}{R_4 + R_6} = 489,69 \Omega \quad (12)$$

LTKs do lado esquerdo do circuito acima para cálculo de V_{pi} :

$$-V_1 + I_1 * R_1 + \left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} - I_1 \right) * R_{BB} = 0 \quad (13)$$

$$\left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} - I_1 \right) * R_{BB} + V_{pi} + \left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} + g_m * V_{pi} \right) * R_5 + \left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} + g_m * V_{pi} \right) * \left(\frac{R_8 * R_7}{R_8 + R_7} \right) = 0 \quad (14)$$

$$V_{pi} = -0,085 * V_1$$

Cálculo da tensão de saída:

$$V_o = -g_m * V_{pi} * R_{cc} \quad (15)$$

$$\frac{V_o}{V_1} = 41,62$$

Cálculo da impedância de entrada:

$$Z_{in} = \left(\frac{R_2 * R_3 * r_{pi}}{R_2 * R_3 + R_2 * r_{pi} + R_3 * r_{pi}} \right) + R_1 \quad (16)$$

$$I_1 * R_1 + \left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} - I_1 \right) * R_{BB} = 0$$

$$Z_{in} = \frac{V_{pi}}{I_1} \quad (17)$$

$$Z_{in} = 4831,65 \Omega$$

Cálculo da impedância de saída:

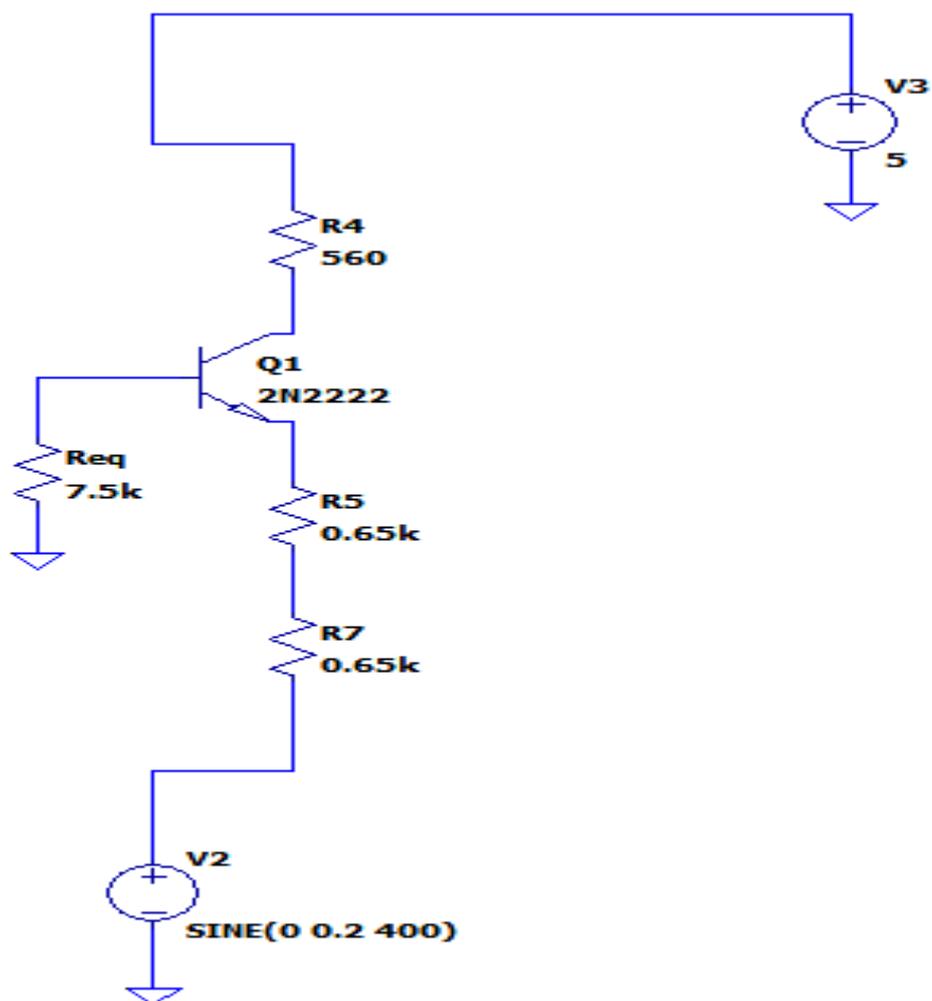
$$Z_o = \frac{R_{CC} * 643,43}{R_{CC} + 643,43} \quad (18)$$

$$Z_o = 287,52 \Omega$$

APÊNDICE C – Ganho em Base Comum.

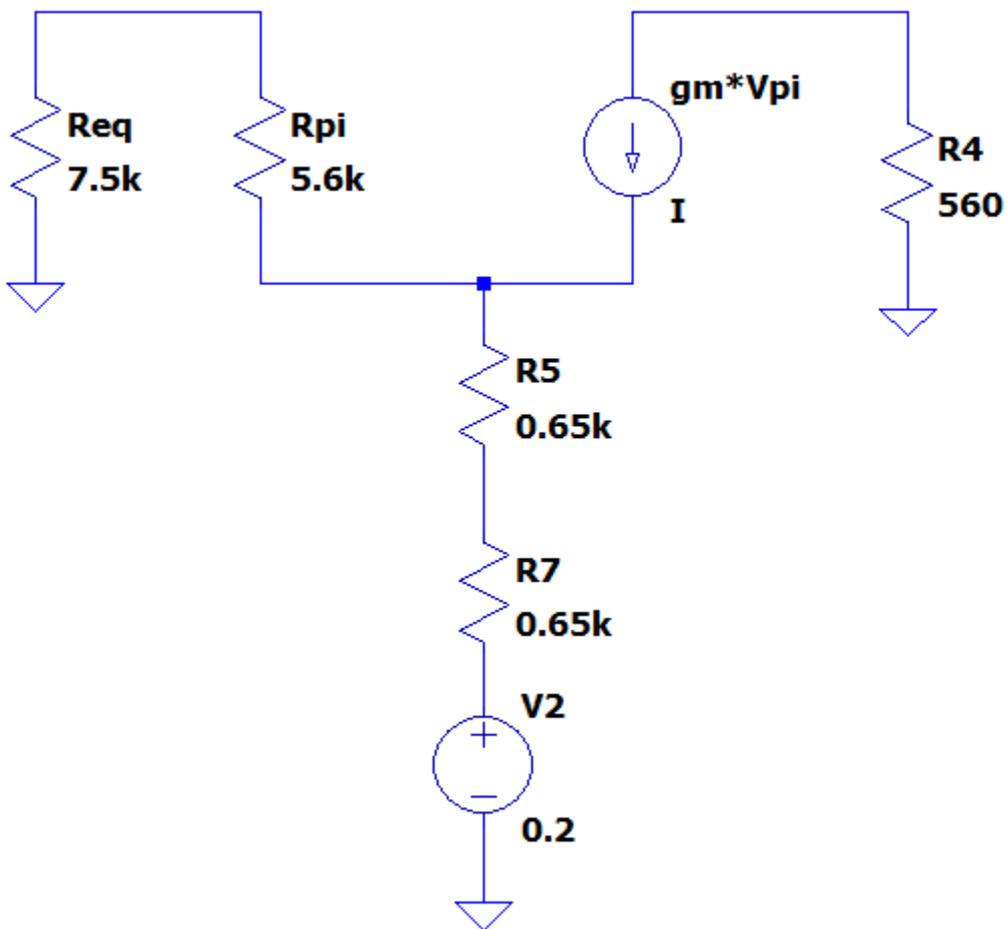
Ganho em base comum:

Figura 48 - Circuito equivalente para cálculo do ganho em base comum.



Fonte: Autor (2023)

Figura 49 - Circuito equivalente de pequenos sinais do transistor em base comum.



Fonte: Autor (2023)

$$V_2 + V_{pi} + \frac{V_{pi}}{r_{pi}} * R_{eq} + 1300 * \left(\frac{V_{pi}}{r_{pi}} \right) = 0 \quad (19)$$

$$V_{pi} * \left(1 + \frac{R_{eq}}{r_{pi}} + \frac{1300}{r_{pi}} \right) = -V_2$$

$$V_o = -gm * (R_4 + 1300) * V_{pi} = - \frac{gm * (R_4 + 1300) * V_2}{\left(1 + \frac{R_{eq}}{r_{pi}} + \frac{1300}{r_{pi}} \right)} \quad (20)$$

$$V_o = 9,51 * V_2$$

APÊNDICE D – Dados do Oscilador

1. Cristal oscilador de 1MHz: $f_s=999678,83$ Hz ; $f_p=1019476,37$ Hz ; $L_s=0,254647909$ H ; $C_s=9,95357648 \times 10^{-14}$ F ; $C_p=2,48839412 \times 10^{-12}$ F ; $R_s=64$ Ω [8].

2. Resistência de carga $R_{load}=8.1$ k Ω .

3. Tensão de alimentação $v_{cc}=5$ V.

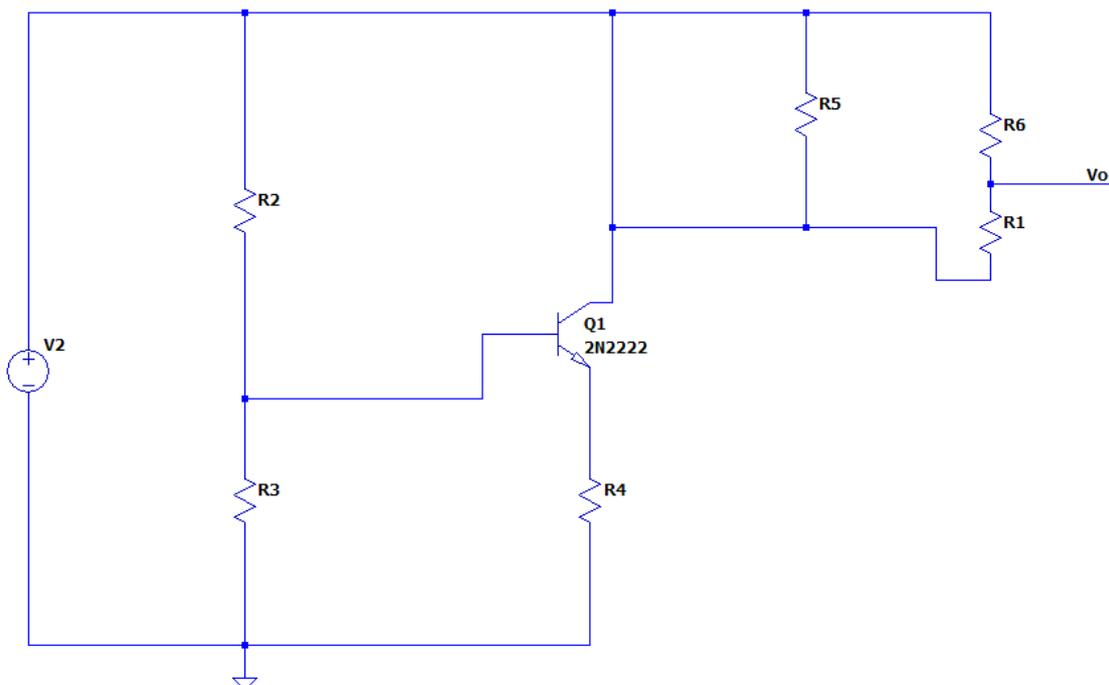
4. Corrente de coletor 200 μ A.

5. Tensão da base 850 mV:

Análise DC:

Os capacitores se tornam circuitos abertos e o indutor um curto-circuito.

Figura 50 – Modelo DC do Oscilador



Fonte: Autor (2023)

$$I_{R_{B2}} = I_{BASE} + I_{R_{B3}}$$

$$\frac{5 - V_{BO}}{R_{B2}} = \frac{200,0 \cdot 10^{-6}}{200} + \frac{V_{BO}}{R_{B3}} \rightarrow \begin{cases} R_{B2} = 81 \text{ k}\Omega \\ R_{B3} = 16 \text{ k}\Omega \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} V_{BEO} &= V_{BO} - V_{EO} \\ 0,65 &= 0,85 - V_{EO} \end{aligned} \quad (22)$$

$$V_{EO} = 0,2 \text{ V}$$

5. Excursão de tensão no coletor igual a 5 V.

6. $\beta = 200$, $C_{b'e} = 12 \text{ pF}$ (desprezível) e $V_{BEq} = 0,65 \text{ V}$.

Polarização:

Excursão de tensão no coletor:

$$I_{Cq} = 0,2 \text{ mA} \quad (23)$$

$$V_{Eq} = 0,2 \rightarrow R_E \cdot I_{Cq} = 0,2 \rightarrow R_E \cdot 0,2 \times 10^{-3} = 0,2 \rightarrow R_E = 1000,0 \Omega \quad (24)$$

Tensão de base:

$$V_{Bq} = 1 + 0,65 = 1,65 \text{ V} \quad (25)$$

Sendo assim:

$$V_{R_{B1}} = 1,65 \text{ V} \quad (26)$$

$$V_{R_{B2}} = 5 - 1,65 = 3,35 \text{ V} \quad (27)$$

Sendo a corrente que circula por R_{B2} e R_{B3} iguais, e dez vezes maior que a I_{Bq} , chegamos:

$$I_{Bq} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{\beta} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{200} = 1,0 \mu\text{A} \quad (28)$$

$$I_{R_{B2}} = I_{R_{B3}} = 20 \times I_{Bq} = 20 \times 1,0 \cdot 10^{-6} = 20 \mu\text{A} \quad (29)$$

O capacitor C_e tem que ser um bypassing para frequência de oscilação, como 10 kHz. Assim $h_{ie} = \frac{V_T}{I_{Bq}} = \frac{0,025}{2 \cdot 10^{-6}} = 12,500 \text{ k}\Omega$

$$r_e = \frac{h_{ie}}{\beta + 1} = \frac{12,500 \cdot 10^3}{201} = 62,19 \Omega \quad (30)$$

$$C_e = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times r_e} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 62,19} \rightarrow C_b = 6,20 \mu\text{F} \quad (31)$$

Cálculo dos capacitores de realimentação:

$$R_b = \frac{R_{b2} * R_{b3} * h_{ie}}{R_{b2} * R_{b3} + R_{b2} * h_{ie} + R_{b3} * h_{ie}} \quad (32)$$

$$R_b = 6458,04 \Omega$$

$$\frac{C_p + C1 * C2'}{C1 + C2'} \ll \frac{1}{\omega_0 * \sqrt{R_s * (R_{load} + R_b)}} \quad (33)$$

$$\frac{C1 * C2'}{C1 + C2'} \ll \left(\frac{1}{2\pi \times 10^6 * \sqrt{64 * (8,1 * 10^3 + 6458,04)}} \right) - 2,488 * 10^{-12}$$

$$\rightarrow \frac{C1 * C2'}{C1 + C2'} \ll 20,06 * 10^{-10}$$

Sugerindo o valor C1=20 pF:

$$\frac{C2'}{C1} = \frac{(C2 + C_{b'e})}{C1} = \sqrt{\frac{R_{load}}{R_b}} = \sqrt{\frac{(8,1 * 10^3)}{6458,04}} = 1,12 \rightarrow C2 = 27,0 \text{ pF} \quad (34)$$

Veja que C2 é muito pequeno, que não necessita ser ponderado no circuito, porque a capacitância parasita $C_{b'e}$ é praticamente igual a C'2. O indutor X_L tem que ter reatância bastante alta na frequência de oscilação, simulando um circuito aberto. Quando tornamos $X_L \gg R_{load}$, e um valor que atende a este requisito é:

$$X_L = 10 \text{ mH} \quad (31)$$

APÊNDICE E – Custos

Para construir os circuitos modulador e oscilador são necessários os componentes da Tabela 1:

Tabela 1 – Componentes do modulador.

Componentes	Valor	Quantidade	Preço Unitário
Resistor	82 k	1	R\$ 0,13
Resistor	1 k	2	R\$ 0,26
Resistor	10 k	1	R\$ 0,13
Resistor	30 k	1	R\$ 2,60
Resistor	51	1	R\$ 0,20
Resistor	3.6 k	1	R\$ 0,35
Resistor	0.68 k	2	R\$ 0,12
Resistor	3.9 k	1	R\$ 2,52
Resistor	16 k	1	R\$ 0,06
Resistor	8.2 k	1	R\$ 0,30
Capacitor	470 n	4	R\$ 2,80
Capacitor	1000 μ	1	R\$ 4,40
Capacitor	200 p	1	R\$ 1,48
Capacitor	27 p	1	R\$ 5,16
Resistor	220	1	R\$ 0,0038
Resistor	27 k	1	R\$ 0,14
Capacitor	6.2 μ	1	R\$ 10,44
Capacitor	20 p	1	R\$ 0,70
Indutor	10 m	1	R\$ 13,00
Ressonador Cerâmico	1 MHz	1	R\$ 11,65
Transistores	2N2222	2	R\$ 1,35

Fonte: Autor (2023)

Custo de implementação: R\$ 57,79

Para um aluno de engenharia em 32 h de atividade imaginando um custo de R\$ 20,00 a hora (engenheiros Trainee) o custo de mão de obra é obtido como: R\$ 800,00. Além disso, foi feito o uso de softwares de livre distribuição para o projeto: LTSpice, Easy EDA e Audacity. Usou-se um osciloscópio, dois geradores de funções, uma fonte CC e duas protoboards da universidade. As placas foram feitas no INEP gratuitamente. Assim, o custo total de projeto foi de: R\$ 857,66.