



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Henrique Dantas Silva

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Maio de 2021

Henrique Dantas Silva

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Orientador: Prof. Jalberth Fernandes de Araújo, Dr.

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Maio de 2021

Henrique Dantas Silva

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Aprovado em 25/05/2021.

Jalberth Fernandes de Araújo, D. Sc.
Orientador

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.
Avaliador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Maio de 2021

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Luciana Alba Dantas Alves e José Airton dos Santos Silva, e a minha avó, Direma Dantas Alves, aos quais eu devo tudo o que sou como pessoa.

Agradeço aos meus amigos e familiares pelo apoio fornecido durante toda a minha vida. Em especial aos meus melhores amigos, Danilo Gomes de Andrade e João Matheus Costa Albuquerque, que já são parte da minha família.

Agradeço aos meus professores, que me forneceram muito conhecimento durante a jornada universitária. Em especial ao meu orientador, Jalberth Fernandes de Araújo, e ao meu supervisor, Raimundo Carlos Silvério Freire, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Agradeço aos colegas do LIMC, Ruan, Otávio e Jardel pelas importantes contribuições.

Resumo

Este relatório tem por objetivo apresentar as atividades, métodos e soluções utilizadas durante o estágio supervisionado realizado no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC), no período de 22 de Fevereiro de 2021 a 14 de Maio de 2021, sob orientação do Professor Jalberth Fernandes de Araújo com carga horária de 26 horas semanais, totalizando 286 horas. O estágio consistiu na elaboração de materiais didáticos instrucionais na forma de vídeos e guias de experimentos para auxílio na aprendizagem de circuitos para comunicações. Neste relatório são apresentados uma descrição teórica, o material e o procedimento experimental necessários para a realização de cada material didático instrucional. Por fim, são apresentados os resultados obtidos durante as montagens.

Palavras-chave: Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, Material Didático Instrucional, Circuitos para Comunicações.

Abstract

This report aims to present the activities, methods and solutions used during the supervised internship carried out at the Laboratory of Scientific Instrumentation and Metrology (LIMC), from February 22, 2021 to May 14, 2021, under the guidance of Professor Jalberth Fernandes de Araújo with a workload of 26 hours per week, totaling 286 hours. The internship consisted of the elaboration of instructional didactic materials in the form of videos and experiment guides to aid in the learning of circuits for communication. This report presents a theoretical description, the material and the experimental procedure necessary for the realization of each instructional didactic material. Finally, the results obtained during the assemblies are presented.

Keywords: Laboratory of Scientific Instrumentation and Metrology, Instructional Didactic Material, Circuits for Communications.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Bancada da Sala 2 do LIMC.	18
Figura 2 – Indutores Confeccionados.	21
Figura 3 – Esquema do Circuito RLC Paralelo.	24
Figura 4 – Montagem do Circuito RLC Paralelo.	25
Figura 5 – Forma de Onda da Saída v_0 para a frequência de 105 kHz.	25
Figura 6 – Gráfico da Razão entre a Tensão de Saída e a Tensão de Entrada em dB em Função da Frequência de um Filtro RLC Paralelo.	26
Figura 7 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal Linear como Função do Ângulo de Condução.	28
Figura 8 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal Linear como Função do Ângulo de Condução.	28
Figura 9 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal da Lei Quadrática como Função do Ângulo de Condução.	30
Figura 10 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal da Lei Quadrática como Função do Ângulo de Condução.	30
Figura 11 – Característica Exponencial: Gráfico de $\frac{G_m(x)}{g_m}$ em função de x	31
Figura 12 – Característica Diferencial: Gráfico de $\frac{G_m(x)}{g_m}$ em função de x	33
Figura 13 – Esquema do Oscilador Colpitts.	34
Figura 14 – Montagem do Oscilador Colpitts.	35
Figura 15 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v_0	36
Figura 16 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v_1	36
Figura 17 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v_0 Saturada.	37
Figura 18 – Esquema do Oscilador com Par Diferencial.	38
Figura 19 – Montagem do Oscilador com Par Diferencial.	39
Figura 20 – Oscilador com Par Diferencial: Tensão de Saída v_0	39
Figura 21 – Oscilador com Par Diferencial: Tensão de Saída v_1	40
Figura 22 – Oscilador com Par Diferencial: Menor Amplitude da Tensão de Saída v_0	41
Figura 23 – Oscilador com Par Diferencial: Início da Saturação da Tensão de Saída v_0	41
Figura 24 – Esquema do Oscilador Controlado por Tensão.	42
Figura 25 – Montagem do Oscilador Controlado por Tensão.	43
Figura 26 – Tensão de Saída v_0 do VCO para 5 V no Pino 9.	43
Figura 27 – Tensão de Saída v_0 do VCO para 2,5 V no Pino 9.	44
Figura 28 – VCO: Frequência da Tensão de Saída em Função da Tensão no Pino 9.	45
Figura 29 – VCO: Frequência em Função da Tensão de Entrada.	45
Figura 30 – Esquema da Modulador ASK a) Modulador e b) Demodulador.	46
Figura 31 – Montagem do Modulador e Demodulador ASK.	47

Figura 32 – Modulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Modulado (verde).	47
Figura 33 – Demodulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Demodulado v2 (verde).	48
Figura 34 – Demodulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Demodulado vd (verde).	48
Figura 35 – Modulação PWM.	49
Figura 36 – Circuito do gerador de Onda Triangular.	50
Figura 37 – Filtro Ativo Passa Baixa de Segunda Ordem Topologia MFB.	50
Figura 38 – Montagem do Modulador e Demodulador PWM.	51
Figura 39 – Modulador PWM: Sinais da Portadora (amarelo), Modulante (verde) e Modulado (azul).	51
Figura 40 – Demodulador PWM: Sinais Modulante (verde) e Demodulado (amarelo).	52
Figura 41 – Diagrama de Blocos do Gerador AM-DSB.	53
Figura 42 – Montagem 1 - Modulador AM-DSB.	54
Figura 43 – Montagem 1 - Sinal Submodulado.	54
Figura 44 – Montagem 1 - Sinal 100% Modulado.	55
Figura 45 – Montagem 1 - Sinal Sobremodulado.	55
Figura 46 – Diagrama de Blocos do Receptor AM-DSB Usando Detector de Envoltória via Cabo.	56
Figura 47 – Montagem 2 - Demodulador AM-DSB.	56
Figura 48 – Montagem 2 - Sinal Modulado.	57
Figura 49 – Montagem 2 - Sinal de Saída do Misturador.	57
Figura 50 – Montagem 2 - FFT do Sinal de Saída do Misturador.	58
Figura 51 – Montagem 2 - Sinal de Saída do Segundo Amplificador IF.	58
Figura 52 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pela Envoltória Positiva (amarelo).	59
Figura 53 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pela Envoltória Negativa (amarelo).	59
Figura 54 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Distorcido (amarelo).	60
Figura 55 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Atenuado (amarelo).	60
Figura 56 – Diagrama de Blocos do Gerador AM-SSB.	61
Figura 57 – Montagem 1 - Modulador AM-SSB.	62
Figura 58 – Montagem 1 - Sinal Modulado.	62
Figura 59 – Montagem 1 - Sinal Modulado.	63
Figura 60 – Montagem 1 - Sinal Modulado.	63
Figura 61 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.	64
Figura 62 – Montagem 1 - FFT do Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.	64
Figura 63 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.	65

Figura 64 – Diagrama de Blocos do Receptor AM-SSB Usando Detector de Produto via Cabo.	65
Figura 65 – Montagem 2 - Modulador e Demodulador AM-SSB.	66
Figura 66 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).	66
Figura 67 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).	67
Figura 68 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).	67
Figura 69 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector Foster-Seeley.	68
Figura 70 – Montagem 1 - Modulador e Demodulador FM com Detector Foster-Seeley.	69
Figura 71 – Montagem 1 - Sinal Modulador.	69
Figura 72 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Misturador.	70
Figura 73 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Limitador.	70
Figura 74 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector Foster-Seeley (amarelo).	71
Figura 75 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).	71
Figura 76 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector de Relação.	72
Figura 77 – Montagem 2 - Modulador e Demodulador FM com Detector de Relação.	72
Figura 78 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de Relação (amarelo).	73
Figura 79 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).	73
Figura 80 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector PLL.	74
Figura 81 – Montagem 3 - Modulador e Demodulador FM com Detector PLL	74
Figura 82 – Montagem 3 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de PLL (amarelo).	75
Figura 83 – Montagem 3 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).	75
Figura 84 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector de Quadratura	76
Figura 85 – Montagem 4 - Modulador e Demodulador FM com Detector de Quadratura.	76
Figura 86 – Montagem 4 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de Quadratura (amarelo).	77
Figura 87 – Montagem 4 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).	77
Figura 88 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Distorcido (amarelo).	78

Figura 89 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Atenuado (amarelo). 78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros Utilizados para a Confeção dos Indutores.	20
Tabela 2 – Indutância Série em Função da Frequência.	22
Tabela 3 – Parâmetros dos Modelos Série e Paralelo dos Indutores.	23
Tabela 4 – Razão entre a Tensão de Saída e a Tensão de Entrada em Função da Frequência de um Circuito RLC Paralelo.	26
Tabela 5 – Parâmetros do Circuito RLC Paralelo.	27
Tabela 6 – Característica Exponencial: Tabela de $\frac{G_m(x)}{g_m}$	32
Tabela 7 – Característica Diferencial: Tabela de $\frac{G_m(x)}{g_m}$	33
Tabela 8 – VCO: Frequência da Tensão de Saída em Função da Tensão no Pino 9.	44

Lista de abreviaturas e siglas

AC	Componete alternada
ACL 01	Amplitude Modulation Transmitter Kit
ACL 02	Amplitude Demodulation Receiver Kit
ACL 03	Frequency Modulation Transmitter Kit
ACL 04	Frequency Demodulation Receiver Kit
AGC	Ajuste de ganho automático
AM	Modulação em amplitude
ASK	<i>Amplitude-shift keying</i>
CI	Circuito integrado
DC	Componente contínua
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DSB	<i>Double-sideband</i>
IF	Faixa intermediária
FM	Modulação em frequência
GND	Terra
LIMC	Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas
LSB	<i>Lower-sideband</i>
MOS	Metal-óxido-sílicio
PLL	<i>Phase-locked loop</i>
PVC	Policloreto de vinila
PM	Modulação em fase
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RF	Rádio frequência

SSB	Single-sideband
FFT	Transformada rápida de Fourier
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USB	<i>Upper-sideband</i>
VCO	Oscilador Controlado por Tensão

Lista de símbolos

α	Razão entre as correntes do coletor e do emissor do transistor
β	Banda de passagem - [Hz] ou [rad][s] ⁻¹
ϕ	Metade do ângulo de condução - [°] ou [rad]
μ	Permeabilidade magnética - [H][m] ⁻¹
π	Constante circular
ω	Frequência angular - [rad][s] ⁻¹
ω_0	Frequência angular central - [rad][s] ⁻¹
θ	Deslocamento angular - [°] ou [rad]
C	Capacitância - [F]
C_n	Coefficientes da série de Fourier
D	Diodo
f	Frequência - [Hz]
f_0	Frequência central ou de oscilação - [Hz]
f_c	Frequência da portadora - [Hz]
f_{c1}	Frequência de corte inferior - [Hz]
f_{c2}	Frequência de corte superior - [Hz]
f_m	Frequência da modulante - [Hz]
f_{max}	Frequência máxima - [Hz]
f_{min}	Frequência mínima - [Hz]
g_m	Trancondutância de pequenos sinais - [S]
G_m	Trancondutância de grandes sinais - [S]
h	Comprimento do indutor - [m]
H	Função de transferência

i	Corrente alternada - [A]
I	Corrente contínua - [A]
I_{BEQ}	Corrente quiescente entre base e emissor do transistor - [A]
j	Unidade imaginária
L	Indutância - [H]
L_p	Indutância paralela - [H]
L_s	Indutância série - [H]
m_f	índice de modulação
N	Número de espiras do indutor
Q	Fator de qualidade
r	Raio do indutor - [m]
R	Resistência - [Ω]
R_p	Resistência paralela - [Ω]
R_s	Resistência série - [Ω]
S	Domínio de Laplace
T	Temperatura - [K]
v	Tensão alternada - [V]
V	Tensão contínua - [V]
v_{BEQ}	Tensão quiescente entre base e emissor do transistor - [V]
V_{pp}	Tensão pico a pico - [V]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas	18
1.4	Organização	19
2	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	20
2.1	Confecção de Indutores com Núcleo de Ar	20
2.2	Montagem de um Circuito RLC Paralelo	23
2.3	Levantamento da Característica Linear por Partes	27
2.4	Levantamento da Característica Quadrática	29
2.5	Levantamento da Característica Exponencial	31
2.6	Levantamento da Característica Diferencial	32
2.7	Montagem de um Oscilador Colpitts	34
2.8	Montagem de um Oscilador com Par Diferencial	38
2.9	Montagem de um Oscilador Controlado por Tensão	42
2.10	Montagem de um Modulador e de um Demodulador ASK	46
2.11	Montagem de um Modulador e de um Demodulador PWM	49
2.12	Módulos Didáticos da Falcon	52
2.12.1	Modulação e Demodulação com Detector de Envoltória AM-DSB	53
2.12.2	Modulação e Demodulação com Detector de Produto AM-SSB	61
2.12.3	Modulação e Demodulação FM com Diodo Varicap	68
3	CONCLUSÕES	80
	REFERÊNCIAS	81

1 Introdução

Este documento descreve as atividades desenvolvidas pelo estagiário Henrique Dantas Silva sob a orientação do professor Jalberth Fernandes de Araujo e supervisão do professor Raimundo Carlos Silvério Freire. O estágio foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), correspondente ao estágio supervisionado discente, prestado no período de 22 de Fevereiro de 2021 a 14 de Maio de 2021, com uma carga horária de 26 horas semanais, totalizando uma carga horária de 286 horas, superior à carga horária mínima definida de 270 horas.

Neste capítulo são apresentados a justificativa, os objetivos e o local desse estágio supervisionado. Por fim, é descrito a organização dos capítulos deste documento.

1.1 Justificativa

A comunicação é um ato que envolve a troca de informações entre dois ou mais interlocutores, sendo um dos pontos mais importantes da sociedade atual. Os seus passos básicos são as motivações ou a intenção de comunicar, a composição da mensagem, a codificação e transmissão das mensagens codificadas, a recepção dos sinais, a decodificação e finalmente a interpretação da mensagem por parte do receptor [1]. Para que cada um desses passos ocorra, são necessários circuitos elétricos. Estes circuitos são estudados na disciplina de Circuitos para Comunicações.

Na disciplina de Circuitos para Comunicações, disciplina de ênfase da área de eletrônica, é requerido dos discentes a realização da montagem e da análise dos circuitos apresentados na disciplina, como osciladores senoidais, moduladores e demoduladores. Em que os estudantes devem realizar os experimentos e fazer análises e constatações para aprender o conteúdo. Com o intuito de auxiliar o aprendizado, serão elaborados materiais didáticos instrucionais de circuitos para comunicações.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estágio supervisionado é apresentar materiais didáticos instrucionais para o aprendizado de circuitos para comunicações.

1.2.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Descrição dos circuitos para comunicações;
- Descrição dos materiais e dos procedimentos experimentais de cada atividade voltada ao aprendizado de circuitos para comunicações;
- Apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- Elaboração de guias e vídeos para cada atividade voltada ao aprendizado de circuitos para comunicações.

1.3 Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas

O Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC) é um dos laboratórios do curso de Engenharia Elétrica com sede na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O LIMC tem como coordenador o professor titular Raimundo Carlos Silvério Freire, integrante do corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (DEE-UFCG).

O LIMC surgiu da interação entre as equipes de pesquisadores das diversas instituições em formação de pessoal no nível de mestrado e doutorado, por meio de um acordo internacional tipo CAPES/COFECUB firmado com a *Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications* [2].

Voltado principalmente para a área da Eletrônica, o foco do laboratório é o estudo de métodos e técnicas de medição e processamento de sinais, bem como de circuitos e sistemas para este fim, visando um conceito amplo de instrumentação inteligente. Outras áreas de pesquisa abordadas pelo LIMC são a instrumentação biomédica e a concepção de circuitos integrados [3].

Atualmente, tem como membros 8 professores, 13 colaboradores, 12 estudantes de pós-graduação e 18 de graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG. Sua estrutura é composta por 5 salas para desenvolvimento de pesquisas de graduação e pós-graduação, além de uma sala de instrumentação para montagens e uma copa, para uso comum. A bancada utilizada para a realização das atividades do estágio supervisionado se encontra na Figura 1.

Figura 1 – Bancada da Sala 2 do LIMC.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 1, a bancada utilizada para o desenvolvimento das atividades do estágio supervisionado contém 2 osciloscópios, 2 fontes de tensão DC, 2 geradores de função, 2 *protoboards*, fios e cabos para conexão.

1.4 Organização

O presente trabalho está organizado em três capítulos. No capítulo 1 foi apresentado a justificativa, os objetivos e o local de realização do estágio supervisionado. No capítulo 2 está apresentado as atividades desenvolvidas durante o estágio supervisionado, bem como os resultados observados. Por fim, no capítulo 3 está apresentado as considerações finais do trabalho.

2 Atividades Desenvolvidas

Neste capítulo estão apresentadas as atividades que foram desenvolvidas durante o estágio supervisionado e os resultados observados em cada uma dessas atividades. As atividades desenvolvidas consistiram na confecção de indutores com núcleo de ar, levantamento das características linear por partes, quadrática, exponencial e diferencial, montagens de circuito RLC paralelo, osciladores Colpitts, com par diferencial e controlado por tensão, moduladores e demoduladores ASK e PWM. Além disso, foram realizadas atividades com os módulos Falcon de modulação e demodulação AM e FM.

2.1 Confecção de Indutores com Núcleo de Ar

Essa atividade consistiu na confecção de indutores com núcleo de ar para a determinação dos parâmetros dos modelos série e paralelo dos indutores confeccionados.

O cálculo da indutância é feito por meio da Equação 2.1, que apresenta resultados precisos para indutores com comprimentos na faixa de 0,1 a 2 cm e diâmetros de 0,2 a 1 cm [4].

$$L = \frac{\mu N^2 \pi r^2}{h} \quad (2.1)$$

Em que L é a indutância, μ é a permeabilidade magnética do núcleo (no caso do ar, $\mu = 4\pi 10^{-7} H/m$), N é o número de espiras, r é o raio e h é o comprimento do indutor.

Após estudar a Equação 2.1, foram definidos os parâmetros de projeto dos indutores para que seus valores fossem de 1 μH , 10 μH e 100 μH , respectivamente. Os parâmetros projetados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros Utilizados para a Confecção dos Indutores.

L (μH)	r (m)	h (m)	μ (H/m)	N
1	0,011	0,003	$4\pi 10^{-7}$	3
10	0,011	0,012	$4\pi 10^{-7}$	16
100	0,011	0,058	$4\pi 10^{-7}$	110

Fonte – Autoria Própria (2021).

Os valores do raio e do comprimento apresentados na Tabela 1 são referentes à base cilíndrica utilizada para a confecção dos indutores. Já o número de espiras foi calculado pela Equação 2.1, sendo o valor encontrado arredondado para o número inteiro mais próximo.

Definidos os parâmetros de projeto, enrolou-se o fio de cobre esmaltado utilizando uma base cilíndrica (cano de PVC) como suporte. Como o fio de cobre utilizado era muito fino, 16 AWG, passou-se cola quente para manter as espiras fixas.

Após a confecção do indutor, raspou-se as pontas do mesmo com o objetivo de conseguir uma leitura clara no medidor RLC. Além disso, colou-se um número para identificar cada indutor. Os indutores confeccionados estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Indutores Confeccionados.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Após a raspagem, colocou-se os dois terminais do indutor no medidor RLC, ajustando-o para medir indutância. Os valores medidos se encontram na Tabela 2. Ressalta-se o fato de que o fator de qualidade (Q) só foi anotado na maior frequência disponibilizada pelo medidor (10 kHz), uma vez que, quanto maior a frequência, mais preciso será a medição para um indutor com núcleo de ar [5].

Tabela 2 – Indutância Série em Função da Frequência.

Identificador	$N_{utilizado}$	f (kHz)	$L_s(teo)$ (μH)	$L_s(exp)$ (μH)	Erro(%)	Q
1	93	0,1	71,23	92	29,02	-
1	93	1	71,23	92,4	29,72	-
1	93	10	71,23	92,3	29,58	5,24
2	93	0,1	71,23	94	31,97	-
2	93	1	71,23	94,1	32,11	-
2	93	10	71,23	94	31,97	5,39
3	93	0,1	71,23	96	34,77	-
3	93	1	71,23	96,5	35,48	-
3	93	10	71,23	96,44	35,39	5,41
4	18	0,1	12,90	7,2	44,19	-
4	18	1	12,90	7	45,74	-
4	18	10	12,90	7,26	43,72	2,41
5	20	0,1	15,92	9	43,47	-
5	20	1	15,92	8,8	44,72	-
5	20	10	15,92	9,07	43,03	2,73
6	20	0,1	15,92	9	43,47	-
6	20	1	15,92	9,2	42,21	-
6	20	10	15,92	9,2	42,21	2,79
7	4	0,1	2,55	1	60,78	-
7	4	1	2,55	1	60,78	-
7	4	10	2,55	1	60,78	1,13
8	4	0,1	2,55	1	60,78	-
8	4	1	2,55	1	60,78	-
8	4	10	2,55	1,01	60,39	1,03
9	4	0,1	2,55	1	60,78	-
9	4	1	2,55	1	60,78	-
9	4	10	2,55	1	60,78	1,05

Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Tabela 2, os valores de indutância encontrados apresentaram um erro de cerca de 35% em relação aos valores teóricos para indutores acima de 90 μH , um erro de 45% para indutores entre 7 μH e 10 μH e um erro de 60% para indutores de 1 μH . Com esses resultados foi verificado que quanto menor a indutância maior será o erro atrelado a ela. Estes erros ocorreram devido ao espaçamento não homogêneo entre as espiras devido à distribuição irregular da cola quente.

Com os valores da indutância série (L_s) e do fator de qualidade apresentados na Tabela 2, determinou-se o valor da resistência em série (R_s) do indutor utilizando a Equação 2.2 [6]. Após isso, utilizou-se as Equações 2.3 e 2.4 para determinar os valores da resistência em paralelo (R_p)

e da indutância em paralelo (L_p).

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} = \frac{R_p}{\omega L_p} \quad (2.2)$$

$$R_p = R_s + Q^2 \quad (2.3)$$

$$L_p = L_s \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right) \quad (2.4)$$

Com os valores da Tabela 2 e as Equações 2.2, 2.3 e 2.4, encontra-se os parâmetros restantes dos modelos série e paralelo. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros dos Modelos Série e Paralelo dos Indutores.

Identificador	L_s ($\mu\mathbf{H}$)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	L_p ($\mu\mathbf{H}$)
1	92,3	1,107	28,56	95,66
2	94	1,096	30,15	97,24
3	96,44	1,112	30,81	99,69
4	7,26	0,189	6,00	8,51
5	9,07	0,209	7,66	10,29
6	9,2	0,207	7,99	10,38
7	1	0,056	1,33	1,78
8	1,01	0,062	1,12	1,96
9	1	0,060	1,16	1,91

Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Tabela 3, o valor da resistência série (R_s) e paralela (R_p) de um indutor é diretamente proporcional à indutância. Esse fato ocorre pois quanto maior a indutância, mais fio de cobre esmaltado foi utilizado para a confecção do indutor e, conseqüentemente, maior será a resistência desse fio.

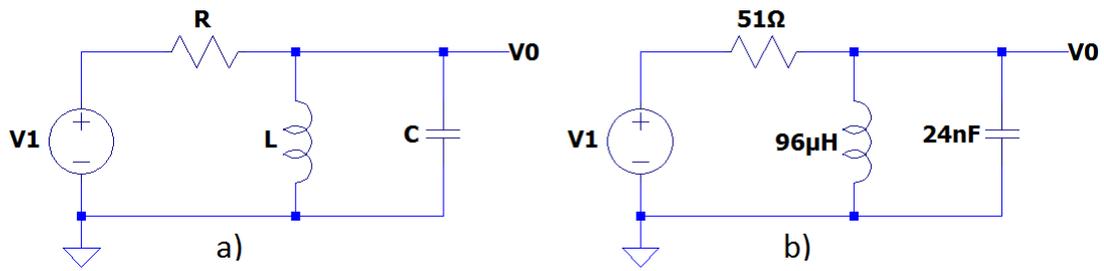
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na confecção de indutores com núcleo de ar.

2.2 Montagem de um Circuito RLC Paralelo

Essa atividade consistiu na montagem de um circuito RLC paralelo para a determinação de sua resposta em frequência.

O esquema do circuito RLC paralelo se encontra na Figura 3a) e sua função de transferência ($H(s)$) está apresentada na Equação 2.5.

Figura 3 – Esquema do Circuito RLC Paralelo.



Fonte – Adaptado de ANDRADE (2018) [7].

$$H(S) = \frac{\frac{1}{RC}S}{S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC}} \quad (2.5)$$

A partir da Equação 2.5, encontra-se a frequência central (f_0), as frequências de corte (f_{c1} e f_{c2}), a banda de passagem (β) e o fator de qualidade (Q) do circuito RLC paralelo da Figura 3a). Esses parâmetros estão representados nas Equações 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente [8].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.6)$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi} \left(-\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \right) \quad (2.7)$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \right) \quad (2.8)$$

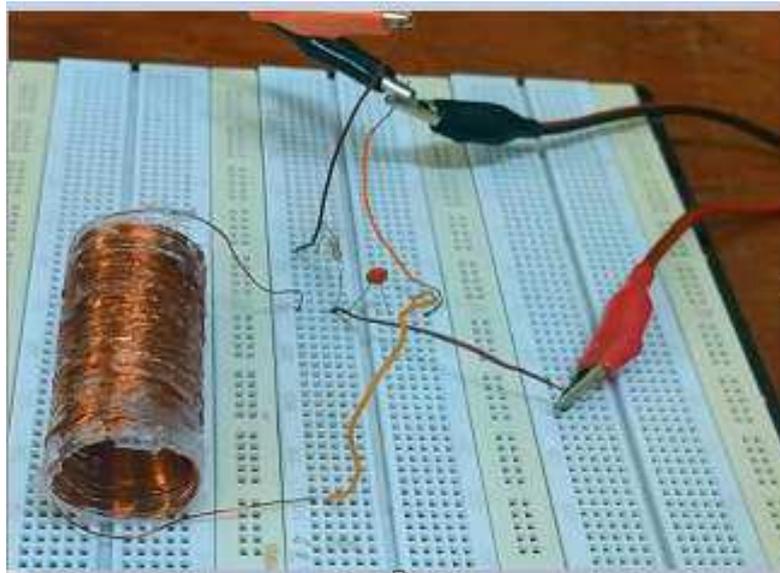
$$\beta = f_{c2} - f_{c1} \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{f_0}{\beta} \quad (2.10)$$

Para o circuito da Figura 3, a partir das Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9, obteve-se uma frequência central de 105 kHz, frequências de corte de 58,36 kHz e 188,39 kHz, banda de passagem de 130,03 kHz e fator de qualidade de 0,808.

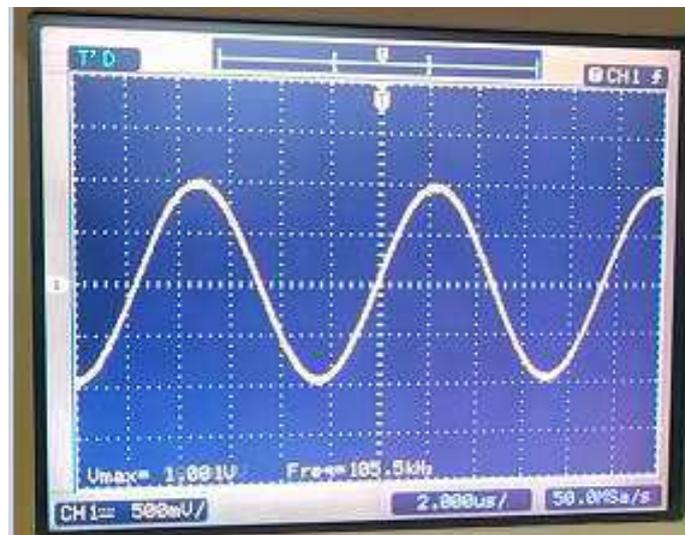
A montagem do esquema do circuito RLC paralelo da Figura 3b) está apresentada na Figura 4, em que foi colocado um sinal senoidal de 1 V e frequência de 105 kHz na entrada v1.

Figura 4 – Montagem do Circuito RLC Paralelo.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

A forma de onda da tensão de saída (v_0) para a frequência central de 105 kHz do circuito da Figura 4 está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Forma de Onda da Saída v_0 para a frequência de 105 kHz.

Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 5, o sinal de saída foi uma onda senoidal de 1 V com frequência de 105,5 kHz, ou seja, o sinal de saída foi igual ao sinal de entrada. Portanto, constata-se que a frequência central experimental do circuito RLC analisado foi igual à frequência experimental.

Em sequência, variou-se a frequência do sinal de entrada e anotou-se as amplitudes do sinal de saída, que estão apresentadas na Tabela 4.

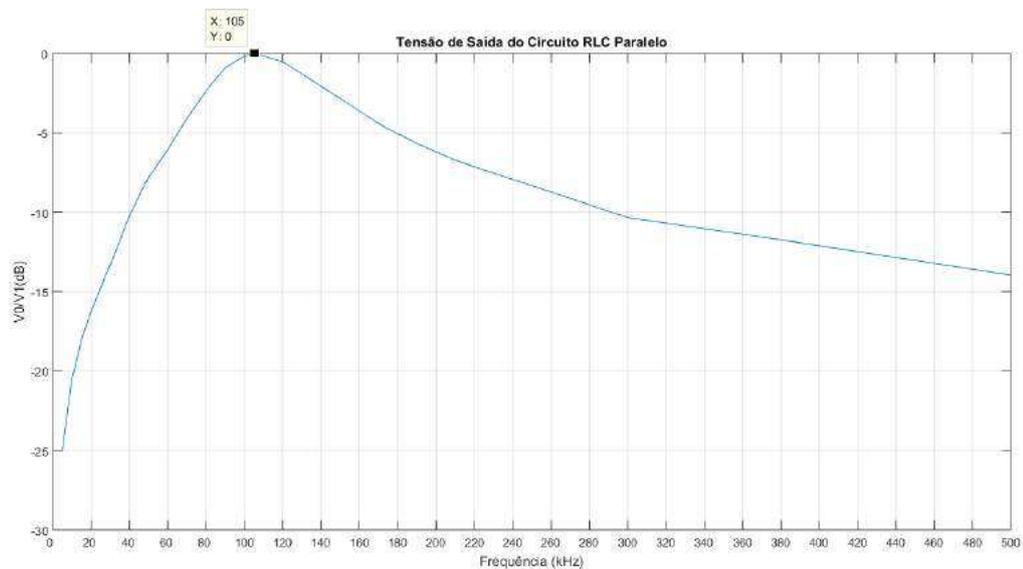
Tabela 4 – Razão entre a Tensão de Saída e a Tensão de Entrada em Função da Frequência de um Circuito RLC Paralelo.

Frequência (kHz)	v0/v1	Frequência (kHz)	v0/v1
0	0	90	0,900
0,01	0	95	0,940
0,1	0	100	0,980
0,5	0	105	1,000
1	0	110	0,980
5	0,056	115	0,960
10	0,094	120	0,940
15	0,126	130	0,860
20	0,154	150	0,720
30	0,216	170	0,600
40	0,308	190	0,520
50	0,408	210	0,460
60	0,496	300	0,304
70	0,624	400	0,248
80	0,760	500	0,200

Fonte – Autoria Própria (2021).

Com os dados apresentados na Tabela 4, gerou-se o gráfico apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico da Razão entre a Tensão de Saída e a Tensão de Entrada em dB em Função da Frequência de um Filtro RLC Paralelo.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 6, o circuito RLC paralelo da Figura 4 se comporta como um filtro passa faixa com frequência central (f_0) de 105 kHz, frequências de corte (f_{c1}) e (f_{c2}) de 76,32 kHz e 153,35 kHz, respectivamente, banda de passagem (β) de 77,03kHz e fator

de qualidade de 1,363. Na Tabela 5 estão apresentados os dados teóricos e experimentais dessa atividade.

Tabela 5 – Parâmetros do Circuito RLC Paralelo.

Tipo de Dados	f_0 (kHz)	f_{c1} (kHz)	f_{c2} (kHz)	β (kHz)	Q
Teóricos	105	58,36	188,39	130,03	0,808
Experimentais	105	76,32	153,35	77,03	1,363
Erro (%)	0,00	30,77	18,60	40,76	68,69

Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Tabela 5, a frequência central experimental foi igual à teórica, porém as frequências de corte inferior e superior experimentais divergiram em 30,77% e 18,60% dos valores teóricos, respectivamente, o que gera, conseqüentemente, uma banda de passagem e um fator de qualidade diferentes dos teóricos. Essas diferenças podem ter sido ocasionadas devido aos erros inerentes aos elementos do circuito e aos instrumentos de medição, bem como ao número resumido de pontos apurados na atividade. Entretanto, foi possível analisar a resposta em frequência do circuito RLC paralelo e constatar o seu comportamento como um filtro passa faixa.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para o auxiliar na montagem de um circuito RLC paralelo.

2.3 Levantamento da Característica Linear por Partes

Essa atividade teve por objetivo a análise dos coeficientes de *Fourier* da característica linear por partes em função do ângulo de condução.

A característica linear por partes é representada por uma fonte de corrente controlada por tensão linear por partes, em que as componentes I_n dessa fonte de corrente, para o caso de uma onda senoidal, são dadas pelas Equações 2.11, 2.12 e 2.13 [9].

$$I_0 = \frac{I_p}{\pi} \frac{\sin \phi - \phi \cos \phi}{1 - \cos \phi} \quad (2.11)$$

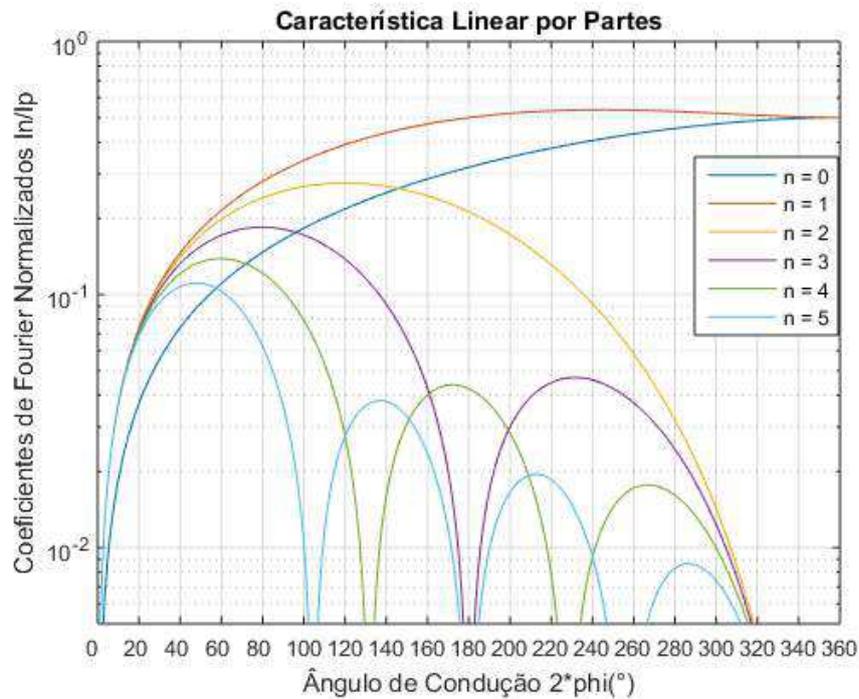
$$I_1 = \frac{I_p}{\pi} \frac{\phi - \cos \phi \sin \phi}{1 - \cos \phi} \quad (2.12)$$

$$I_n = \frac{2I_p}{\pi} \frac{\cos \phi \sin n\phi - n \sin \phi \cos n\phi}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \phi)}, n \geq 2 \quad (2.13)$$

Em que I_p é a amplitude máxima da fonte de corrente e ϕ é a metade do ângulo de condução.

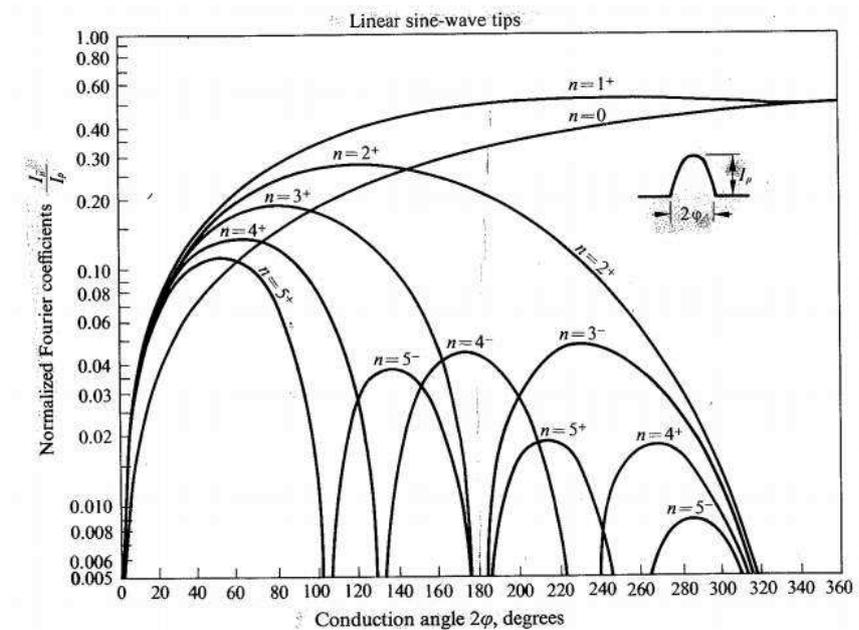
Com o auxílio das Equações 2.11, 2.12 e 2.13, foi levantado a característica linear por partes, que está apresentada na Figura 7. Já na Figura 8 está apresentada a característica linear por partes de [9].

Figura 7 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal Linear como Função do Ângulo de Condução.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 8 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal Linear como Função do Ângulo de Condução.



Fonte – CLARK e HESS (1971) [9].

Ao comparar os gráficos das Figuras 7 e 8, verifica-se que em ambos as componentes 0 e 1 foram as únicas que se encontraram presentes para qualquer ângulo de condução, tendendo para 0,5 em ângulos de condução próximos a 360° . Com relação às outras componentes, os seus períodos de atuação, bem como suas amplitudes, foram sendo reduzidos a medida que n crescia. Logo, concluí-se que a característica linear por partes foi representada com grande exatidão.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar no levantamento da característica linear por partes.

2.4 Levantamento da Característica Quadrática

Essa atividade teve por objetivo a análise dos coeficientes de *Fourier* da característica quadrática em função do ângulo de condução.

A característica quadrática pode ser representada pela corrente do transistor do tipo MOS operando na região de saturação, em que as componentes I_n dessa corrente, para o caso de uma onda senoidal, são dadas pelas Equações 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17 [9].

$$I_0 = \frac{I_p \phi - \frac{3}{4} \sin 2\phi + \frac{\phi}{2} \cos 2\phi}{\pi (1 - \cos \phi)^2} \quad (2.14)$$

$$I_1 = 2 \frac{I_p \frac{3}{4} \sin \phi + \frac{1}{12} \sin 3\phi - \phi \cos \phi}{\pi (1 - \cos \phi)^2} \quad (2.15)$$

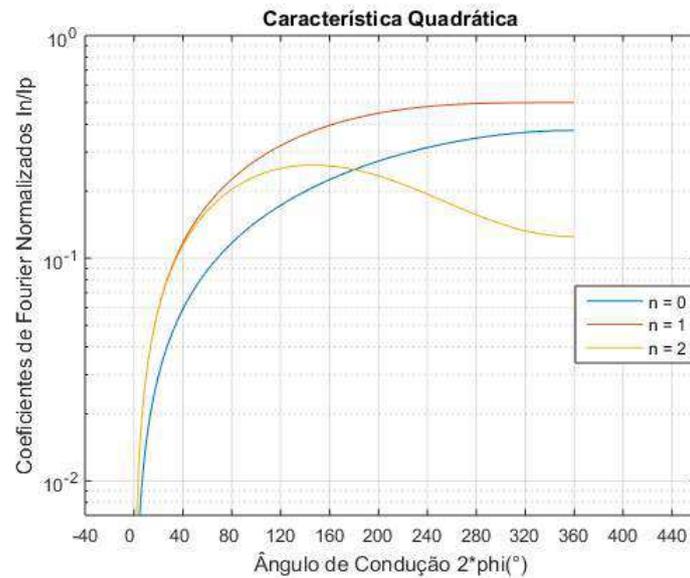
$$I_2 = 2 \frac{I_p \frac{\phi}{2} - \frac{1}{6} \sin 2\phi + \frac{1}{48} \sin 4\phi}{\pi (1 - \cos \phi)^2} \quad (2.16)$$

$$I_n = 2 \frac{I_p (4 - n^2) \sin n\phi + (n - 1)(n - 2) \sin n\phi \cos 2\phi + 3n \sin (n - 2)\phi}{\pi (n^2 - 1)(n^2 - 4)n(1 - \cos \phi)^2}, n \geq 3 \quad (2.17)$$

Em que I_p é a amplitude máxima da corrente no transistor e ϕ é a metade do ângulo de condução.

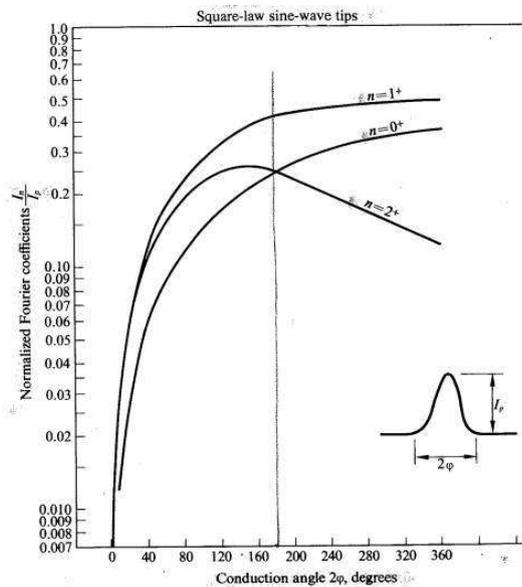
Com o auxílio das Equações 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17, foi levantado a característica quadrática, que está apresentada na Figura 9. Já na Figura 8 está apresentada a característica quadrática de [9].

Figura 9 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal da Lei Quadrática como Função do Ângulo de Condução.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 10 – Coeficientes de Fourier Normalizados de um Trem de Pulsos de Ponta Senoidal da Lei Quadrática como Função do Ângulo de Condução.



Fonte – CLARK e HESS (1971) [9].

Ao comparar os gráficos das Figuras 9 e 10, observa-se em ambos os gráficos que as componentes 0 e 1 apresentaram-se crescentes a medida que o ângulo de condução aumentava, estabilizando em 0,4 e 0,5 quando próximas ao ângulo de condução de 360° , respectivamente. Já a componente 2 apresentou uma queda em torno de um ângulo de condução de 150° . Logo, concluí-se que a característica quadrática foi representada com grande exatidão.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar no levantamento da característica quadrática.

2.5 Levantamento da Característica Exponencial

Essa atividade teve por objetivo a análise dos valores da transcondutância de grandes sinais da característica exponencial em função de x .

A característica exponencial pode ser representada pela corrente de uma polarização direta da junção P-N em um diodo ou transistor, em que as componentes da corrente (I_n) e a transcondutância de grandes sinais (G_m), são dadas pelas Equações 2.18 e 2.19, respectivamente [9].

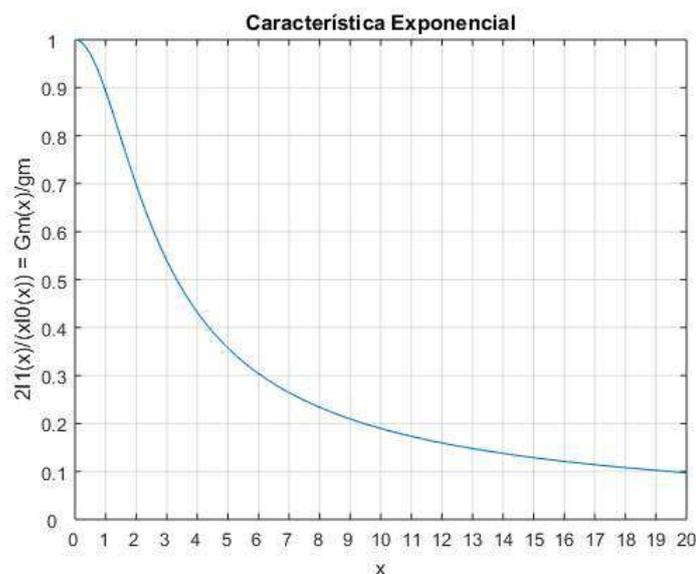
$$I_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos \theta} \cos n\theta d\theta \quad (2.18)$$

$$G_m(x) = g_m \frac{2I_1(x)}{xI_0(x)} \quad (2.19)$$

Em que g_m é a transcondutância de pequenos sinais e x é o expoente da componente DC da corrente na junção P-N, sendo dado pela razão entre a tensão DC sobre a junção P-N e $\frac{KT}{q}$, que é 26 mV para uma temperatura de 300 °K [9].

Com o auxílio das Equações 2.18 e 2.19, foi levantado a transcondutância de grandes sinais da característica exponencial, que está apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Característica Exponencial: Gráfico de $\frac{G_m(x)}{g_m}$ em função de x .



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 11, o valor da transcondutância de grandes sinais da característica exponencial diminui a medida que o valor de x aumenta, ou seja, ela diminui a medida que a tensão DC aplicada ao componente com característica exponencial aumenta. Na Tabela 6 estão apresentados os valores da transcondutância de grandes sinais da característica exponencial da Figura 11 e os valores apresentados em [9].

Tabela 6 – Característica Exponencial: Tabela de $\frac{G_m(x)}{g_m}$.

x	$\frac{G_m(x)}{g_m}$ Teórico	$\frac{G_m(x)}{g_m}$ Simulado
0,0	1,000	1,000
0,5	0,970	0,970
1,0	0,893	0,893
2,0	0,698	0,698
3,0	0,540	0,540
4,0	0,432	0,432
5,0	0,357	0,357
7,0	0,264	0,264
10,0	0,190	0,190

Fonte – Adaptado de CLARK e HESS (1971) [9].

Ao comparar os dados teóricos e experimentais apresentados na Tabela 6, percebe-se que os valores da transcondutância de grandes sinais normalizada pela transcondutância de pequenos sinais da característica exponencial simulada foram exatamente iguais aos valores apresentados em [9]. Portanto, concluí-se que a característica exponencial foi simulada com grande exatidão.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar no levantamento da característica exponencial.

2.6 Levantamento da Característica Diferencial

Essa atividade teve por objetivo a análise dos valores da transcondutância de grandes sinais da característica diferencial em função de x .

A característica diferencial pode ser representada pelas correntes nos emissores de um par diferencial, em que as componentes dessa corrente (a_n) e a transcondutância de grandes sinais (G_m), são dadas pelas Equações 2.20 e 2.21, respectivamente [9].

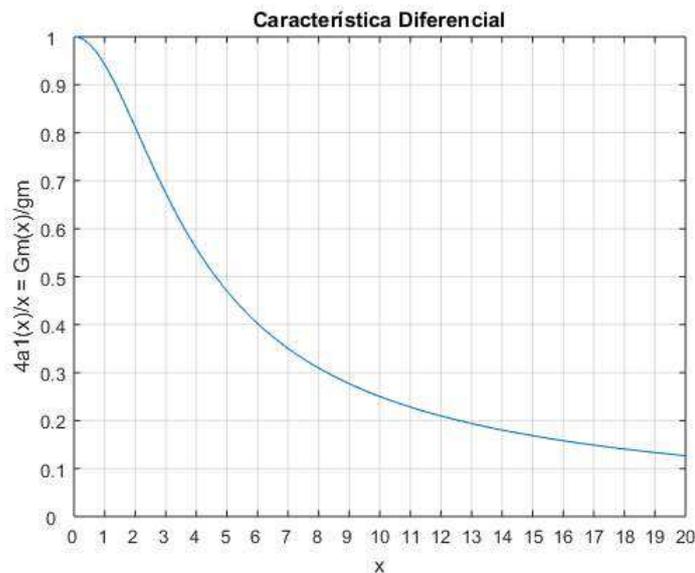
$$a_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \tanh \frac{x}{2} \cos \phi \cos n\phi d\phi \quad (2.20)$$

$$G_m(x) = \frac{\alpha I_1}{V_1} = \frac{\alpha q I_k}{kT} \frac{I_1}{x I_k} = 2\alpha g_{in} \frac{a_1(x)}{x} = g_m \frac{4a_1(x)}{x} \quad (2.21)$$

Em que g_m é a transcondutância de pequenos sinais e x é o expoente da componente DC da corrente entre base e emissor dos transistores do par diferencial, sendo dado pela razão entre a tensão DC entre base e emissor dos transistores do par diferencial e $\frac{KT}{q}$, que é 26 mV para uma temperatura de 300 °K [9]. .

Com o auxílio das Equações 2.20 e 2.15, foi levantado a transcondutância de grandes sinais da característica diferencial, que está apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Característica Diferencial: Gráfico de $\frac{G_m(x)}{g_m}$ em função de x .



Fonte – Autorial Própria (2021).

Conforme observado na Figura 12, o valor da transcondutância de grandes sinais diminui a medida que o valor de x aumenta, ou seja, ela diminui a medida que a tensão DC aplicada ao componente com característica diferencial aumenta. Na Tabela 7 estão apresentados os valores da transcondutância de grandes sinais da Figura 12 e os valores apresentados em [9].

Tabela 7 – Característica Diferencial: Tabela de $\frac{G_m(x)}{g_m}$.

x	$\frac{G_m(x)}{g_m}$ Teórico	$\frac{G_m(x)}{g_m}$ Simulado
0,0	1,0000	1,0000
0,5	0,9848	0,9847
1,0	0,9424	0,9423
2,0	0,8116	0,8117
3,0	0,6739	0,6739
5,0	0,4702	0,4701
7,0	0,3493	0,3504
10,0	0,2502	0,2503

Fonte – Adaptado de CLARK e HESS (1971) [9].

Ao comparar os dados teóricos e experimentais apresentados na Tabela 7, percebe-se que os valores da transcondutância de grandes sinais normalizada pela transcondutância de pequenos sinais da característica diferencial simulada foram muito próximas aos valores apresentados em [9], sendo a maior divergência encontrada de 0,31% para x igual a 7. Portanto, concluí-se que a característica diferencial foi simulada com grande exatidão.

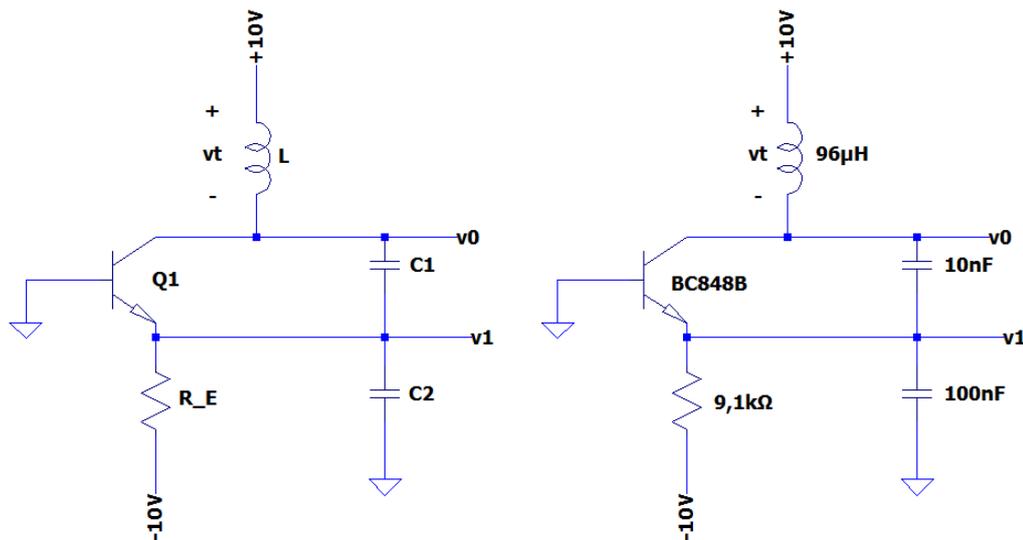
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar no levantamento da característica diferencial.

2.7 Montagem de um Oscilador Colpitts

Essa atividade consistiu na montagem de um Oscilador Colpitts em base comum para a análise da tensão de saída e determinação da resistência paralela do indutor.

O esquema do oscilador Colpitts está apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema do Oscilador Colpitts.



Fonte – Adaptado de CLARK e HESS (1971) [9].

Pelo circuito da Figura 13a), encontra-se que a corrente quiescente de emissor (I_{EQ}), a condutância de pequenos sinais (g_m) e a transcondutância de grandes sinais normalizada pela transcondutância de pequenos sinais ($\frac{G_m(x)}{g_m}$) são dadas pelas Equações 2.22, 2.23 e 2.24, respectivamente [9].

$$I_{EQ} = \frac{V_{BEQ} - (-10V)}{R_E} \quad (2.22)$$

$$g_m = \alpha \frac{qI_{EQ}}{kT} \quad (2.23)$$

$$\frac{G_m(x)}{g_m} = \frac{1}{R_L g_m n} \quad (2.24)$$

Em que V_{BEQ} é a tensão quiescente entre a base e o emissor do transistor, α é a razão entre as correntes do coletor e do emissor do transistor, R_L é a resistência paralela do indutor e n é a razão entre as amplitudes AC das tensões v_1 e v_t .

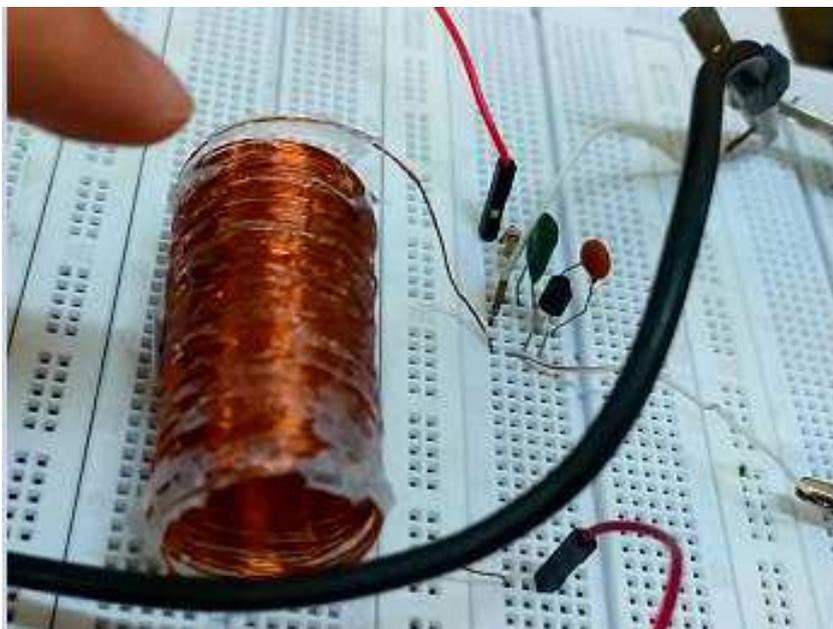
Com os dados da Figura 13b), calculou-se a capacitância equivalente e o valor da frequência de oscilação teórica do oscilador Colpitts. Estes dados estão apresentados nas Equações 2.25 e 2.26, respectivamente. Uma observação importante é que o valor de C_1 seja pelo menos 10 vezes menor que o valor de C_2 para que n seja muito menor do que 1 e a Equação 2.24 seja válida [9].

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{10 * 10^{-9} * 100 * 10^{-9}}{10 * 10^{-9} + 100 * 10^{-9}} = 9,09 nF \quad (2.25)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{96 * 10^{-6} * 9,09 * 10^{-9}}} = 170,37 kHz \quad (2.26)$$

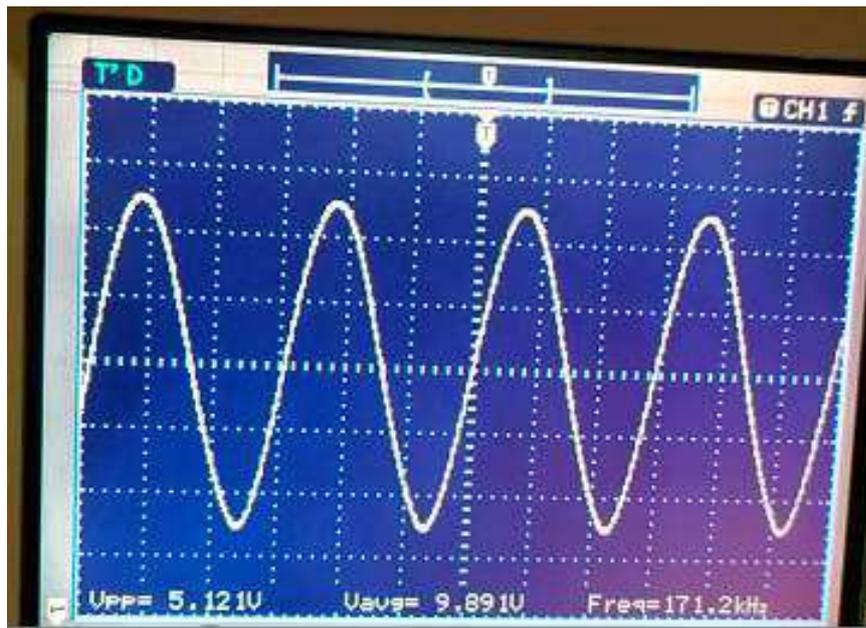
A montagem do oscilador Colpitts da Figura 13b) e a tensão de saída v_0 estão apresentadas nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Montagem do Oscilador Colpitts.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 15 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v0.

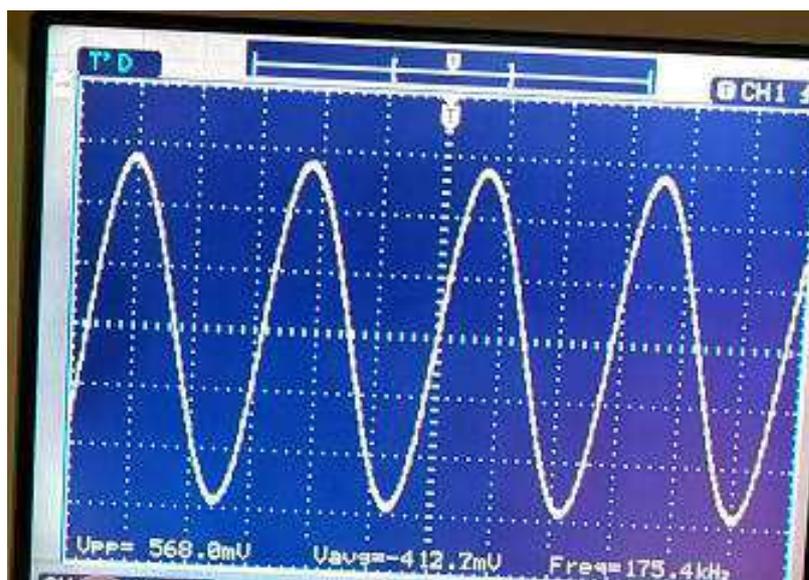


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 15, a tensão de saída foi uma onda senoidal com 2,56 V de amplitude com um nível DC de 9,9 V e uma frequência de oscilação de 171,20 kHz. Ao comparar a frequência de oscilação teórica (170,37kHz) com a experimental (171,20kHz), verifica-se uma margem de erro de 0,49%, representando uma grande exatidão.

Em sequência foi verificado a tensão sobre o capacitor C2 (v1), que está apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v1.



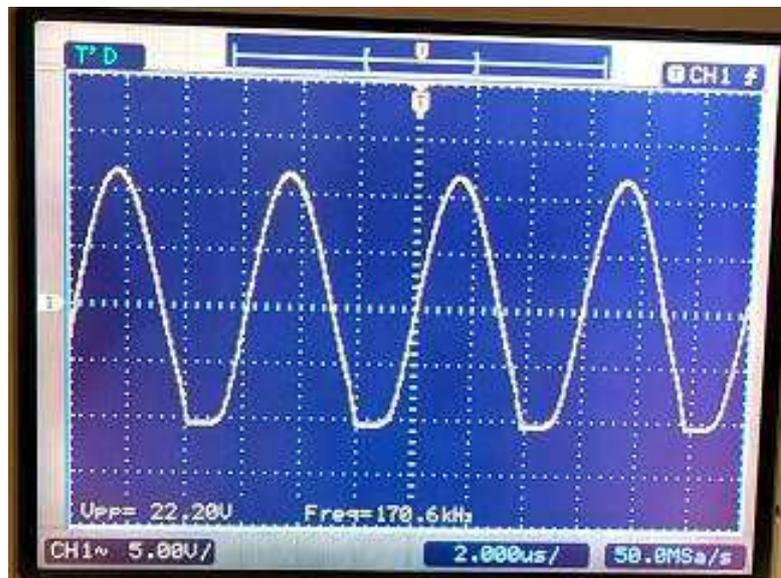
Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 16, a tensão sobre o capacitor C2 foi uma onda senoidal com amplitude de 284 mV (V1), nível DC de -412,7 mV (V_{BEQ}) e frequência de 175,4 kHz.

Com os dados obtidos da Figura 16, encontra-se que o valor de x , dado pela razão entre V1 e 26 mV, é de 10,92. Com o valor de x e o gráfico da Figura 11, encontra-se que $\frac{G_m(10,92)}{g_m}$ é 0,1733. Além disso, pela Equação 2.22, dado V_{BEQ} igual a -412,7 mV e R_E igual a 9,1 k Ω , encontra-se que I_{EQ} é 1,054 mA. Logo, pela Equação 2.23, considerando alfa igual a 1, encontra-se que a transcondutância de pequenos sinais é igual a 0,0405 S e, pela Equação 2.24, determina-se que a resistência paralela do indutor (R_L) é de 1,284 k Ω .

Em sequência, substituiu-se o resistor de 9,1 k Ω por um resistor de 1 k Ω em série com um potenciômetro de 100 k Ω . Na Figura 17 está apresentada a tensão de saída v0 para uma resistência no potenciômetro próxima a zero.

Figura 17 – Oscilador Colpitts: Tensão de Saída v0 Saturada.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 17, a tensão de saída v0 apresentou-se saturada. Além disso foi observado que quanto maior a resistência do potenciômetro, menor era a amplitude da tensão de saída v0 e quanto menor a resistência, maior a amplitude da tensão de saída v0.

Essa atividade permitiu a análise da tensão de saída v0 do oscilador Colpitts, a determinação da resistência paralela do indutor utilizado e a verificação da forma de onda do sinal de saída com a variação da resistência no emissor do transistor.

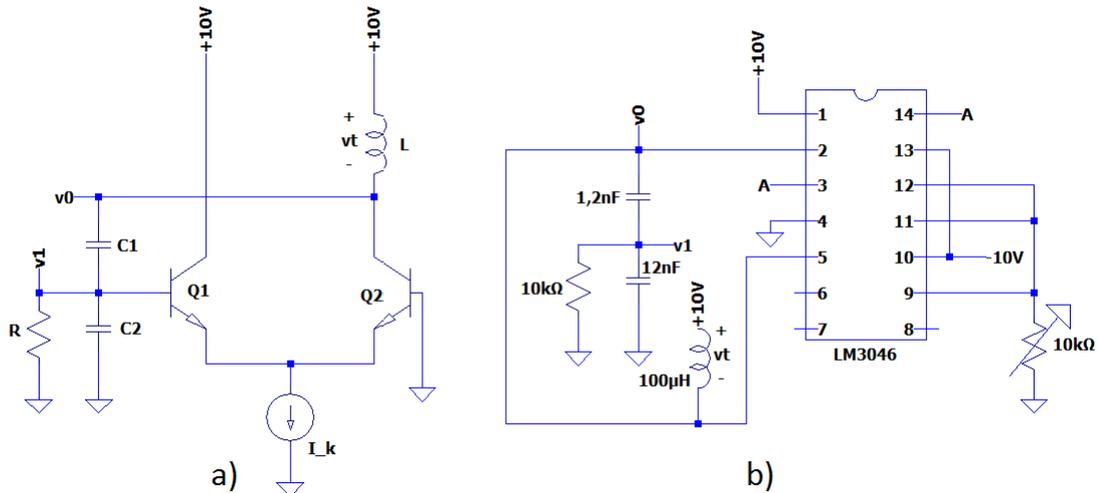
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um oscilador Colpitts.

2.8 Montagem de um Oscilador com Par Diferencial

Essa atividade consistiu na montagem de um oscilador com par diferencial para a análise da tensão de saída e determinação da resistência paralela do indutor.

O esquema do oscilador com par diferencial está apresentado na Figura 18, em que o LM3046 é um CI de transistores.

Figura 18 – Esquema do Oscilador com Par Diferencial.



Fonte – Adaptado de CLARK e HESS (1971) [9].

Pelo circuito da Figura 18a), encontra-se que a condutância de pequenos sinais (g_m) e a transcondutância de grandes sinais normalizada pela transcondutância de pequenos sinais ($\frac{G_m(x)}{g_m}$) são dadas pelas Equações 2.27 e 2.28, respectivamente [9].

$$g_m = \alpha \frac{qI_k}{4kT} \quad (2.27)$$

$$\frac{G_m(x)}{g_m} = \frac{1}{R_L g_m n} \quad (2.28)$$

Em que α é a razão entre as correntes do coletor e do emissor do transistor, R_L é a resistência paralela do indutor e n é a razão entre as amplitudes AC das tensões v_1 e v_t .

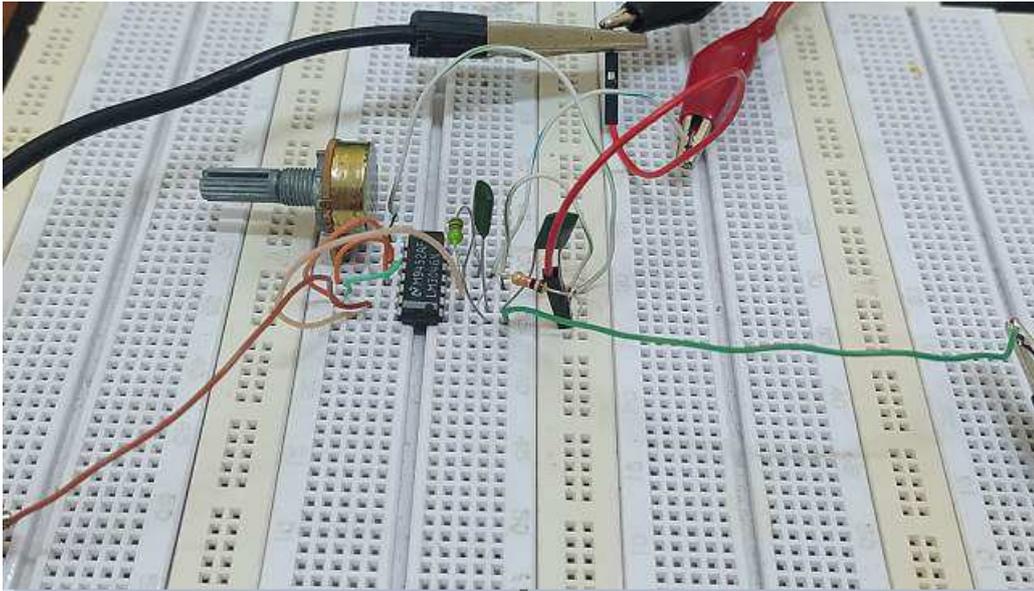
Com os dados da Figura 18b), calculou-se a capacitância equivalente e o valor da frequência de oscilação teórica do oscilador com par diferencial. Estes dados estão apresentados nas Equações 2.29 e 2.30, respectivamente. Uma observação importante é que o valor de C_1 seja pelo menos 10 vezes menor que o valor de C_2 para que n seja muito menor do que 1 e a Equação 2.28 seja válida [9].

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{12 * 10^{-9} * 1,2 * 10^{-9}}{12 * 10^{-9} + 1,2 * 10^{-9}} = 1,091 nF \quad (2.29)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 * 10^{-6} * 1,091 * 10^{-9}}} = 481,85kHz \quad (2.30)$$

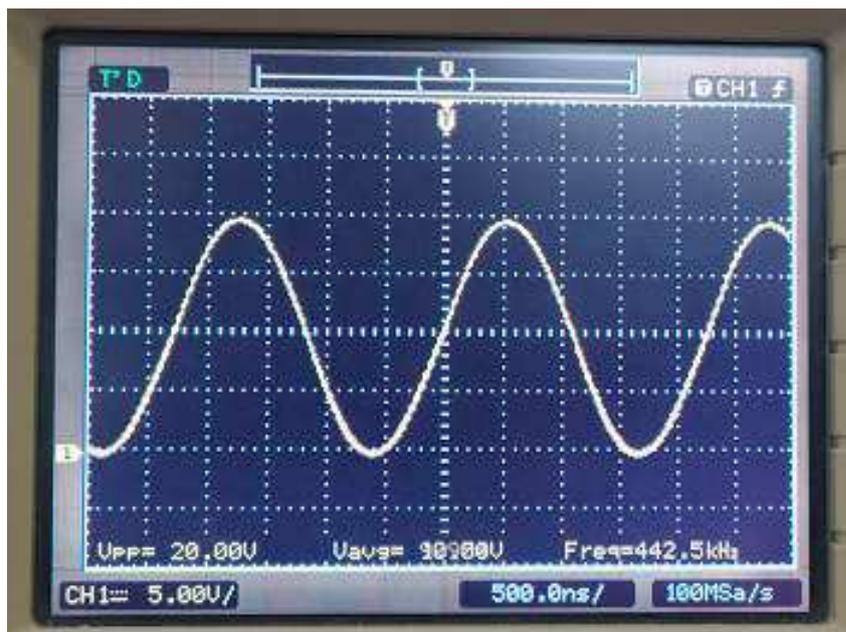
A montagem do esquema do oscilador com par diferencial da Figura 18b) está apresentada na Figura 19, em que a resistência do potenciômetro foi variada até se obter uma tensão de saída com amplitude de 10 V, que está apresentada na Figura 20.

Figura 19 – Montagem do Oscilador com Par Diferencial.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 20 – Oscilador com Par Diferencial: Tensão de Saída v0.

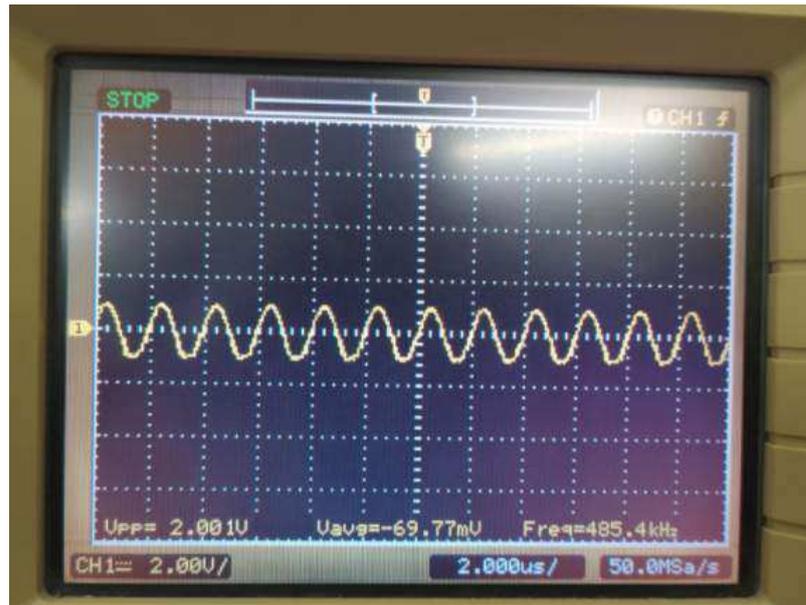


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 20, a tensão de saída foi uma onda senoidal com 10 V de amplitude, um nível DC de 10 V e uma frequência de oscilação de 442,5 kHz. Ao comparar a frequência de oscilação teórica (481,85 kHz) com a experimental (442,5 kHz), verifica-se uma margem de erro de 8,17%, representando uma boa exatidão.

Em sequência foi verificado a tensão sobre o capacitor C2 (v1), que está apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Oscilador com Par Diferencial: Tensão de Saída v1.



Fonte – Autoria Própria (2021).

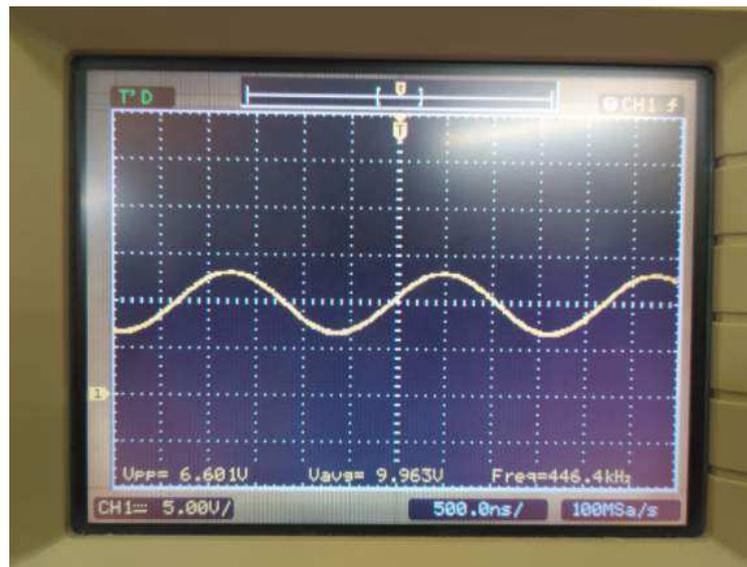
Conforme apresentado na Figura 21, a tensão sobre o capacitor C2 foi uma onda senoidal com amplitude de 1 V (V1), nível DC de -69,77 mV e frequência de 485,4 kHz.

Com os dados obtidos da Figura 16, encontra-se que o valor de x , dado pela razão entre V1 e 26 mV, é de 38,46. Com o valor de x e o gráfico da Figura 12, encontra-se que $\frac{G_m(38,46)}{g_m}$ é 0,06616.

Em sequência foi medido, no ponto A apresentado na Figura 18, a corrente da fonte de corrente (I_k), que foi igual a 4,3 mA e ocorreu para uma resistência no potenciômetro de 2,5k Ω . Logo, pela Equação 2.27, considerando alfa igual a 1, encontra-se que a transcondutância de pequenos sinais é igual a 0,04135 S e, pela Equação 2.28, determina-se que a resistência paralela do indutor (R_L) é de 4,017 k Ω .

Em seguida, verificou-se a menor amplitude da tensão de saída v0, que está apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Oscilador com Par Diferencial: Menor Amplitude da Tensão de Saída v0.

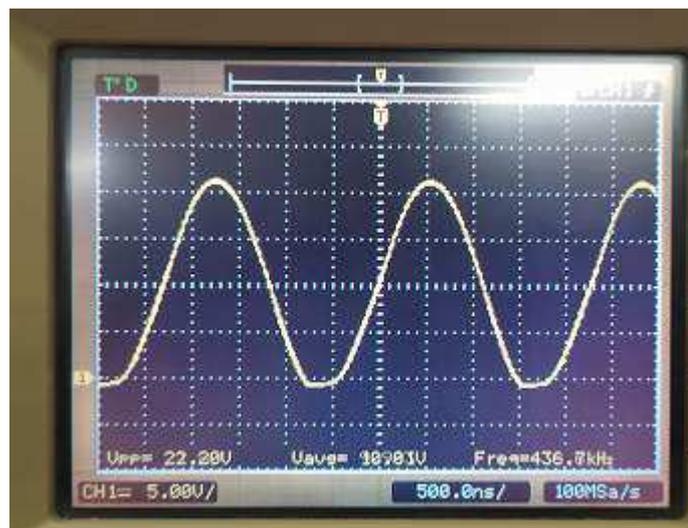


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 22, a menor amplitude da tensão de saída v0 foi 3,3 V. Essa amplitude ocorreu para uma corrente de 1,3 mA na fonte de corrente e uma resistência de 8,44 k Ω no potenciômetro. Foi também observado que ao aumentar a resistência do potenciômetro para valores acima de 8,44 k Ω , a tensão de saída v0 não sofria alteração.

Por fim, verificou-se o início da saturação da tensão de saída, que está apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Oscilador com Par Diferencial: Início da Saturação da Tensão de Saída v0.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 23, a tensão de saída v0 apresentou-se saturada. Essa saturação foi iniciada para uma corrente da fonte de corrente de 6,7 mA e uma resistência no potenciômetro de 1,8 k Ω .

Ao reunir as análises feitas nas Figuras 22 e 23, concluí-se que a corrente da fonte de corrente influencia a amplitude da tensão de saída v_0 , de forma que quanto maior for a sua corrente, maior será a amplitude da tensão de saída e quanto menor for sua corrente menor será a tensão de saída. Porém, verificou-se dois limites, o limite da saturação da tensão de saída (I_k igual a 6,67 mA) e o limite de 3,3 V da tensão de saída (I_k igual a 1,3 mA).

Essa atividade permitiu a análise da tensão de saída v_0 do oscilador com par diferencial, a determinação da resistência paralela do indutor utilizado e a análise da influência da corrente da fonte de corrente na amplitude da tensão de saída.

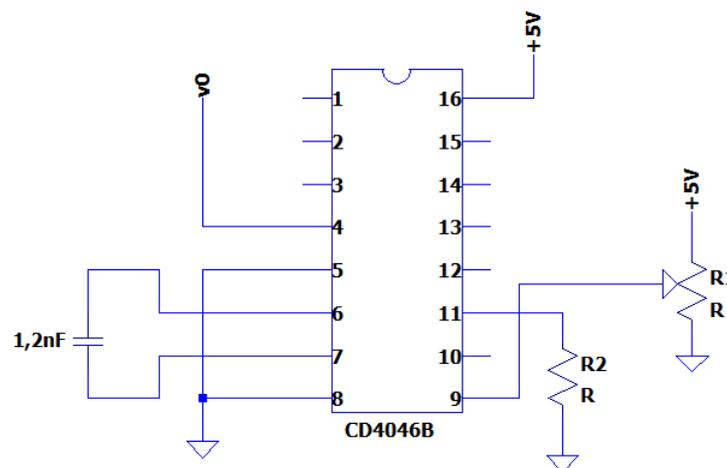
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um oscilador Colpitts.

2.9 Montagem de um Oscilador Controlado por Tensão

Essa atividade consistiu na montagem de um oscilador controlado por tensão (VCO) para a análise da frequência da tensão de saída em função da tensão de entrada.

O esquema do oscilador controlado por tensão está apresentado na Figura 24, em que o CD4046B é um oscilador PLL.

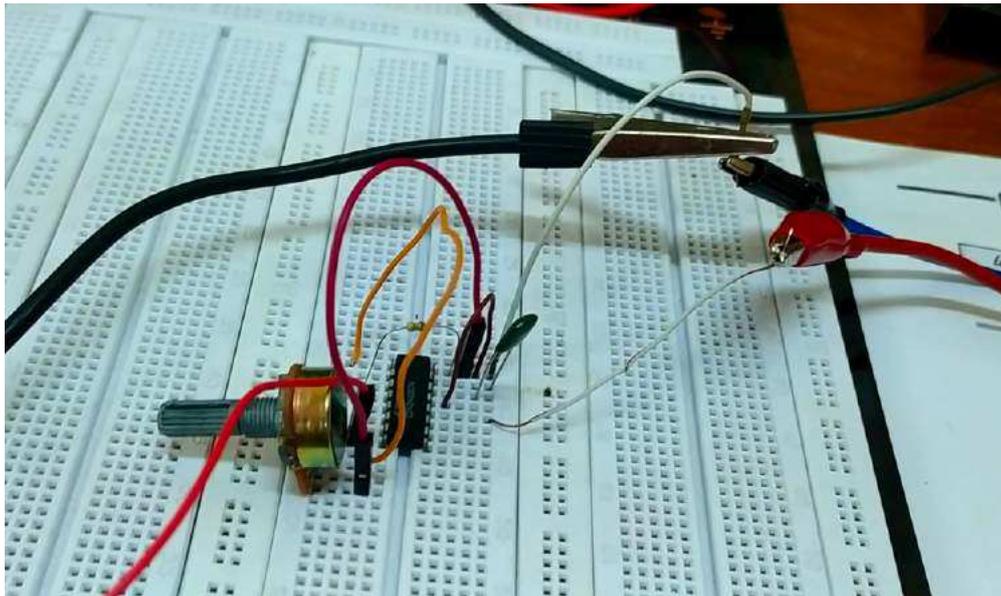
Figura 24 – Esquema do Oscilador Controlado por Tensão.



Fonte – Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2003) [10]

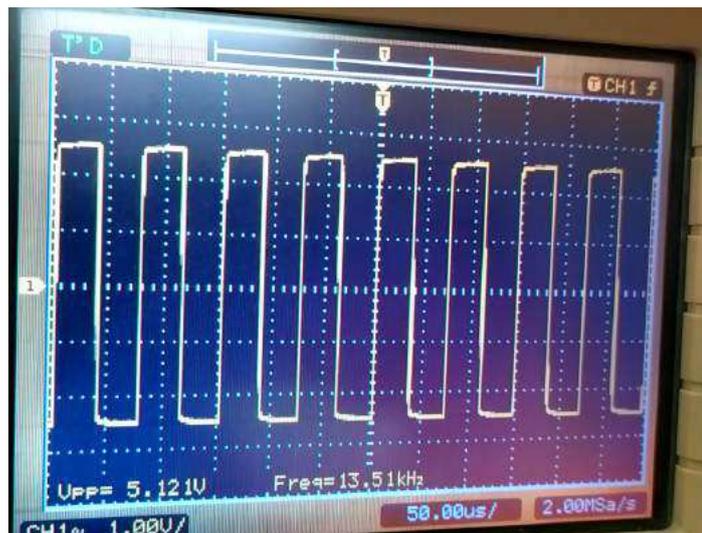
A montagem do esquema do oscilador controlado por tensão apresentado na Figura 24 e a tensão de saída para tensões de entrada de 5V e 2,5V estão apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27, respectivamente.

Figura 25 – Montagem do Oscilador Controlado por Tensão.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

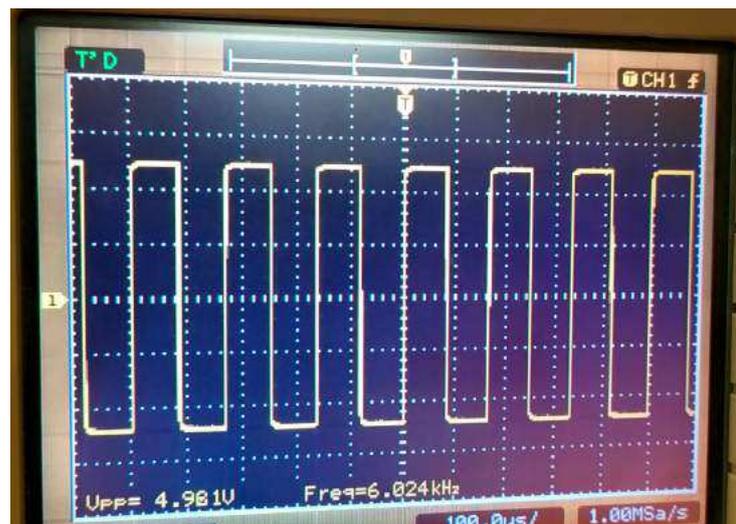
Figura 26 – Tensão de Saída v0 do VCO para 5 V no Pino 9.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 26, a tensão de saída v0 do CD4046B para uma tensão de entrada no pino 9 de 5 V é uma onda quadrada com amplitude pico a pico de 5,12 V com frequência de 13,51 kHz.

Figura 27 – Tensão de Saída v0 do VCO para 2,5 V no Pino 9.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 27, a tensão de saída v0 do CD4046B para uma tensão de entrada no pino 9 de 2,5 V é uma onda quadrada com amplitude pico a pico de 4,98 V com frequência de 6,024 kHz.

Em sequência foram verificados os valores das frequências de oscilação para outros valores de tensão sobre o pino 9. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – VCO: Frequência da Tensão de Saída em Função da Tensão no Pino 9.

V_9 (V)	f(kHz)
0,7	0,127
0,8	0,406
1,0	1,11
1,5	2,80
2,0	4,63
2,5	6,02
3,0	7,70
3,5	9,35
4,0	10,90
4,5	12,50
5,0	13,50

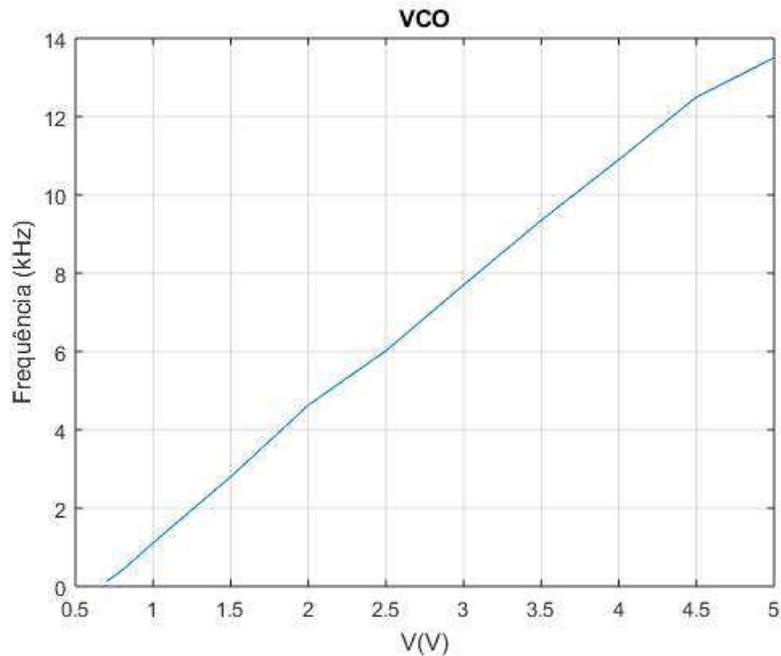
Fonte – Autoria Própria (2021).

Ao analisar as tensões de saída do VCO foi verificado que as mesmas apresentam amplitudes em torno de 5 V (tensão de alimentação do CD4046B) para tensões no pino 9 superiores a 0,7 V. Além disso, verificou-se que, ao aumentar a resistência do potenciômetro, a tensão sobre o pino 9 e a frequência da tensão de saída foram aumentadas, e ao diminuir a sua

resistência, a tensão sobre o pino 9 e a frequência da tensão de saída foram reduzidas. Logo, a tensão sobre o pino 9 controlou a frequência de oscilação da tensão de saída.

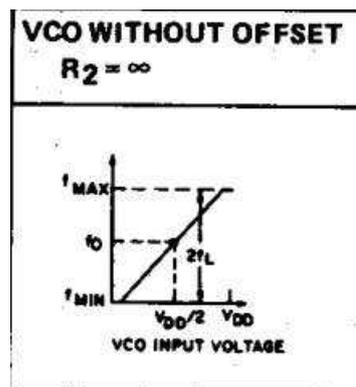
Nas Figuras 28 e 29 estão apresentadas o gráfico da Tabela 8 e o gráfico de frequência em função da tensão presente no *datasheet* do CD4046B [10], respectivamente.

Figura 28 – VCO: Frequência da Tensão de Saída em Função da Tensão no Pino 9.



Fonte – Autorial Própria (2021).

Figura 29 – VCO: Frequência em Função da Tensão de Entrada.



Fonte – TEXAS INSTRUMENTS (2003) [10].

Ao analisar a Figura 29 e os dados da Tabela 8, verifica-se que a frequência central teórica é dada pela Equação 2.31.

$$f_0 = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} = \frac{13500 - 127}{2} = 6,69kHz \quad (2.31)$$

Conforme apresentado no gráfico da Figura 28, a frequência da tensão de saída do VCO varia linearmente em função da tensão de entrada do pino 9 do CD4046B, assim como apresentado na Figura 29. Além disso, a frequência central experimental, frequência da tensão de saída para qual a tensão de entrada fosse de 2,5 V, foi de 6,02 kHz, apresentando um erro de 10% em relação a frequência teórica de 6,69 kHz, calculada na Equação 2.31, apresentando uma boa exatidão.

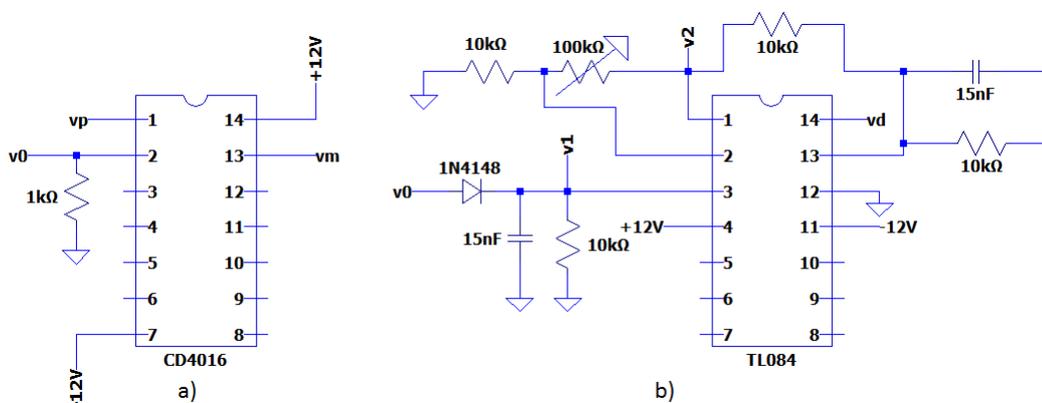
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um oscilador controlado por tensão.

2.10 Montagem de um Modulador e de um Demodulador ASK

Essa atividade consistiu na montagem de um modulador e demodulador ASK para a análise dos sinais modulado e demodulado.

O esquema do modulador e demodulador ASK estão apresentados nas Figuras 30a) e 30b), respectivamente, em que o CD4016 é um CI de chaves analógicas e o TL084 é um CI de amplificadores operacionais.

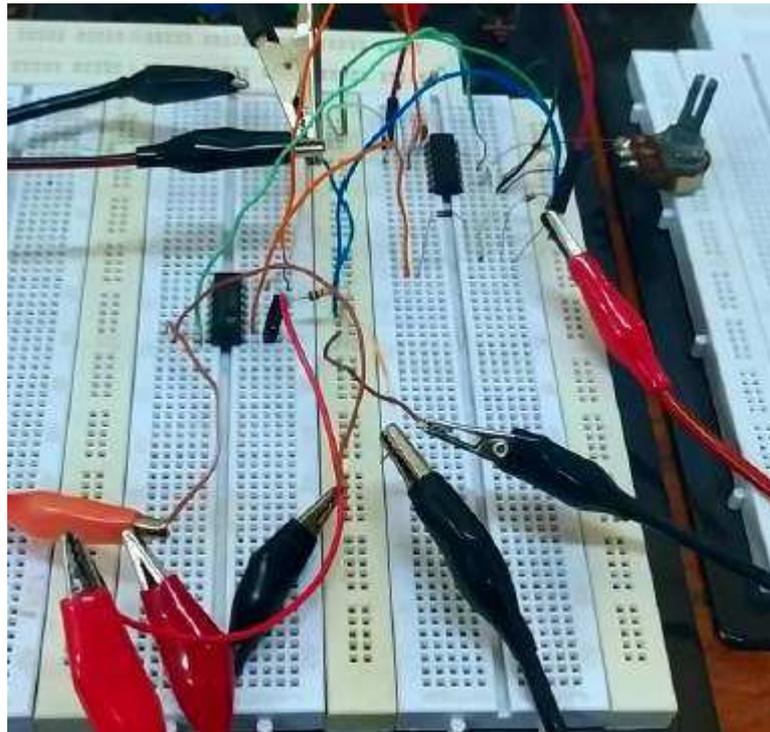
Figura 30 – Esquema da Modulador ASK a) Modulador e b) Demodulador.



Fonte – Adaptado de TOGNERI (2005) [11]

A montagem do esquema do modulador e do demodulador ASK da Figura 30 está apresentada na Figura 31, em que colocou-se no pino 13 um sinal quadrado (sinal modulante) com uma tensão de 1 V de pico com frequência de 200 Hz e, no pino 1, um sinal senoidal (portadora) de 1 V de pico com frequência de 100 kHz.

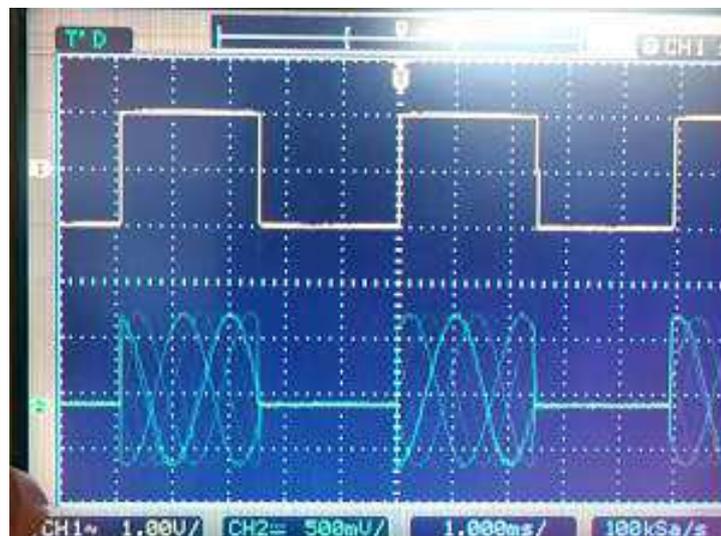
Figura 31 – Montagem do Modulador e Demodulador ASK.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

O sinal modulado em ASK e o sinal modulante estão apresentados na Figura 32.

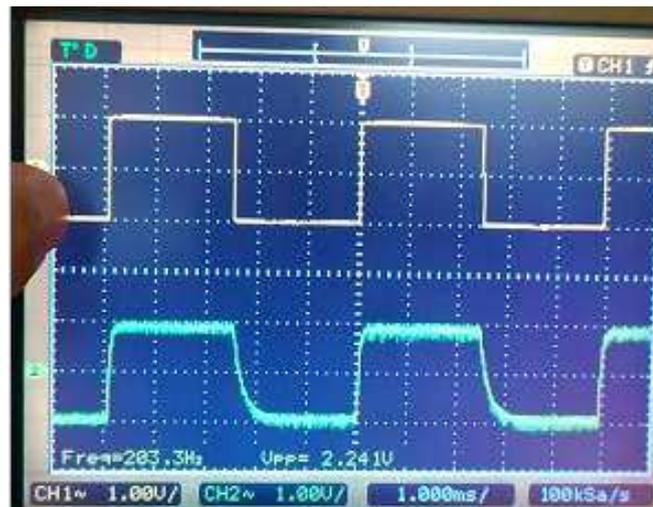
Figura 32 – Modulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Modulado (verde).



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 32, o sinal modulado (verde) em ASK apresenta o sinal da portadora para um nível de 1 V do sinal modulante (amarelo), ou seja, a chave analógica está fechada; e 0 V para um nível de -1 V do sinal modulante, ou seja, a chave analógica está aberta. O sinal modulante e o sinal demodulado v2 estão apresentados na Figura 33.

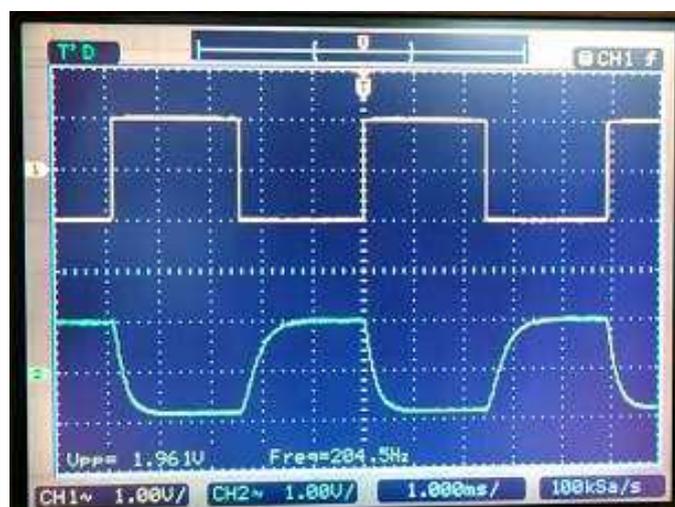
Figura 33 – Demodulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Demodulado v2 (verde).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 33, ao passar pelo detector de envoltória, o sinal modulado é demodulado e, ao passar pelo amplificador não inversor, o sinal demodulado tem sua amplitude ajustada - por meio da alteração da resistência do potenciômetro - para ser igual a amplitude da modulante (amarelo). O ajuste da amplitude do sinal demodulado foi feito devido ao fato de que o sinal demodulado pelo detector de envoltória apresentou uma atenuação proveniente do filtro passa baixa passivo com frequência de corte de 1,061 kHz. Além disso, o formato irregular da tensão de saída v2 ocorreu devido ao fator de *Ripple* e ao efeito de *Clipping* que ocorrem pelo efeito de descarga do capacitor que é inerente aos circuitos RC [11]. Nessa etapa, a tensão de saída v2 também apresentou ruído resultante da demodulação no detector de envoltória. Na Figura 34 está apresentado sinal demodulado após passar pelo filtro passa baixa ativo.

Figura 34 – Demodulador ASK: Sinais Modulante (amarelo) e Demodulado vd (verde).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 34, ao passar pelo filtro passa baixa ativo com frequência de corte de 1,061 kHz, o ruído apresentado no sinal demodulado (verde) da Figura 33 foi removido.

Logo, observou-se que foi possível realizar a modulação ASK com o circuito apresentado e, em seguida, recuperar o sinal modulante sem ruído e com a amplitude original. Além disso, verificou-se que, ao alterar a frequência do sinal modulante, o circuito do demodulador conseguia recuperar esse sinal, desde que o mesmo apresentasse uma frequência menor que a frequência de corte dos filtros passa baixa utilizados.

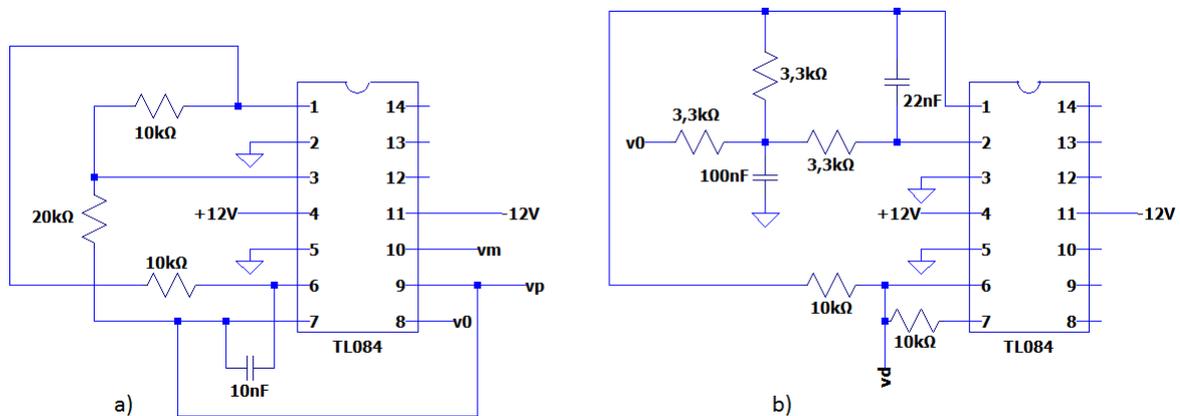
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um modulador e demodulador ASK.

2.11 Montagem de um Modulador e de um Demodulador PWM

Essa atividade consistiu na montagem de um modulador e demodulador PWM para a análise dos sinais modulado e demodulado.

O esquema do modulador e do demodulador PWM estão apresentados nas Figuras 35a) e 35b), respectivamente, em que o TL084 é um CI de amplificadores operacionais.

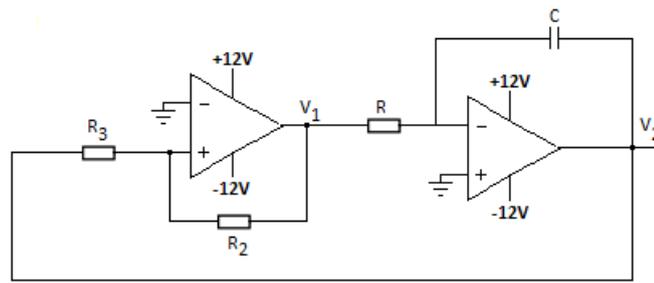
Figura 35 – Modulação PWM.



Fonte – Adaptado de HART (2010) [12].

Inicialmente foi calculado a frequência de oscilação (f_0) e a amplitude (V_2) teóricas da onda triangular apresentada na Figura 36, por meio das Equações 2.32 e 2.33, respectivamente.

Figura 36 – Circuito do gerador de Onda Triangular.



Fonte – Adaptado de HART (2010) [12].

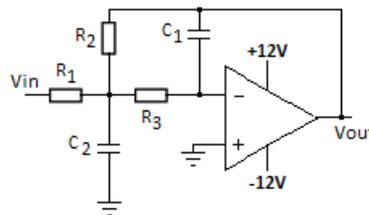
$$f_0 = \frac{R_2}{R_3} \frac{1}{4RC} \quad (2.32)$$

$$V_2 = 12 \frac{R_3}{R_2} \quad (2.33)$$

De acordo com as Equações 2.32 e 2.33 e os valores apresentados na Figura 35a), encontra-se que $f_{0teorico} = 5 \text{ kHz}$ e $V_{2teorico} = 6 \text{ V}$.

Em seguida foi calculado a frequência de corte f_c do circuito do filtro ativo passa baixa de segunda ordem com tipologia MFB [13] apresentado na Figura 37 segundo a Equação 2.34.

Figura 37 – Filtro Ativo Passa Baixa de Segunda Ordem Topologia MFB.



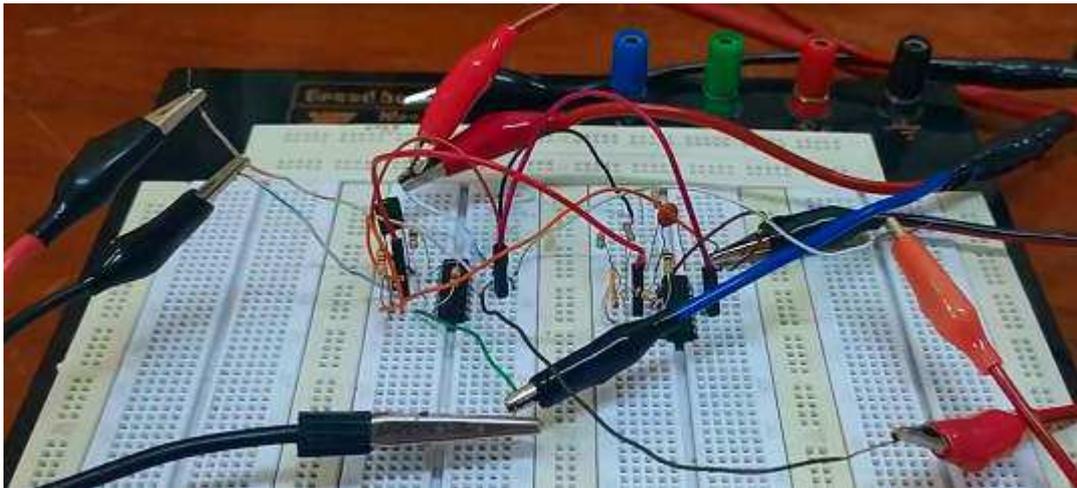
Fonte – Adaptado de NOCETI (2017) [13]

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_3}} \quad (2.34)$$

De acordo com a Equação 2.34 e os valores apresentados na 35b), encontra-se que $f_{cteorico} = 1,028 \text{ kHz}$.

A montagem do esquema do modulador e do demodulador PWM da Figura 35 está apresentada na Figura 38, em que colocou-se em vm um sinal senoidal (sinal modulante) com amplitude de 4 V e frequência de 1 kHz.

Figura 38 – Montagem do Modulador e Demodulador PWM.



Fonte – Autoria Própria (2021).

O sinal modulado em PWM, o sinal modulante e o sinal da portadora estão apresentados na Figura 39.

Figura 39 – Modulador PWM: Sinais da Portadora (amarelo), Modulante (verde) e Modulado (azul).

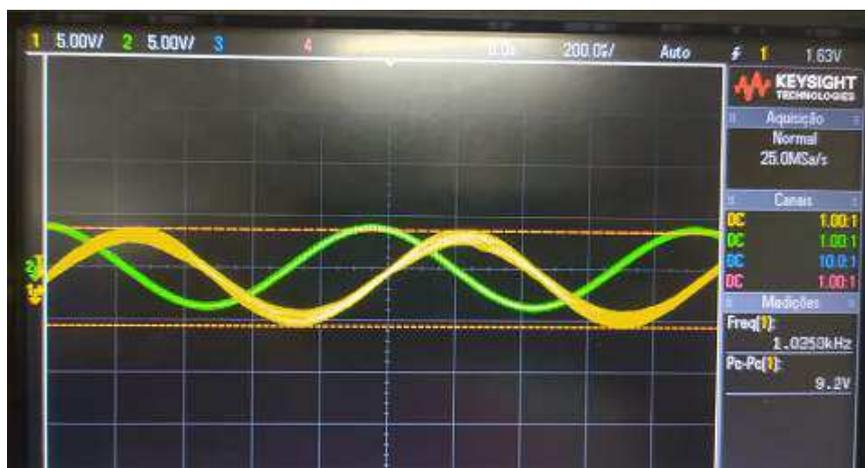


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 39, o sinal modulado (azul) em PWM é uma onda quadrada de 12 V de pico, tensão correspondente à alimentação do amplificador operacional, devido à sua utilização como comparador de tensão. O sinal PWM foi de -12 V quando a portadora (amarelo) teve uma amplitude maior que a do sinal modulante (verde) e 12 V quando o sinal modulante possuía uma amplitude maior que o sinal da portadora. Além disso, verificou-se que ao variar a frequência do sinal modulante, o sinal PWM foi alterado, uma vez que as regiões em que a amplitude da portadora foi maior ou menor que a do sinal modulante foram modificadas.

Verifica-se na Figura 39 que a amplitude da onda triangular é de 5,5 V, 8,3% menor do que o valor teórico calculado de 6 V, e sua frequência é de 5,018 kHz, 0,36% maior do que o valor teórico calculado de 5 kHz, ou seja, a onda triangular obtida apresentou boa exatidão. A comparação do sinal modulante e do sinal demodulado está apresentada na Figura 40.

Figura 40 – Demodulador PWM: Sinais Modulante (verde) e Demodulado (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 40, o sinal demodulado (amarelo) apresentou um atraso em relação ao sinal modulante (verde), devido ao atraso RC inerente ao filtro passa baixa, e sua frequência foi de 1,036 kHz, 3,6% maior do que a da modulante. Além disso, observa-se que a amplitude do sinal demodulado foi de 4,6 V, 15% maior do que a da modulante. Outro fato observado foi à presença de ruído nos pontos de máximo e mínimo do sinal demodulado, que deve-se aos fios utilizados na atividade.

Logo, observou-se que foi possível realizar a modulação PWM com o circuito apresentado e, em seguida, recuperar o sinal modulante com um atraso, um pouco de ruído e a amplitude próxima da original. Além disso, verificou-se que, ao aumentar a frequência do sinal modulante, o circuito do demodulador conseguia recuperar esse sinal desde que o mesmo apresentasse uma frequência menor que a frequência de corte de 1,028 kHz do filtro passa baixa utilizado, porém a amplitude desse sinal apresentava-se atenuada em relação ao sinal modulante.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um modulador e demodulador PWM.

2.12 Módulos Didáticos da Falcon

Os módulos didáticos da Falcon são sistemas para o desenvolvimento de experimentos de fundamentos de telecomunicações. Cada unidade consiste em um conjunto de módulos, cada um incluindo um ou mais blocos funcionais típicos de sistemas de comunicação [14].

O sistema é altamente inovador do ponto de vista tecnológico e educacional. Os módulos são usados como blocos básicos para construir de forma flexível os diferentes sistemas de comunicação [14].

Os únicos instrumentos externos necessários são uma fonte de alimentação e um osciloscópio. Os circuitos restantes e instrumentos (Gerador de funções, RF, filtros, microfone, alto falante, etc.) já estão incluídos nos módulos [14].

Os módulos a serem trabalhados são:

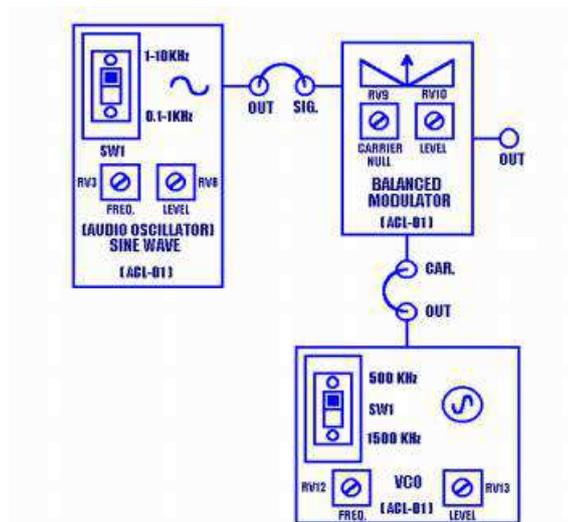
- *Amplitude Modulation Transmitter Kit* - ACL 01 [14];
- *Amplitude Demodulation Receiver Kit* - ACL 02 [14];
- *Frequency Modulation Transmitter Kit* - ACL 03 [15];
- *Frequency Demodulation Receiver Kit* - ACL 04 [15].

2.12.1 Modulação e Demodulação com Detector de Envoltória AM-DSB

Essa atividade consistiu na montagem do modulador e do demodulador AM-DSB utilizando os módulos Falcon ACL 01 e ACL 02 para a análise dos sinais modulado e demodulado.

Na primeira etapa foi montado o diagrama de blocos apresentado na Figura 41 com o módulo ACL 01, que foi conectado à fonte de alimentação.

Figura 41 – Diagrama de Blocos do Gerador AM-DSB.

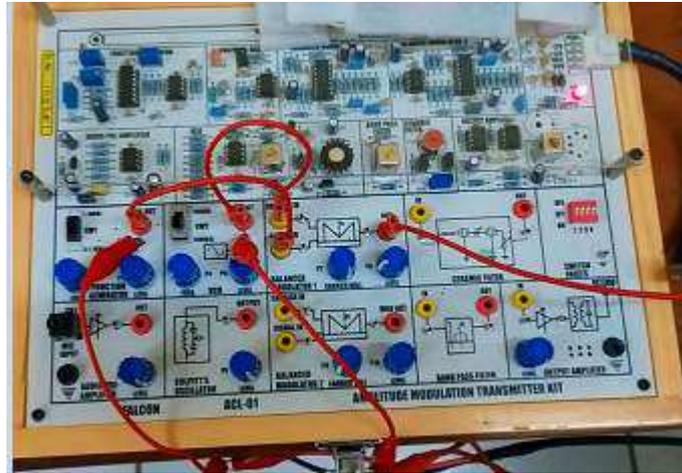


Fonte – Adaptado de FALCON (2005) [14].

A montagem do diagrama de blocos da Figura 41 está apresentada na Figura 42, em que foram colocados um sinal modulante senoidal de 0,25 V com frequência de 1 kHz no bloco *SINE WAVE* e um sinal de 0,5 V com frequência de 450 kHz no VCO, com chave em 500 kHz e foram

ajustados os potenciômetros *CARRIER NULL* e *LEVEL* do modulador balanceado para o valor máximo (sentido horário), de modo a obter um sinal modulado sem supressão da portadora e com a maior amplitude possível.

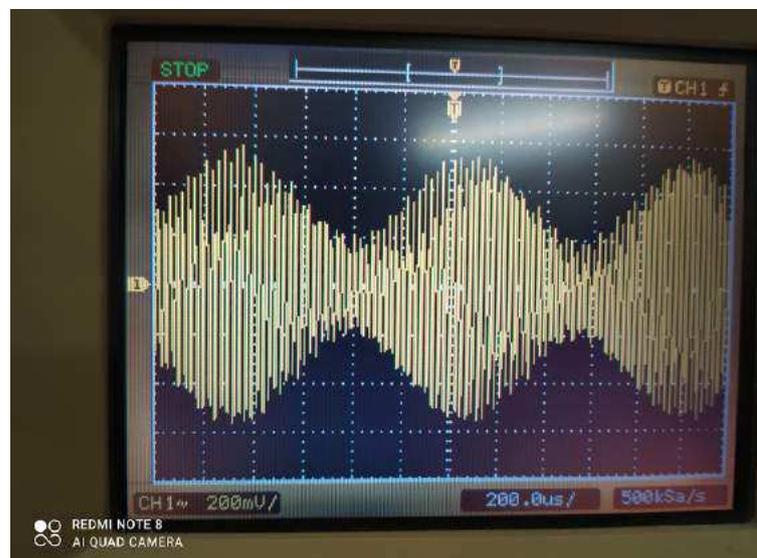
Figura 42 – Montagem 1 - Modulador AM-DSB.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Na Figura 43 está apresentado o sinal modulado.

Figura 43 – Montagem 1 - Sinal Submodulado.

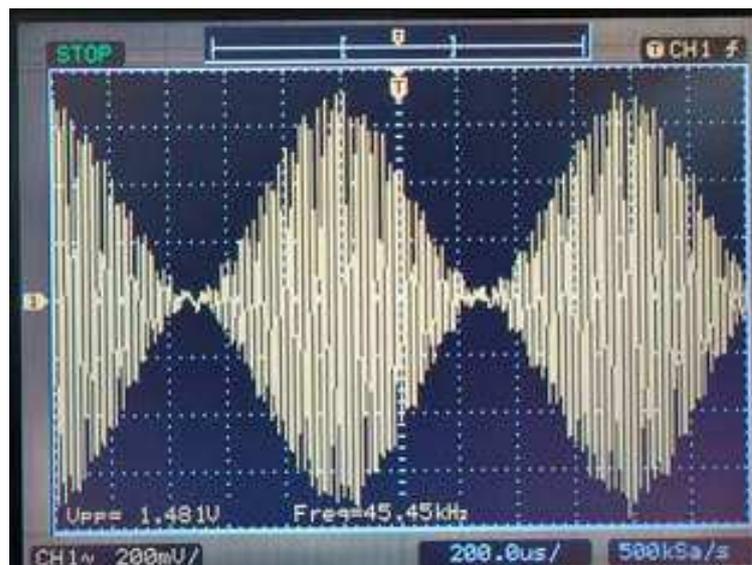


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 43, o sinal modulado AM-DSB apresenta uma submodulação para um sinal modulante de 0,25 V, ou seja, ele não apresenta distorções na envoltória, porém há um gasto desnecessário de potência para sua transmissão uma vez que a região de menor amplitude não é igual a zero.

Em sequência, a amplitude do sinal modulante foi variada de modo a obter os sinais modulados apresentados nas Figuras 44 e 45, respectivamente.

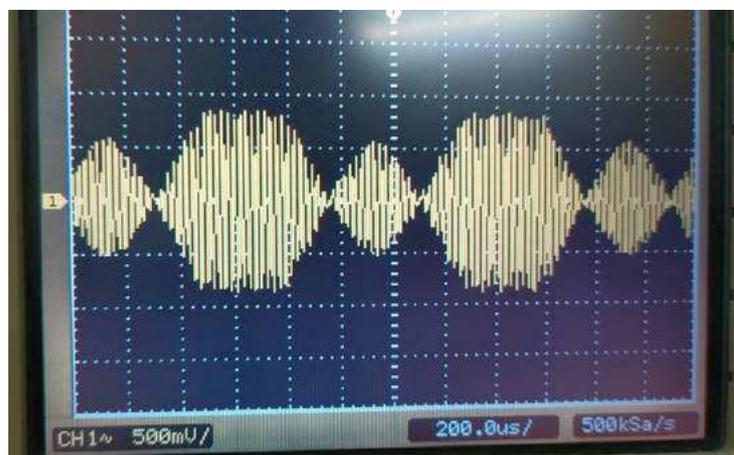
Figura 44 – Montagem 1 - Sinal 100% Modulado.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 44, o sinal de saída do modulador balanceado para um sinal modulante senoidal de 0,5 V foi um sinal 100% modulado, ou seja, ele não apresenta distorções na envoltória e o gasto de potência para sua transmissão é minimizado uma vez que a região de menor amplitude é igual a zero.

Figura 45 – Montagem 1 - Sinal Sobremodulado.

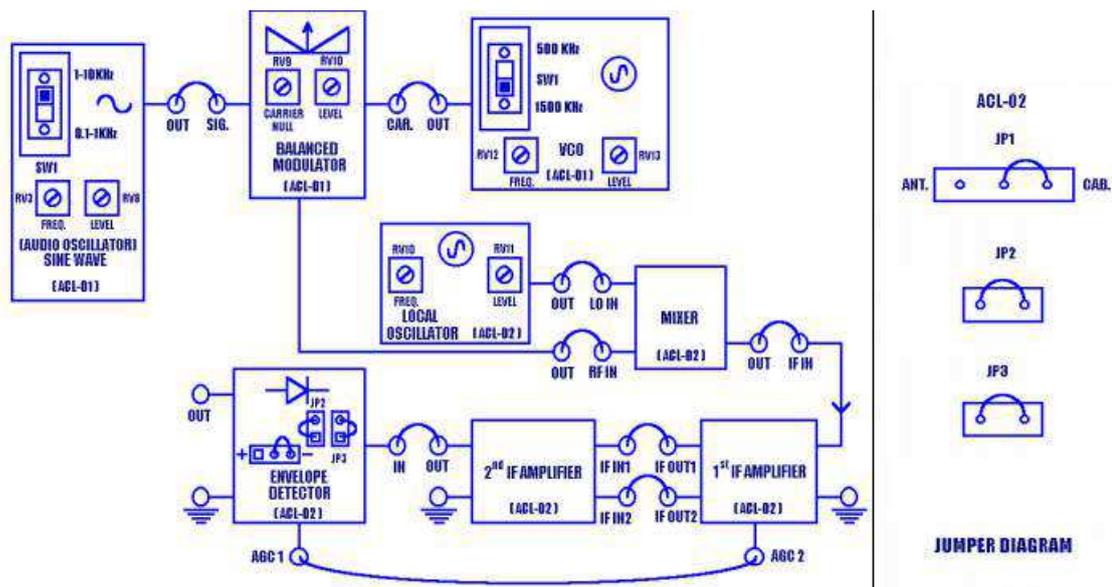


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 45, o sinal de saída do modulador balanceado para o sinal modulante senoidal de 1,23 V foi um sinal sobremodulado, ou seja, ele apresenta distorções na envoltória, saturação e inversões de fase.

Na segunda etapa foi montado o diagrama de blocos apresentado na Figura 46 com os módulos ACL 01 e ACL 02.

Figura 46 – Diagrama de Blocos do Receptor AM-DSB Usando Detector de Envoltória via Cabo.



Fonte – Adaptado de FALCON (2005) [14].

A montagem do demodulador AM-DSB do diagrama de blocos da Figura 46 está apresentada na Figura 47, em que foram colocados um sinal modulante senoidal de 0,25 V com frequência de 1 kHz no bloco *SINE WAVE* e um sinal de 0,5 V com frequência de 550 kHz no VCO, com chave em 1500 kHz e foram ajustados os potenciômetros *CARRIER NULL* no valor máximo e *LEVEL* de modo a obter uma amplitude de 25 mV no sinal de saída do modulador balanceado. Além disso, o oscilador local do ACL 02 foi ajustado de modo a gerar um sinal com amplitude de 1 V e frequência de 1 MHz.

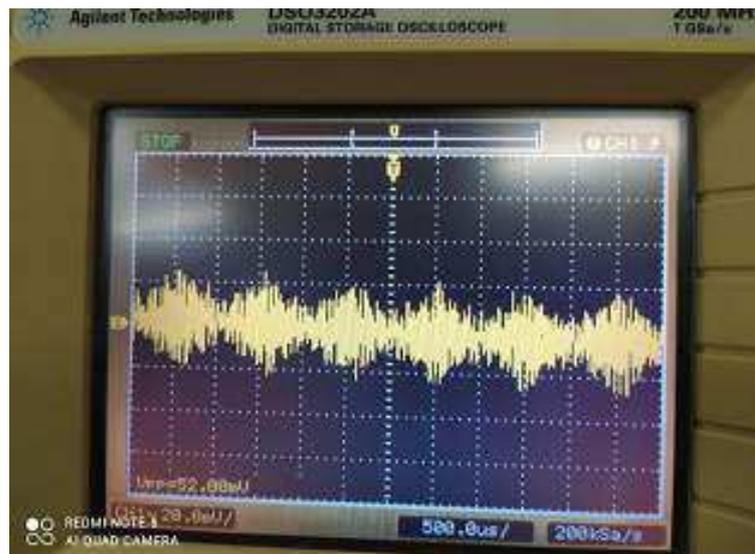
Figura 47 – Montagem 2 - Demodulador AM-DSB.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Na Figura 48 está apresentado o sinal de saída do modulador balanceado.

Figura 48 – Montagem 2 - Sinal Modulado.

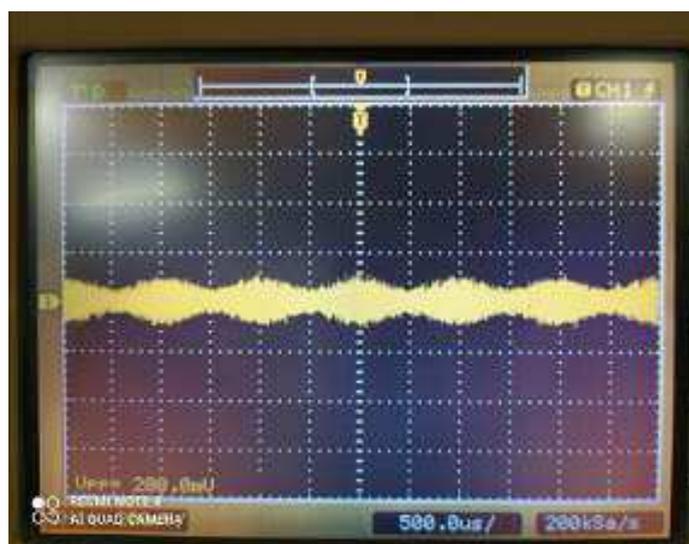


Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 48, o sinal de saída do modulador balanceado foi um sinal submodulado com amplitude máxima de 26 mV.

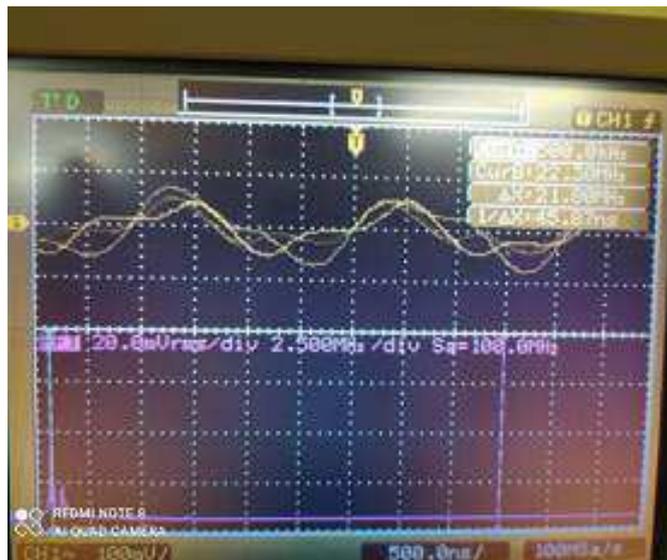
Em sequência, o sinal modulado apresentado na Figura 48 passou por um misturador para converter a frequência do sinal na frequência de operação dos amplificadores IF (455 kHz). Estes amplificaram o sinal modulado, que foi demodulado pelo detector de envoltória, tanto pela envoltória positiva quanto pela negativa. O sinal e sua FFT na saída do misturador, o sinal de saída do segundo amplificador IF e os sinais demodulados pelas envoltórias negativa e positiva do detector de envoltória estão apresentados nas Figuras 49, 50, 51, 52 e 53, respectivamente.

Figura 49 – Montagem 2 - Sinal de Saída do Misturador.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

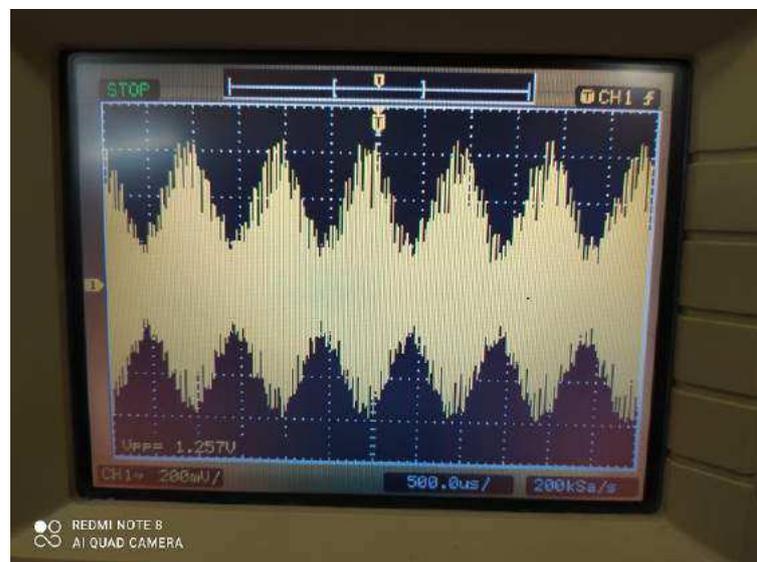
Figura 50 – Montagem 2 - FFT do Sinal de Saída do Misturador.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Como apresentado nas Figuras 49 e 50, o sinal de saída do misturador amplificou o sinal modulado apresentado na Figura 48 em 300% e deslocou a frequência central do sinal modulado para cerca de 500kHz.

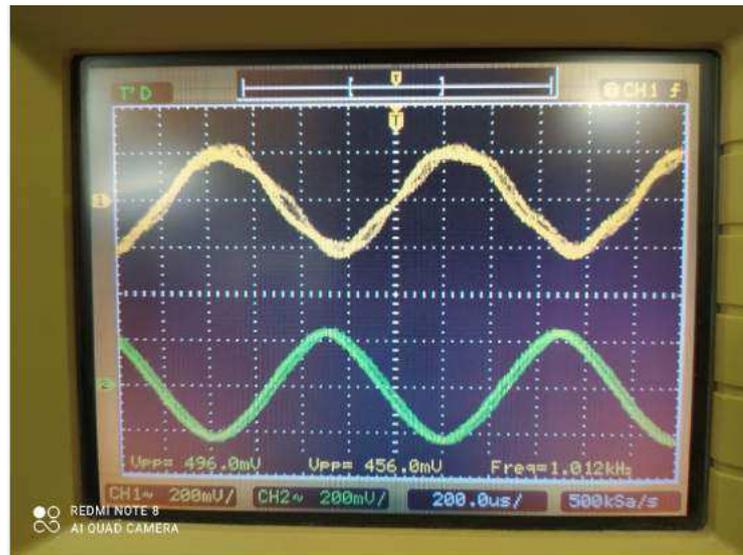
Figura 51 – Montagem 2 - Sinal de Saída do Segundo Amplificador IF.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 51, os dois amplificadores IF foram responsáveis por amplificar o sinal de saída do misturador apresentado na Figura 50 em 528,5%.

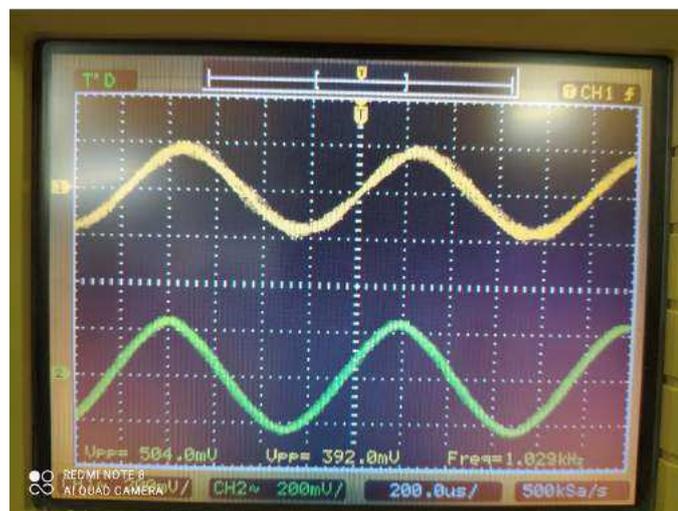
Figura 52 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pela Envoltória Positiva (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 52, o sinal demodulado pela envoltória positiva (amarelo) apresentou a forma de onda senoidal com uma frequência 1,2% maior, amplitude 8% menor e defasado de 180° em relação à modulante (verde).

Figura 53 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pela Envoltória Negativa (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

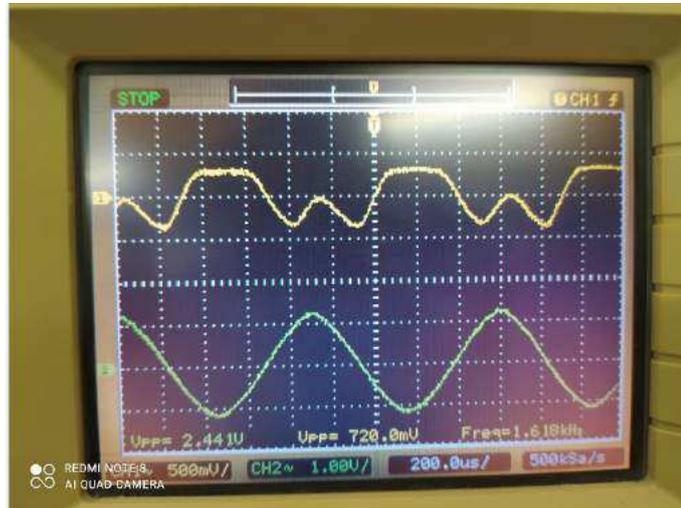
Conforme apresentado na Figura 53, o sinal demodulado pela envoltória positiva (amarelo) apresentou a forma de onda senoidal com uma amplitude 22,22% menor, frequência 2,9% maior e em fase em relação à modulante (verde).

A atenuação e as distorções obtidas pela demodulação em ambas as envoltórias foram causadas devido ao fator de *Ripple* e ao efeito de *Clipping* que ocorrem pelo efeito de descarga

do capacitor do filtro passa baixa do detector de envoltória que é inerente aos circuitos RC [11].

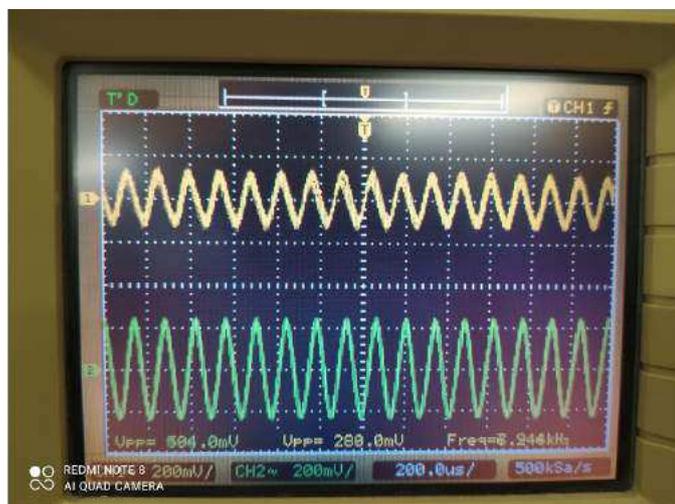
Em sequência, variou-se a amplitude e a frequência do sinal modulante. Nas Figuras 54 e 55 estão apresentadas os resultados das variações de amplitude e frequência, respectivamente.

Figura 54 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Distorcido (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 55 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Atenuado (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Ao aumentar a amplitude do sinal modulante, o sinal demodulado começou a apresentar distorções causadas pela sobremodulação, conforme apresentado na Figura 54. Já ao aumentar a frequência do sinal modulante, o sinal demodulado apresentou-se bastante atenuado devido à frequência de corte de 1kHz do filtro passa baixa, conforme apresentado na Figura 55.

Logo, observou-se que foi possível realizar a modulação AM-DSB com os módulos ACL 01 e ACL 02 e, em seguida, recuperar o sinal modulante pelo detector de envoltória com uma boa exatidão em relação a frequência de oscilação. Também foi possível verificar o comportamento dos sinais modulado e demodulado com a variação da amplitude do sinal modulante.

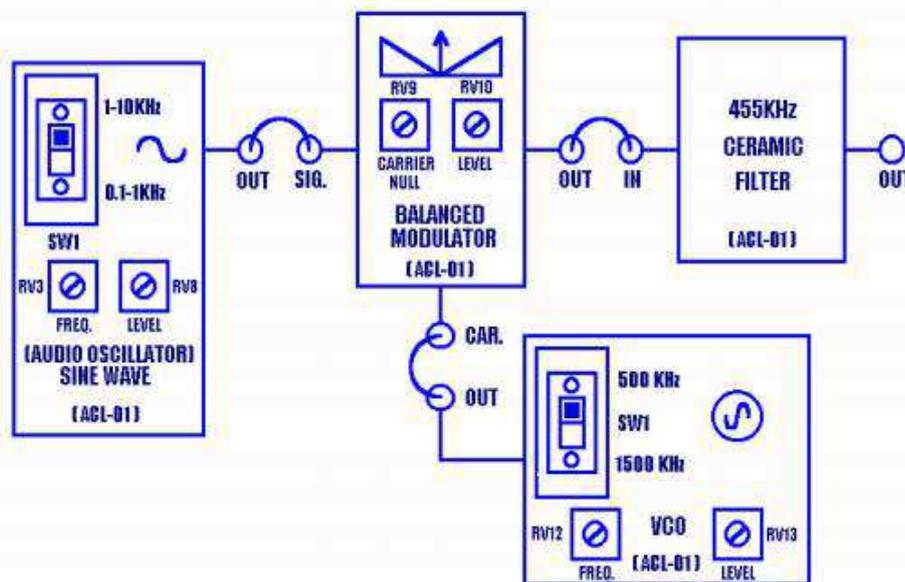
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#), [vídeo 1](#) e [vídeo 2](#) para auxiliar na montagem de um modulador e demodulador AM-DSB com os módulos Falcon ACL 01 e ACL 02.

2.12.2 Modulação e Demodulação com Detector de Produto AM-SSB

Essa atividade consistiu na montagem de um modulador e de um demodulador AM-SSB com os módulos Falcon ACL 01 e ACL 02 para a análise dos sinais modulado e demodulado.

Na primeira etapa foi montado o diagrama de blocos apresentado na Figura 56 com o módulo ACL 01, que foi conectado à fonte de alimentação.

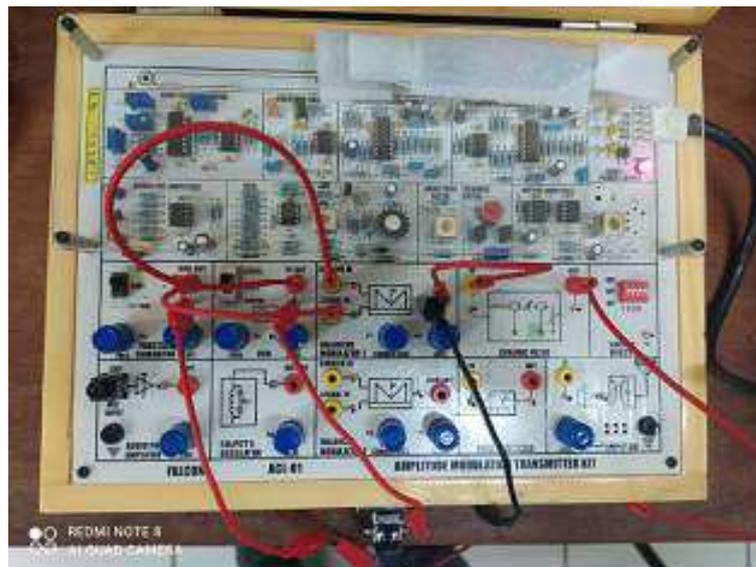
Figura 56 – Diagrama de Blocos do Gerador AM-SSB.



Fonte – Adaptado de FALCON (2005)falcon1.

A montagem do diagrama de blocos da Figura 56 está apresentada na Figura 57, em que foi colocado um sinal modulante senoidal de 0,5 V com frequência de 3 kHz e, no VCO, com chave em 500 kHz, foi colocado um sinal de 1 V com frequência de 455 kHz.

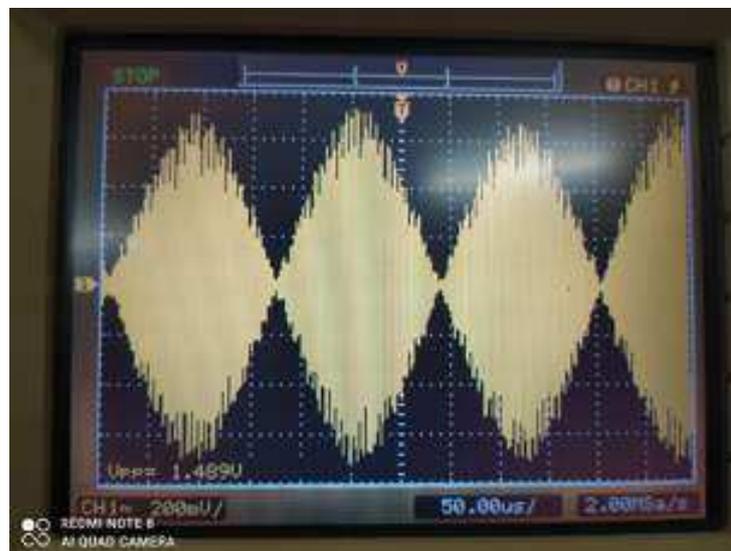
Figura 57 – Montagem 1 - Modulador AM-SSB.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 42, o *CARRIER NULL* do modulador balanceado foi ajustado para a posição central e o *LEVEL* foi posicionado totalmente no sentido horário, com o objetivo de obter o sinal AM com supressão da portadora e com amplitude máxima. Na Figura 43 está apresentado o sinal modulado.

Figura 58 – Montagem 1 - Sinal Modulado.

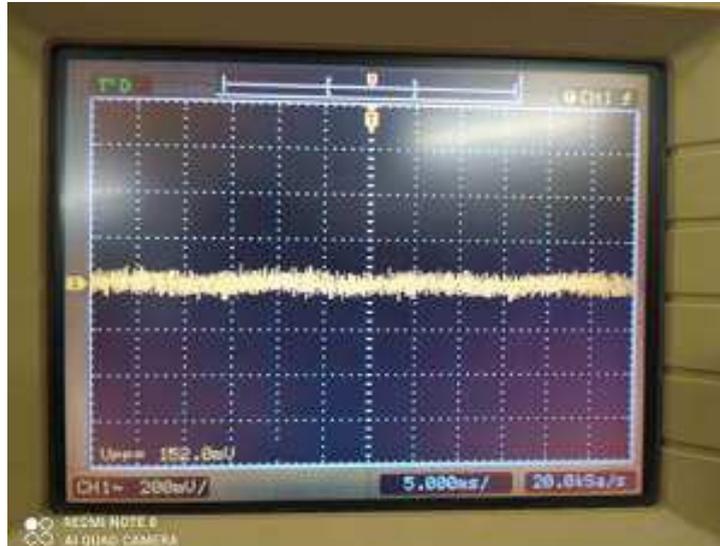


Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 58, o sinal de saída do modulador balanceado para um sinal modulante senoidal de 0,5 V foi um sinal 100% modulado, ou seja, ele não apresenta distorções na envoltória e o gasto de potência para sua transmissão é minimizado uma vez que a região de menor amplitude é igual a zero.

Na Figura 59 está apresentado o sinal de saída do modulador balanceado sem sinal modulante.

Figura 59 – Montagem 1 - Sinal Modulado.

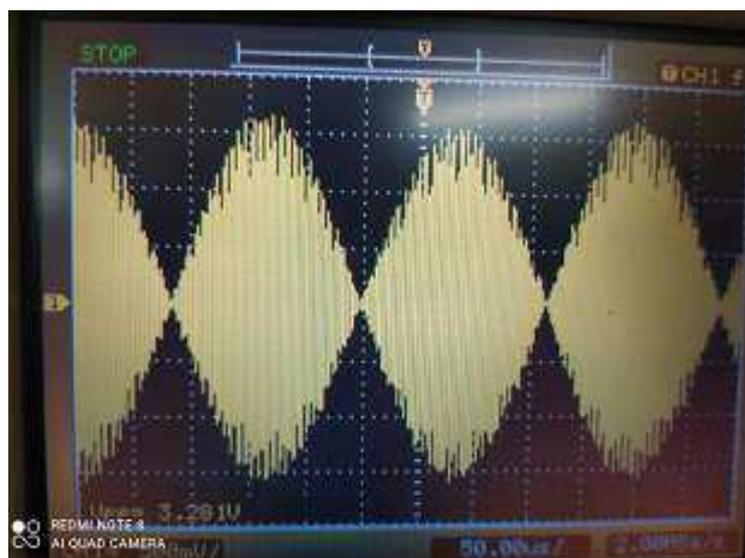


Fonte – Autorial Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 59, o sinal modulado é nulo, ou seja, como a portadora está suprimida, o sinal de saída só existirá caso haja sinal de entrada. Isso difere da modulação AM-DSB, em que mesmo com o sinal de entrada nulo, a saída do modulador ainda era influenciada pela portadora.

Na Figura 60 está apresentado o sinal de saída do modulador balanceado para o sinal modulante senoidal de 2,46 V.

Figura 60 – Montagem 1 - Sinal Modulado.

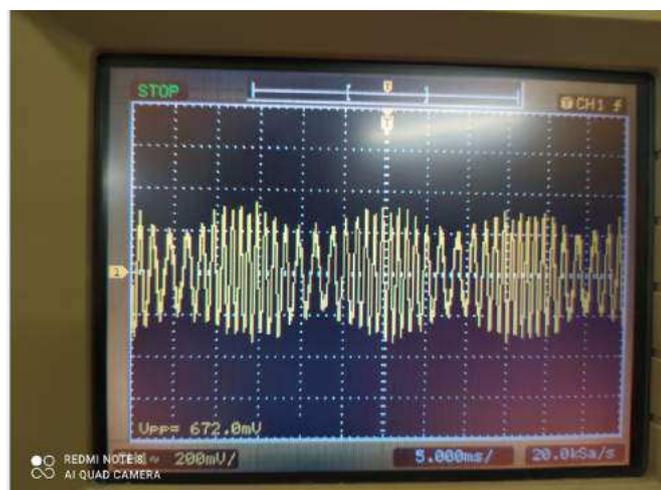


Fonte – Autorial Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 59, o sinal AM-SSB não apresentou sobremodulação mesmo ao aumentar a amplitude da modulante. Além disso, esse sinal modulado também não apresentou submodulação ao reduzir a amplitude da modulante. Com esses resultados, constata-se que a portadora é a responsável por causar submodulação e sobremodulação.

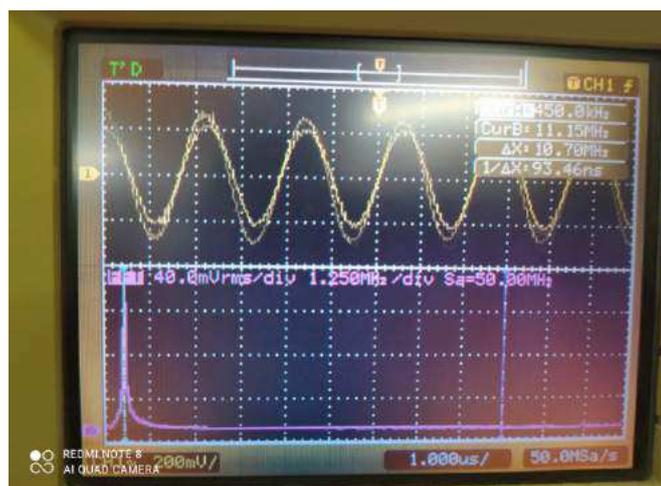
Na segunda etapa, foi observado, no osciloscópio, o sinal de saída do filtro cerâmico passa faixa com frequência central de 455kHz e faixa de passagem de 10kHz apresentado na Figura 56 e foi verificado se a sua frequência era igual a soma das frequências da portadora e da modulante (SSB-USB) ou a subtração (SSB-LSB). O sinal de saída do filtro cerâmico e sua FFT estão apresentadas nas Figuras 61 e 62, respectivamente.

Figura 61 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 62 – Montagem 1 - FFT do Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.

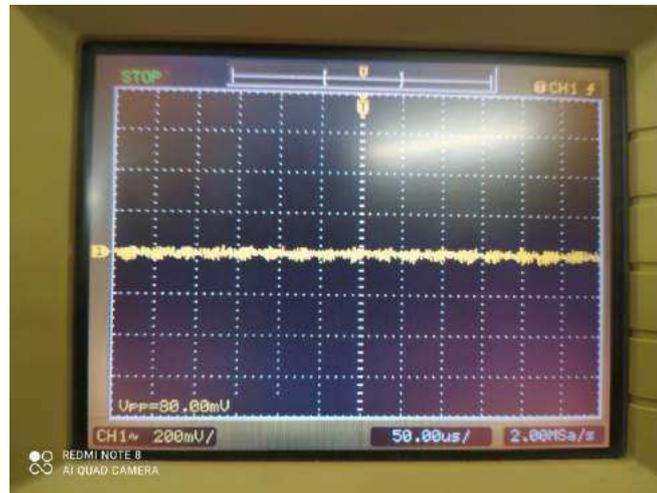


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado nas Figuras 61 e 62, o sinal de saída do filtro cerâmico apresenta apenas uma banda lateral do sinal AM-SSB e uma frequência próxima de 450 kHz, ou seja, o

filtro deixa passar apenas a banda inferior do sinal AM-SSB, uma vez que a frequência central da saída é a subtração da frequência da portadora (455 kHz) pela modulante (3 kHz). Também verificou-se que, ao aumentar a frequência da modulante, o sinal de saída do filtro era atenuado. Na Figura 63 está apresentado o sinal de saída do filtro cerâmico para uma modulante de 7 kHz.

Figura 63 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Filtro Cerâmico.

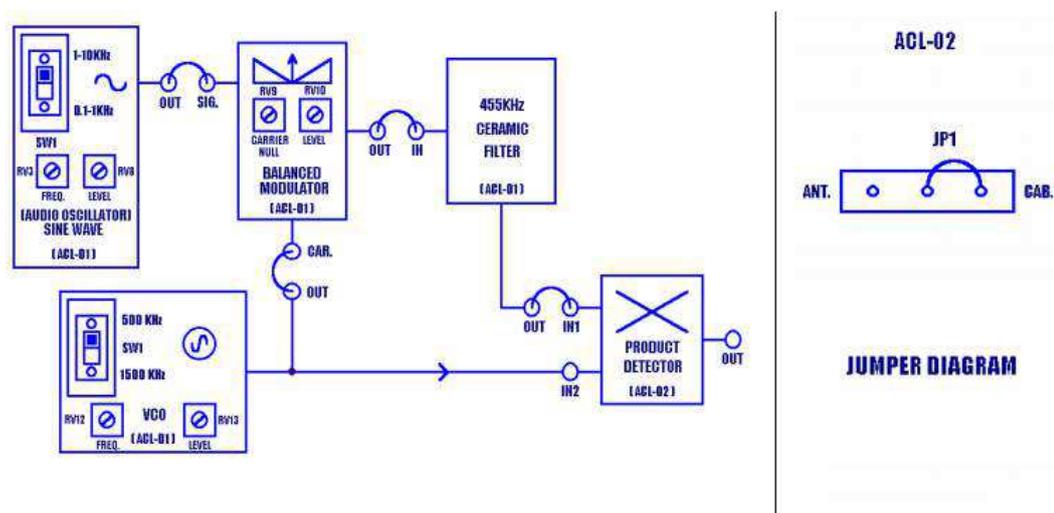


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 63, o filtro cerâmico atenuou o sinal modulado em 88,10% em relação ao sinal apresentado na Figura 62 para uma frequência da modulante de 7 kHz. Isso ocorreu devido ao fato de que a frequência do sinal modulado era de 448 kHz, estando fora da banda de passagem do filtro que é de 10 kHz, ou seja, ele permite a passagem de sinais entre 450 e 460kHz.

Na terceira etapa foi montado o diagrama de blocos apresentado na Figura 64 com os módulos ACL 01 e ACL 02.

Figura 64 – Diagrama de Blocos do Receptor AM-SSB Usando Detector de Produto via Cabo.



Fonte – Adaptado de FALCON (2005) [14, p. 76,78].

A montagem do demodulador AM-DSB do diagrama apresentado na Figura 64 está apresentada na Figura 65, em que foi colocado um sinal modulante senoidal de 0,5 V com frequência de 3 kHz e, no VCO, com chave em 500 kHz, foi colocado um sinal de 1 V com frequência de 455 kHz. Além disso, No modulador balanceado do ACL 01 foi colocado *CARRIER NULL* na posição central e o *LEVEL* foi ajustado totalmente na posição horária, com o objetivo de obter o sinal AM com supressão da portadora e com maior amplitude possível.

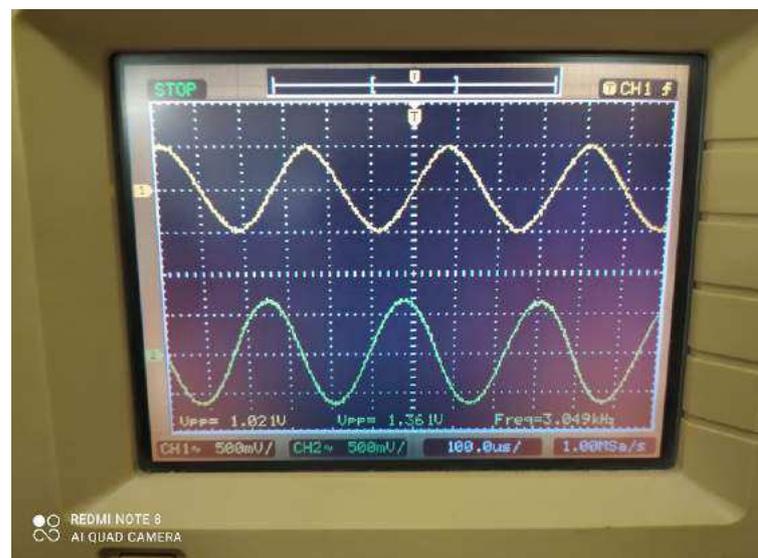
Figura 65 – Montagem 2 - Modulador e Demodulador AM-SSB.



Fonte – Autoria Própria (2021).

O sinal modulado AM-SSB(LSB) é demodulado no detector de produto. A saída demodulada está apresentada na Figura 66.

Figura 66 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).

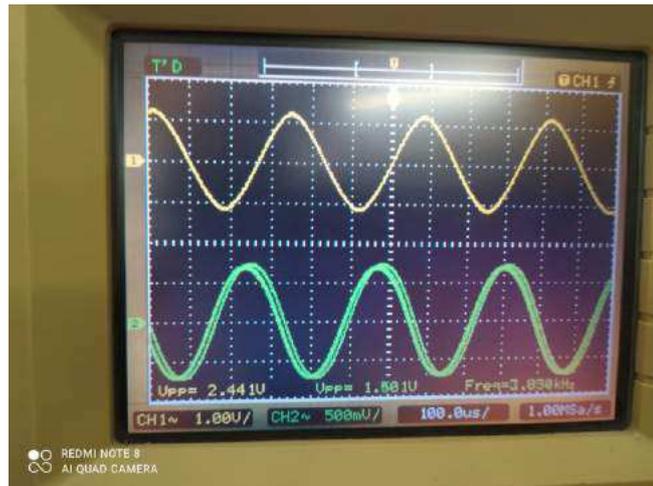


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 66, o sinal demodulado (verde) apresenta uma frequência 1,63 % maior, uma amplitude 33,30 % maior e um atraso em relação ao sinal modulante. Essa amplitude ocorre devido ao produtório realizado no demodulador e o atraso foi proveniente dos circuitos RC pelos quais esse sinal passou.

Em sequência, variou-se a amplitude e a frequência do sinal modulante. Nas Figuras 67 e 68 estão apresentadas os resultados das variações de amplitude e frequência, respectivamente.

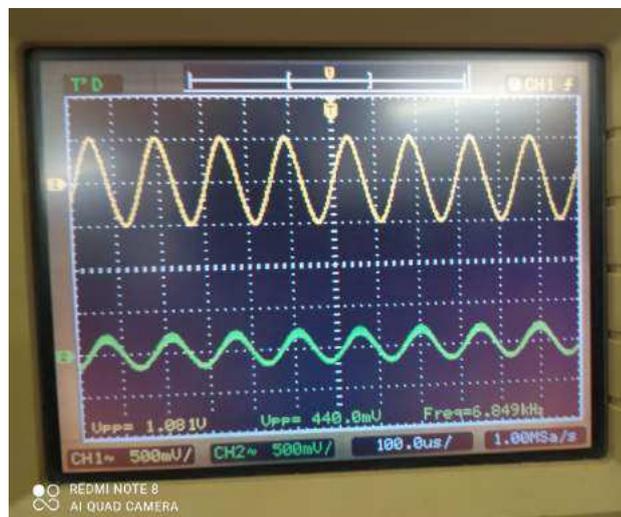
Figura 67 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 67, ao aumentar a amplitude do sinal modulante, observou-se que a amplitude do sinal demodulado não apresentou distorções e foi aumentada até 0,75 V.

Figura 68 – Montagem 2 - Sinal Modulante (amarelo) e Sinal Demodulado pelo Detector de Produto (verde).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 68, ao aumentar a frequência do sinal modulante, a amplitude do sinal demodulado apresentou-se bastante atenuada devido ao filtro passa baixa.

Logo, observou-se que foi possível realizar a modulação AM-SSB com os módulos ACL 01 e ACL 02 e, em seguida, recuperar o sinal modulante pelo detector de produto com uma boa exatidão em relação a frequência de oscilação. Também foi possível verificar o comportamento dos sinais modulado e demodulado com a variação da amplitude do sinal modulante.

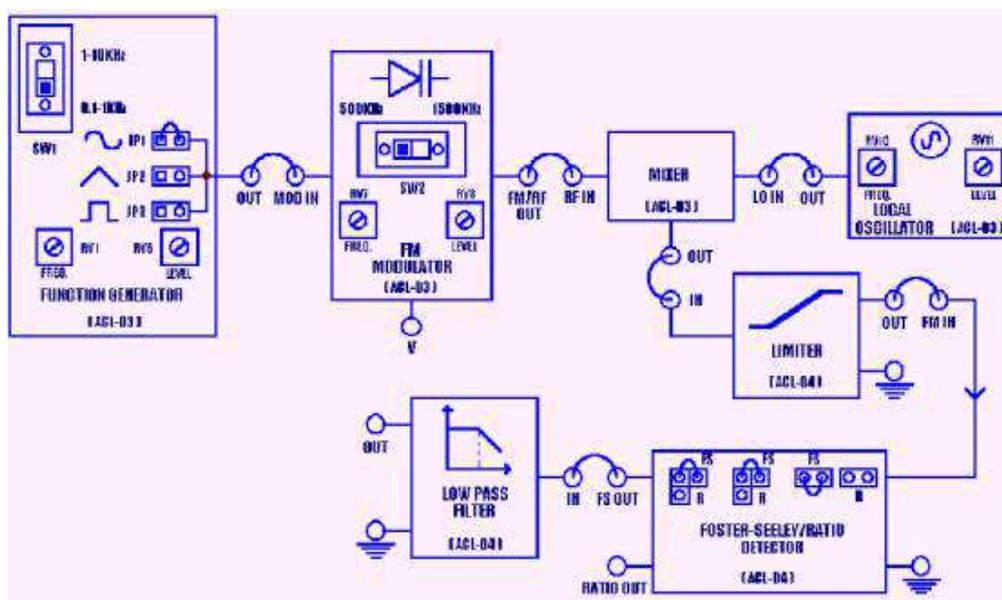
A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um modulador e demodulador AM-SSB com os módulos Falcon ACL 01 e ACL 02.

2.12.3 Modulação e Demodulação FM com Diodo Varicap

Essa atividade consistiu na montagem do modulador e do demodulador FM com os módulos Falcon ACL 03 e ACL 04 para a análise dos sinais modulado pelo modulador FM e demodulado pelos detectores Foster-Seeley, de relação, PLL e de quadratura.

Na primeira etapa foi montado o diagrama de blocos da Figura 69 com os módulos ACL 03 e ACL 04, que foram conectados à fonte de alimentação.

Figura 69 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector Foster-Seeley.



Fonte – FALCON (2005) [15].

A montagem do diagrama de blocos da Figura 69 e o sinal de saída do modulador FM estão apresentados nas Figuras 70 e 71, respectivamente. Em que foi colocado no gerador de funções, como sinal modulante, uma onda senoidal de 25 mV com frequência de 500 Hz. Já no modulador FM, com chave em 500 kHz, o nível de tensão foi ajustado para 0,5 V e a

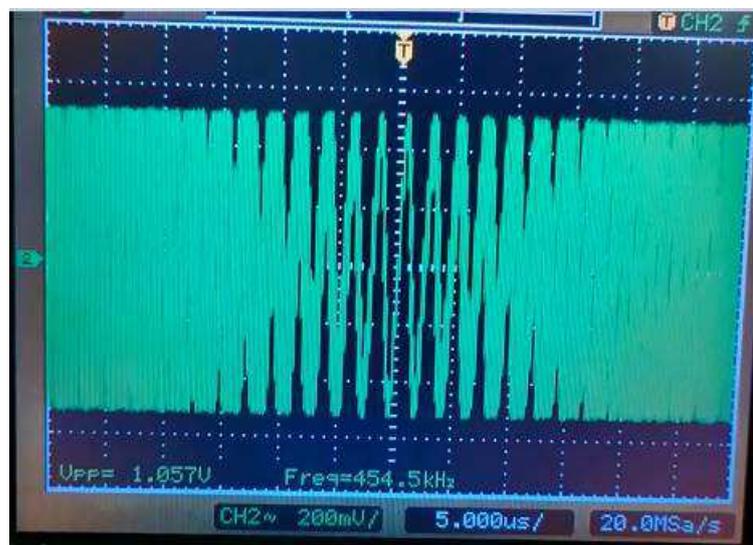
frequência foi ajustada para 450 kHz. Além disso, o oscilador local foi ajustado para gerar um sinal (portadora) de 0,5 V com frequência de 1 MHz.

Figura 70 – Montagem 1 - Modulador e Demodulador FM com Detector Foster-Seeley.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Figura 71 – Montagem 1 - Sinal Modulado.



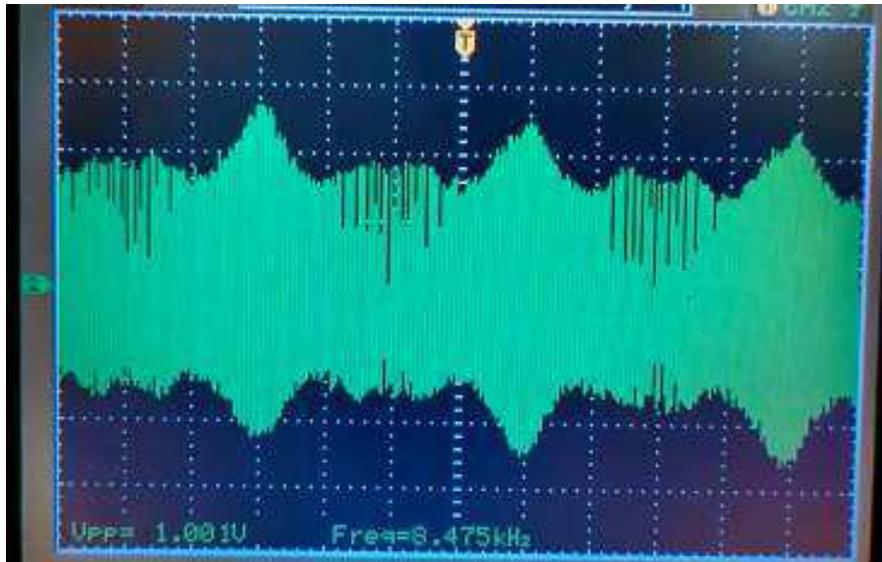
Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 71, o sinal na saída do modulador FM foi um sinal modulado em frequência com amplitude de 0,53 V e frequência central de 454,51 kHz.

Em sequência, o sinal modulado FM apresentado na Figura 71 passa por um misturador para modificar a faixa de frequência do mesmo. Após isso, o sinal passa por um limitador para retirar as amplitudes indesejadas que foram geradas no misturador, uma vez que os demoduladores FM são sensíveis à variações de amplitude. Em sequência, o sinal passa pelo demodulador e por um filtro passa baixa para recuperar o sinal modulante com o mínimo de

ruído possível. Nas Figuras 72 e 73 estão apresentados os sinais de saída do misturador e do limitador respectivamente.

Figura 72 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Misturador.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

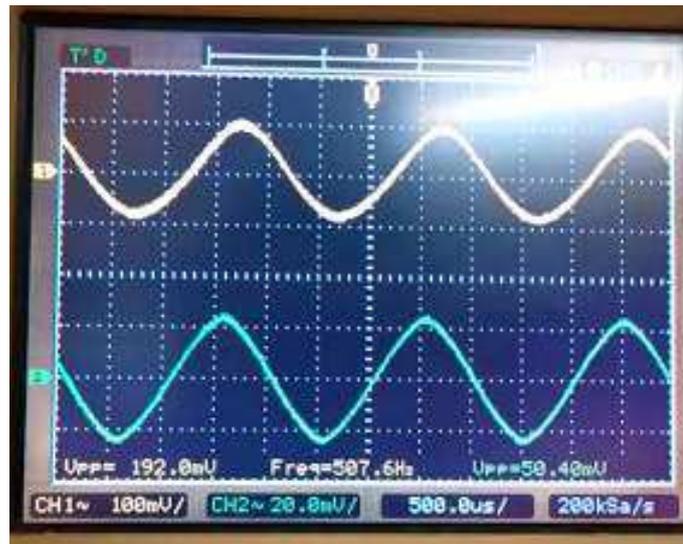
Figura 73 – Montagem 1 - Sinal de Saída do Limitador.



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Nas Figuras 74 e 75 estão apresentados o sinal demodulado pelo detector Forster-Seeley e o sinal após a passagem pelo filtro passa baixa, respectivamente.

Figura 74 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector Foster-Seeley (amarelo).



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 74, o sinal demodulado pelo detector Forster-Seeley apresentou frequência 1,52% maior que a da modulante, um pequeno atraso, ruído praticamente inexistente e uma amplitude 280,95% maior que a da modulante.

Figura 75 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).

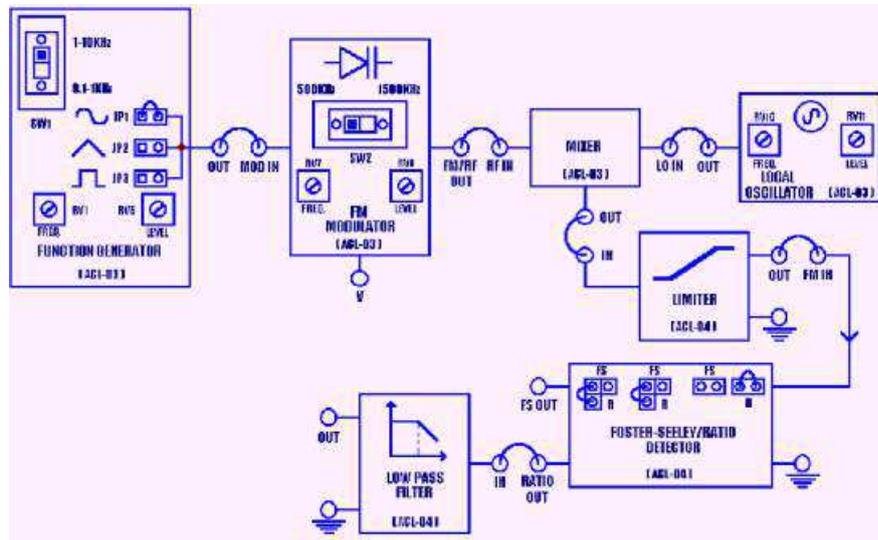


Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 75, o sinal demodulado após o filtro passa baixa apresentou um ganho 27,08% maior em relação a saída do detector Foster-Seeley e 384,13% maior que a amplitude do sinal modulante, o que mostra que o filtro passa baixa apresenta um ganho maior do que 1.

Na segunda etapa foi montado o diagrama de blocos da Figura 76 e foram repetidos os passos da primeira etapa.

Figura 76 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector de Relação.



Fonte – FALCON (2005) [15].

A montagem do diagrama de blocos da Figura 76 está apresentada na Figura 77.

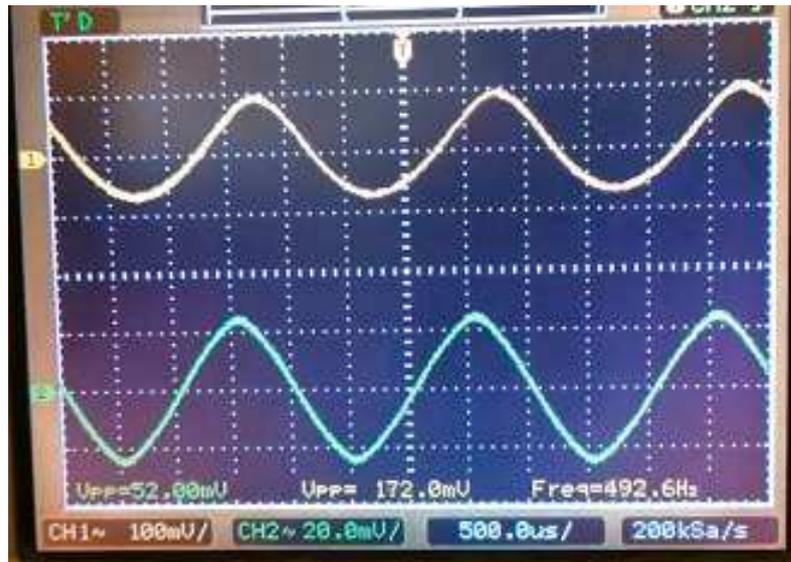
Figura 77 – Montagem 2 - Modulador e Demodulador FM com Detector de Relação.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Nas Figuras 78 e 79 estão apresentados o sinal demodulado pelo detector de relação e o sinal após a passagem pelo filtro passa baixa, respectivamente.

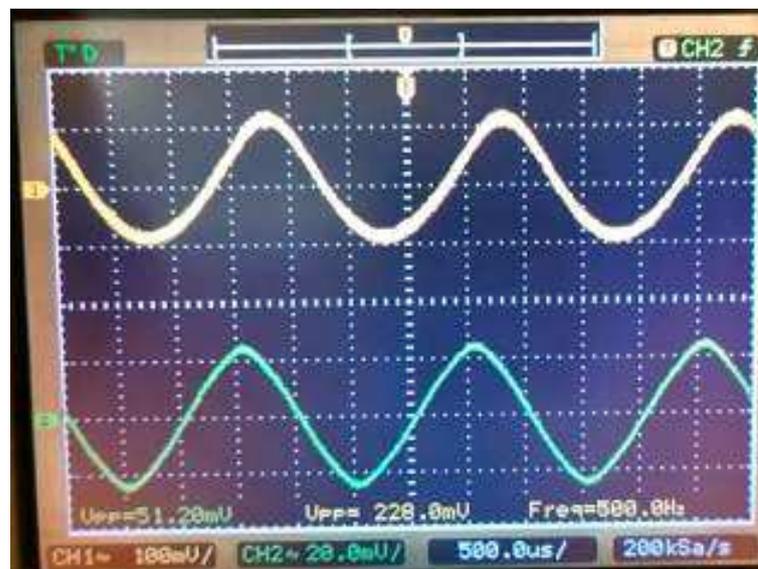
Figura 78 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de Relação (amarelo).



Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 78, o sinal demodulado pelo detector de relação apresentou frequência 1,48% menor que a da modulante, um pequeno atraso, ruído praticamente inexistente, uma distorção nos picos negativos e uma amplitude 230,77% maior que a da modulante.

Figura 79 – Montagem 2 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).



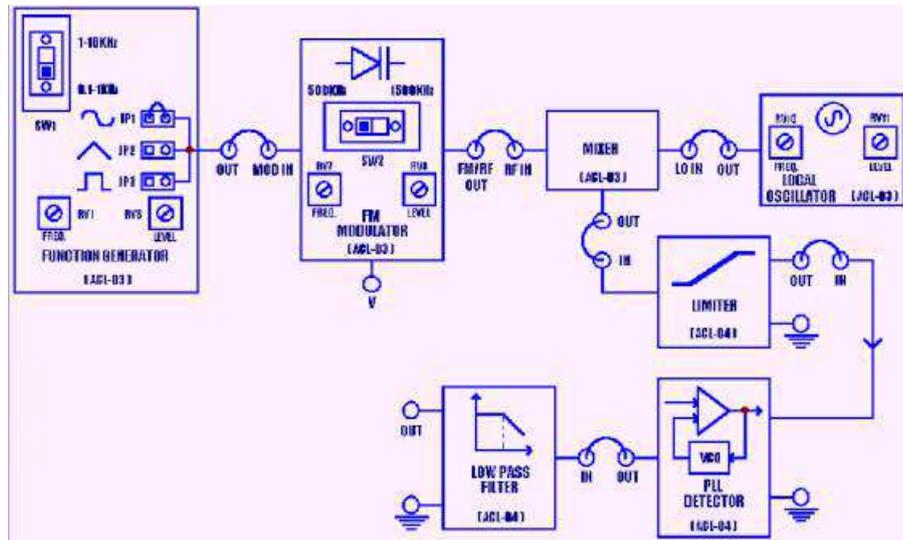
Fonte – Aatoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 79, o sinal demodulado após o filtro passa baixa apresentou uma amplitude 27,91% maior em relação a saída do detector de relação e 329,69% maior

que a amplitude do sinal modulante e uma atenuação, porém não total, da distorção nos picos negativos.

Na terceira etapa foi montado o diagrama de blocos da Figura 80 e foram repetidos os passos da primeira etapa.

Figura 80 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector PLL.



Fonte – FALCON (2005) [15].

A montagem do diagrama de blocos da Figura 80 está apresentada na Figura 81.

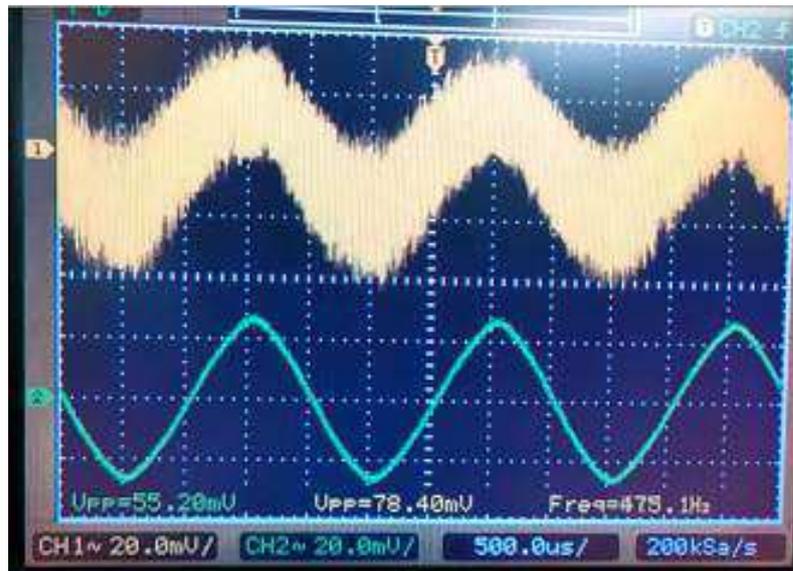
Figura 81 – Montagem 3 - Modulador e Demodulador FM com Detector PLL



Fonte – Autoria Própria (2021)

Nas Figuras 82 e 83 estão apresentados o sinal demodulado pelo detector PLL e o sinal após a passagem pelo filtro passa baixa, respectivamente.

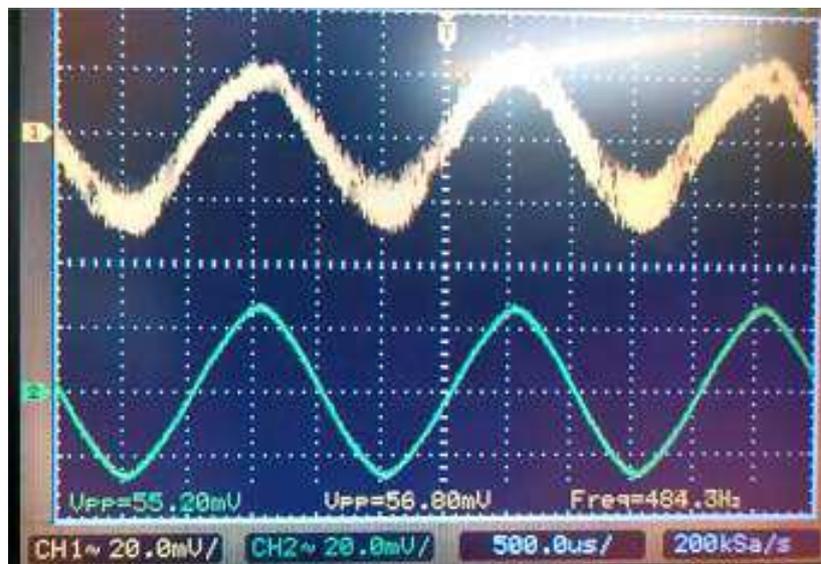
Figura 82 – Montagem 3 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de PLL (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 82, o sinal demodulado pelo detector PLL apresentou frequência 4,98% menor que a da modulante, um pequeno atraso, ruído considerável e uma amplitude 42,03% maior que a da modulante.

Figura 83 – Montagem 3 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).

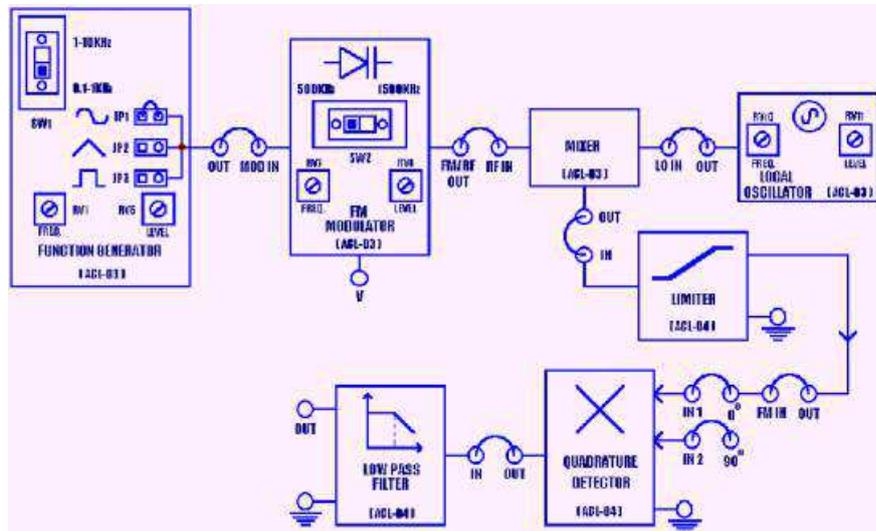


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 83, o sinal demodulado após o filtro passa baixa reduziu o ruído, apresentou uma amplitude 27,55% menor em relação a saída do detector PLL, o que ressalta a influência do ruído na Figura 82, e 2,90% maior que a amplitude do sinal modulante.

Na quarta etapa foi montado o diagrama de blocos da Figura 84 e foram repetidos os passos da primeira etapa para o detector de quadratura com chave em FM.

Figura 84 – Diagrama de Blocos do Demodulador por Detector de Quadratura



Fonte – FALCON (2005) [15]

A montagem do diagrama de blocos da Figura 84 está apresentada na Figura 85.

Figura 85 – Montagem 4 - Modulador e Demodulador FM com Detector de Quadratura.



Fonte – Autoria Própria (2021).

Nas Figuras 86 e 87 estão apresentados o sinal demodulado pelo detector de quadratura com chave em FM e o sinal após a passagem pelo filtro passa baixa, respectivamente.

Figura 86 – Montagem 4 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado pelo Detector de Quadratura (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 86, o sinal demodulado pelo detector de quadratura apresentou frequência 7,66% menor que a da modulante, ruído considerável e uma amplitude 111,27% maior que a da modulante.

Figura 87 – Montagem 4 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado após Filtro Passa Baixa (amarelo).

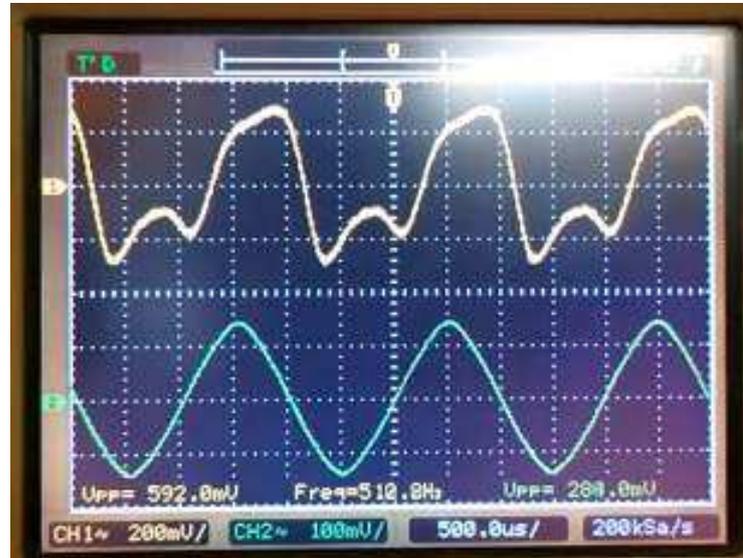


Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme observado na Figura 87, o sinal demodulado após o filtro passa baixa reduziu o ruído, apresentou uma amplitude 31,37% maior em relação a saída do detector de quadratura e 44,37% maior que a amplitude do sinal modulante.

Em sequência, variou-se a amplitude e a frequência do sinal modulante de todos os casos de modulação. Nas Figuras 88 e 89 estão apresentadas os resultados das variações de amplitude e frequência para o detector de quadratura, respectivamente.

Figura 88 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Distorcido (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 88, ao aumentar a amplitude do sinal modulante, o sinal demodulado começou a apresentar distorções. Essas distorções ocorreram em todos os casos de demodulação.

Figura 89 – Montagem 1 - Sinal Modulante (verde) e Sinal Demodulado Atenuado (amarelo).



Fonte – Autoria Própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 89, ao aumentar a frequência do sinal modulante, o sinal demodulado apresentou-se bastante atenuado devido ao filtro passa baixa. Essas atenuações

ocorreram em todos os casos de demodulação.

Logo, observou-se que foi possível realizar a modulação FM com os módulos ACL 03 e ACL 04 e, em seguida, recuperar o sinal modulante por quatro detectores diferentes (Foster-Seeley, de Relação, PLL e de quadratura). Sendo o sinal demodulado pelo detector Foster-Seeley o que apresentou menos ruído e distorção, o sinal demodulado pelo detector de quadratura o que apresentou menos defasamento, e o sinal demodulado pelo detector PLL o que apresentou uma amplitude mais próxima em relação ao sinal modulante. Também foi possível verificar o comportamento dos sinais modulado e demodulado com a variação da amplitude do sinal modulante.

A partir da atividade desenvolvida, foi elaborado um [guia](#) e um [vídeo](#) para auxiliar na montagem de um modulador e demodulador FM com os módulos Falcon ACL 03 e ACL 04.

3 Conclusões

Neste relatório foram documentadas as atividades realizadas durante o estágio supervisionado no LIMC. Esse estágio teve como objetivo a confecção de materiais didáticos instrucionais, que podem ser acessados em [Material do Estágio Supervisionado](#), para auxiliar o aprendizado de circuitos para comunicações. As atividades realizadas foram enriquecedoras para o discente, uma vez que proporcionaram a obtenção de um vasto conhecimento a cerca de circuitos para comunicações. Além disso, esse estágio concedeu a oportunidade de vivenciar um dia a dia em um laboratório, em que o discente teve que aprender a administrar, o melhor possível, o seu tempo e buscar formas práticas de resolver os problemas encontrados.

Em geral, o discente foi capaz de alcançar os objetivos do estágio, colocar em prática os seus conhecimentos teóricos, adquirir experiência com as práticas laboratoriais, estabelecer boas relações com a equipe do LIMC, que se mostrou prestativa ao contribuir com seus conhecimentos para com o estágio, e alcançar resultados satisfatórios.

Referências

- 1 CASTELLS, M. *Comunicación y Poder*. 1. ed. Juan Ignacio Luca de Tena, Madrid: Alianza Editorial, 2009. P. 88. ISBN 978-8420684994.
- 2 LIMC. *O que é o LIMC?* Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, 2008. Disponível em: <<http://limc.dee.ufcg.edu.br/sobre>>. Acesso em: 26 Abr. 2021.
- 3 LIMC. *Pesquisa*. Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, 2008. Disponível em: <<http://limc.dee.ufcg.edu.br/pesquisa>>. Acesso em: 26 Abr. 2021.
- 4 BRAGA, N. C. *Calculando e enrolando pequenos indutores (ART572)*. Instituto NCB, 2018. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/4151-art572>>. Acesso em: 25 Fev. 2021.
- 5 ELETRONIC, A. *O que são indutores? Como funciona um indutor*. Athos Eletronic, 2018. Disponível em: <[https://athoselectronics.com/como-funciona-indutor/#:~:text=Indutores%20s%C3%A3o%20dispositivos%20eletr%C3%B4nicos%20capazes,pela%20grandeza%20Henry%20\(H\).>](https://athoselectronics.com/como-funciona-indutor/#:~:text=Indutores%20s%C3%A3o%20dispositivos%20eletr%C3%B4nicos%20capazes,pela%20grandeza%20Henry%20(H).>)> Acesso em: 25 Fev. 2021.
- 6 GLENNAPTS, R. *Fator de Qualidade do Indutor e Capacitor*. River Glennapts, 2018. Disponível em: <<https://riverglennapts.com/pt/capacitor/148-quality-factor-of-inductor-and-capacitor.html#:~:text=Todo%20indutor%20possui%20uma%20pequena,da%20bobina%20e%20sua%20resist%C3%A2ncia.>>> Acesso em: 25 Fev. 2021.
- 7 ANDRADE, W. F. F. *Análise do amortecimento da tensão em um circuito RLC por meio de equações diferenciais de segunda ordem*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia). p. 3. Mossoró, 2018.
- 8 MELGES, D. *Circuitos Elétricos III*. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~danielmelges//circ3/Aula7-CircuitosSeletoresFrequenciaPt2.pdf>>. Acesso em: 05 Mar. 2021.
- 9 CLARK, K.; HESS, D. *Communication circuits: analysis and design*. 1. ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1971. ISBN 978-0201010404.
- 10 INSTRUMENTS, T. *CD4046B Types*. All Datasheets, 2003. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/834658/TI1/CD4046B.html>>. Acesso em: 08 Mar. 2021.
- 11 TOGNERI, A. P. *Análise de Sistemas de Multiplexação por Subportadora - SCM*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). p. 16,20. Vitória, 2005.
- 12 HART, D. W. *Power Eletronics*. 1. ed. Manhattan, New York: McGraw-Hill, 2010. P. 357-358. ISBN 978-0073380674.
- 13 NOCETI, S. *EXEIA*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. P. 24-28. Disponível em: <<http://www.linse.ufsc.br/~sidnei/efeitos/efeitos-02.pdf>>. Acesso em: 22 Abr. 2021.
- 14 FALCON. *ACL-01: AMPLITUDE MODULATION TRANSMITTER KIT AND ACL-02: AMPLITUDE DEMODULATION RECEIVER KIT*. Tekniikka, 2005. Disponível em: <<http://www.tekniikka.oamk.fi/tl-lab/tyoohjeet/tl5527/ACL-01&02.pdf>>. Acesso em: 26 Abr. 2021.

15 FALCON. *ACL-03: FREQUENCY MODULATION TRANSMITTER KIT AND ACL-04: FREQUENCY DEMODULATION RECEIVER KIT*. Tekniikka, 2005. Disponível em: <http://www.tekniikka.oamk.fi/tl-lab/tyoohjeet/tl5527/ACL-03&04-MAN.PDF>. Acesso em: 26 Abr. 2021.