



Departamento de
Engenharia Elétrica
e de Computação

KELVIN UENO AMOROSO DE LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM
CIRCUITO AMPLIFICADOR
APLICADO NA AQUISIÇÃO DE SINAIS
ELETROFISIOLÓGICOS DE UM
INSETO.**

São Carlos

2016



Departamento de
Engenharia Elétrica
e de Computação

KELVIN UENO AMOROSO DE LIMA

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM CIRCUITO AMPLIFICADOR APLICADO NA AQUISIÇÃO DE SINAIS ELETROFISIOLÓGICOS DE UM INSETO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr^o Carlos Dias Maciel

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

U732i Ueno Amoroso de Lima, Kelvin
Implementação e análise de um circuito amplificador
aplicado na aquisição de sinais eletrofisiológicos de
um inseto / Kelvin Ueno Amoroso de Lima; orientador
Carlos Dias Maciel. São Carlos, .

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, .

1. Sinais eletrofisiológicos . 2. Amplificadores
Operacionais . 3. LTspiceIV. 4. Largura de Banda . 5.
Ruídos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Kelvin Ueno Amoroso de Lima

Título: "Implementação e análise de um circuito amplificador aplicado na aquisição de sinais eletrofisiológicos de um inseto"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 11 / 2016,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Carlos Dias Maciel - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Michel Bessani - Doutorando/SEL/EESC/USP

Mestre Tadeu Junior Gross - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, avós e família, por todo os esforços imedidos, carinho e amor para que eu pudesse seguir em frente em busca dos meus sonhos.

Agradecimentos

À minha família, que esteve comigo em todos os momentos que precisei, e sempre foi pilar da minha vida, em especial a meu ditian Fideo e batian Fussako, a meu avô Mainarde e avó Setsuko, a meu pai André, à minha mãe Cristina e meus irmãos de sangue Naomi e Dimitri.

Aos meus amigos e irmãos da Eletrônica 010, que a Universidade de São Paulo e a Escola de Engenharia de São Carlos me deram, os quais compartilharam momentos comigo dos quais jamais esquecerei, Ob, Múmia, Arnaldo, Lagartixa, Glamurosa, Cabeça, Paulinha, Brunninha e Mama.

Aos meus irmãos da República Capuz e de São Carlos, Valda, Bino, Tales, Max, Mineiro, Bonzixa, Mendigo, Betinha por terem compartilhado um pouco da história de cada um de vocês comigo, a família provisória que me acolheu nesse período que estive longe da minha.

Aos meus amigos de Equipe EESC USP BAJA SAE, que compartilhavam uma mesma garra de vitória, paixão por Engenharia e Automobilismo, e pelas situações mais inesperadas que passei na Universidade, Gabriel Renatão, Pacheco, Pumba, Kiwi, Abadá, Blank, Carioca, Polika, Terrinha, Sofá.

Agradeço também ao professor Carlos Dias Maciel pelo incentivo e desafios feitos ao longo da orientação deste trabalho, e pelo professor Alberto Cliquet Junior pela ajuda na etapa final deste trabalho e pelo espaço no LABCIBER - Laboratório de Biocibernética e Engenharia de Reabilitação para o uso de equipamentos. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial à Jussara Ramos Zoio, pelas ajuda, carisma e paciência em meio a tantas perguntas e dúvidas.

Aos meus amigos de Marília-SP, Luke, Marrom, Mateusinho, Japa, Regis, por se manterem verdadeiros!

À Universidade de São Paulo e à Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade, experiência e pelo grande aprendizado que me foram proporcionados, e por todos os professores que compartilharam um pouco do conhecimento que têm, embora muitas vezes lhes faltassem paciência.

Resumo

A aquisição de sinais fisiológicos é de vital importância no diagnóstico de certas patologias e no estudo e entendimento das funções vitais e das atividades celulares nos seres vivos. Uma grande parte dos fenômenos biológicos nos seres vivos é acompanhada de manifestações elétricas intra e extra celulares. Assim, esse documento apresenta o estudo feito em um circuito amplificador, através da montagem do circuito e via simulação computacional com o uso do *software LTspiceIV*. São dois circuitos em estudo, um pré amplificador e um amplificador principal. Os resultados obtidos mostram o comportamento no espectro de frequências do amplificador e algumas características elétricas dos circuitos.

Palavras-chave: Sinais Eletrofisiológicos, Amplificadores Operacionais; *LTspiceIV*, Largura de Banda, Ruídos.

Abstract

The acquisition of physiological signals is essential in the diagnosis of certain diseases and on the study and understanding of the vital functions and cellular activities in living beings. A large part of biological phenomena in living beings is accompanied by intra and extra cell electrical manifestations. Thus, this document presents a study on an amplifier circuit by assembling the circuit and through computer simulation using the software *LTspiceIV*. There are two circuits in study, a pre amplifier and a main. The results show the behavior in frequency spectrum of the amplifier and some electrical characteristics of the circuits.

Keywords: Electrophysiological signals; Operational Amplifiers; *LTspiceIV*, Bandwidth, Noise.

Lista de Ilustrações

FIGURA 1-1 DIAGRAMA DE BLOCOS ESPECIFICANDO UM SISTEMA DE MEDIÇÃO BIOMÉDICA.	30
FIGURA 2-1 ESQUEMA DE UM ELETROANTENOGRAMA (EAG).	34
FIGURA 2-2 DIAGRAMA DA PREPARAÇÃO PARA A TÉCNICA DE REGISTRO DE SENSILA ÚNICA(RSU).	35
FIGURA 2-3 SÍMBOLO DO AMP OP, COM OS TERMINAIS DE ENTRADA, INVERSORA(NÚMERO 1) E NÃO- INVERSORA(NÚMERO 2); O TERMINAL NÚMERO 3 É O TERMINAL DE SAÍDA.	38
FIGURA 2-4 AMP OP E SEUS TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO POSITIVA INDICADO POR 4, E NEGATIVA INDICADO POR 5.	39
FIGURA 2-5 CIRCUITO EQUIVALENTE DO AMP OP IDEAL (SEDRA, ET AL., 2011 P. 23).	40
FIGURA 2-6 AMP OP UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO NÃO-INVERSORA (CARTER, ET AL., 2009 P. 23).	42
FIGURA 2-7 AMP OP UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO INVERSORA (CARTER, ET AL., 2009 P. 25).	43
FIGURA 2-8 CIRCUITO SOMADOR (CARTER, ET AL., 2009 P. 26).	44
FIGURA 2-9 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (CARTER, ET AL., 2009 P. 27).	45
FIGURA 2-10 DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA DA AMPLITUDE DO RUÍDO (CARTER, ET AL., 2009).	46
FIGURA 2-11 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM FILTRO PASSA-BAIXA PASSIVO; FREQUÊNCIA DE CORTE DE 1000HZ INDICADA PELO PONTO DE DECAIMENTO DE 3dB.	50
FIGURA 2-12 FILTRO PASSIVO PASSA-BAIXA, COM FREQUÊNCIA DE CORTE DE 1000HZ.	51
FIGURA 3-1 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO "HEAD AMPLIFIER"	55
FIGURA 3-2 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO "AC PRE AMPLIFIER" COM FILTRO DE SAÍDA.	56
FIGURA 3-3 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO "AC PRE AMPLIFIER" SEM FILTRO DE SAÍDA.	57
FIGURA 3-4 VISTA INFERIOR DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER".	58
FIGURA 3-5 VISTA SUPERIOR DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER".	59
FIGURA 3-6 VISTA INFERIOR DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER".	59
FIGURA 3-7 VISTA SUPERIOR DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER".	59
FIGURA 3-8 GERADOR DE FUNÇÕES ARBITRÁRIAS.	60
FIGURA 3-9 FONTE DE ALIMENTAÇÃO DIGITAL CC.	60
FIGURA 3-10 OSCILOSCÓPIO DIGITAL.	61
FIGURA 3-11 MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES PARA O CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER".	61
FIGURA 3-12 CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER" DEVIDAMENTE ALIMENTADO, CONECTADO À FONTE GERADORA DE SINAIS E AO OSCILOSCÓPIO.	62

FIGURA 3-13 SAÍDA DO CIRCUITO " <i>HEAD AMPLIFIER</i> " COM ENTRADA AJUSTADA EM 1,0KHZ SENOIDAL E 0,05V DE AMPLITUDE.....	62
FIGURA 3-14 SAÍDA DO CIRCUITO " <i>HEAD AMPLIFIER</i> " COM ENTRADA AJUSTADA EM 1,0KHZ SENOIDAL E 0,5V DE AMPLITUDE.....	63
FIGURA 3-15 MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES PARA O CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> ".	64
FIGURA 3-16 SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA OBSERVADOS NO OSCILOSCÓPIO, PARA ENTRADA SENOIDAL DE 1,0KHZ E AMPLITUDE 0,5V E CHAVE MULTIPLICADORA SELECIONADA X100; ONDA SUPERIOR NO OSCILOSCÓPIO É A SAÍDA E A INFERIOR A ENTRADA; NA DIREITA O CAPACITOR C4 É DE VALOR 100PF E NA ESQUERDA 100NF..	65
FIGURA 3-17 SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA OBSERVADOS NO OSCILOSCÓPIO, PARA ENTRADA SENOIDAL DE 1,0KHZ E AMPLITUDE 0,5V E CHAVE MULTIPLICADORA SELECIONADA X1000; ONDA SUPERIOR NO OSCILOSCÓPIO É A SAÍDA E A INFERIOR A ENTRADA; NA DIREITA O CAPACITOR C4 É DE VALOR 100PF E NA ESQUERDA 100NF..	65
FIGURA 4-1 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>HEAD AMPLIFIER</i> " COM CAPACITOR HF CUT DE 1,0NF OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL; EM DETALHE OS VALORES PARA A DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE CORTE.....	68
FIGURA 4-2 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>HEAD AMPLIFIER</i> " COM CAPACITOR HF CUT DE 47PF OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL; EM DETALHE OS VALORES PARA A DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE CORTE.....	68
FIGURA 4-3 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>HEAD AMPLIFIER</i> " COM CAPACITOR HF CUT VARIANDO ENTRE OS VALORES 47PF, 100PF, 220PF, 470PF E 1NF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	69
FIGURA 4-4 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> ", CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA VARIANDO ENTRE OS VALORES 1,0Ω, 10kΩ, 22kΩ, 47kΩ, 75kΩ E 100kΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	70
FIGURA 4-5 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> ", CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 1,0Ω; CAPACITOR C4 DE 100PF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	70
FIGURA 4-6 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> ", CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 100kΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.....	71
FIGURA 4-7 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> " COM CHAVE MULTIPLICADORA X100 E CAPACITOR C4 100PF, COM VALORES DOS POTENCIÔMETROS AJUSTADOS PARA APROXIMAÇÃO DOS RESULTADOS EM BANCADA.....	72
FIGURA 4-8 GANHO EM DB DO CIRCUITO " <i>AC PRE AMPLIFIER</i> " RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA FIGURA 4-7; CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 100kΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF; POTENCIÔMETRO U9 SET={30}; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	72

FIGURA 4-9 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA VARIANDO ENTRE OS VALORES 1,0Ω, 1,0KΩ, 2,2KΩ, 4,7KΩ, 7,5KΩ E 10,0KΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF;OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	73
FIGURA 4-10 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 1,0Ω; CAPACITOR C4 DE 100PF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	74
FIGURA 4-11 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 10KΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	74
FIGURA 4-12 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CHAVE MULTIPLICADORA X1000 E CAPACITOR C4 100PF, COM VALORES DOS POTENCIÔMETROS AJUSTADOS PARA APROXIMAÇÃO DOS RESULTADOS EM BANCADA.	75
FIGURA 4-13 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA FIGURA 4-12;CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 7,5KΩ; CAPACITOR C4 DE 100PF; POTENCIÔMETRO U9 SET={26};OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	75
FIGURA 4-14 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA VARIANDO ENTRE OS VALORES 1,0Ω, 10KΩ, 22KΩ, 47KΩ, 75KΩ E 100KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF;OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	76
FIGURA 4-15 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 1,0Ω; CAPACITOR C4 DE 100NF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	77
FIGURA 4-16 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 100KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	77
FIGURA 4-17 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CHAVE MULTIPLICADORA X100 E CAPACITOR C4 100NF, COM VALORES DOS POTENCIÔMETROS AJUSTADOS PARA APROXIMAÇÃO DOS RESULTADOS EM BANCADA.	78
FIGURA 4-18 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA FIGURA 4-17;CHAVE MULTIPLICADORA X100 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 100KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF; POTENCIÔMETRO U9 SET={27};OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	78
FIGURA 4-19 GANHO EM DB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA VARIANDO ENTRE OS VALORES 1,0Ω, 1,0KΩ, 2,2KΩ, 4,7KΩ, 7,5KΩ E 10,0KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF;OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	79

FIGURA 4-20 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER",CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM (A): 1,0Ω E (B):10KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF; OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	80
FIGURA 4-21 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CHAVE MULTIPLICADORA X1000 E CAPACITOR C4 100NF, COM VALORES DOS POTENCIÔMETROS AJUSTADOS PARA APROXIMAÇÃO DOS RESULTADOS EM BANCADA.....	81
FIGURA 4-22 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA FIGURA 4-22;CHAVE MULTIPLICADORA X1000 COM O POTENCIÔMETRO DA CHAVE MULTIPLICADORA EM 7,5KΩ; CAPACITOR C4 DE 100NF; POTENCIÔMETRO U9 SET={40};OBTIDO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM OS VALORES PARA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.....	81
FIGURA 4-23 GANHO EM dB DA PLACA "HEAD AMPLIFIER" COM CAPACITOR HF CUT DE (A): 1,0NF E (B): 47pF; OBTIDO VIA TESTES EM BANCADA E GERADO PELO SOFTWARE MATLAB;EM DETALHE OS VALORES PARA A DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE CORTE.	83
FIGURA 4-24 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CAPACITOR C4 DE 100PF E CHAVE MULTIPLICADORA X100, OBTIDO VIA TESTES DE BANCADA E PLOTADO PELO SOFTWARE MATLAB.	84
FIGURA 4-25 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CAPACITOR C4 DE 100PF E CHAVE MULTIPLICADORA X1000, OBTIDO VIA TESTES DE BANCADA E PLOTADO PELO SOFTWARE MATLAB.	85
FIGURA 4-26 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CAPACITOR C4 DE 100NF E CHAVE MULTIPLICADORA X100, OBTIDO VIA TESTES DE BANCADA E PLOTADO PELO SOFTWARE MATLAB.	85
FIGURA 4-27 GANHO EM dB DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM CAPACITOR C4 DE 100NF E CHAVE MULTIPLICADORA X1000, OBTIDO VIA TESTES DE BANCADA E PLOTADO PELO SOFTWARE MATLAB.	86
FIGURA 5-1 TRILHAS EM ESTANHO NA PLACA PERFURADA PADRÃO EM DETALHE.....	89

Lista de Tabelas

TABELA 1 EXEMPLOS DE SINAIS BIOMÉDICOS E SUAS APLICAÇÕES.	36
TABELA 2 CARACTERÍSTICAS DO AMP OP IDEAL.	41
TABELA 3 SUPOSIÇÕES BÁSICAS DO AMP OP IDEAL.	41
TABELA 4 PRINCIPAIS COMANDOS DE ANÁLISE <i>SPICE</i>	54
TABELA 5 RESULTADOS OBTIDOS DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER"; FREQUÊNCIA DE CORTE E LARGURA DE BANDA EM HZ, OBTIDOS EM SIMULAÇÃO E EM BANCADA.	86
TABELA 6 RESULTADOS OBTIDOS DA BANCADA DE TESTE DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER"; VALORES DE FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR, INFERIOR E LARGURA DE BANDA EM HZ.	87
TABELA 7 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" COM AJUSTES BUSCANDO A APROXIMAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM BANCADA.	87
TABELA 8 RESULTADOS OBTIDOS DA SIMULAÇÃO DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER"; VALORES DE FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR, INFERIOR E LARGURA DE BANDA EM HZ.	88
TABELA 9 VALORES COLETADOS DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER", BEM COMO OS GANHOS ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; TENSÃO DE ENTRADA V_{IN} AJUSTADA EM 0.05V PICO A PICO, E VALORES CALCULADOS DO GANHO V_{OUT}/V_{IN} ; CAPACITOR HF CUT FOI AJUSTADO EM 1,0NF.	93
TABELA 10 VALORES COLETADOS DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER", BEM COMO OS GANHOS ABSOLUTO E EM DECIBÉIS TENSÃO DE ENTRADA V_{IN} AJUSTADA EM 0.5V PICO A PICO, E VALORES CALCULADOS DO GANHO V_{OUT}/V_{IN} ; CAPACITOR HF CUT FOI AJUSTADO EM 1,0NF.	94
TABELA 11 VALORES COLETADOS DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER", BEM COMO OS GANHOS ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; TENSÃO DE ENTRADA V_{IN} AJUSTADA EM 0.05V PICO A PICO, E VALORES CALCULADOS DO GANHO V_{OUT}/V_{IN} ; CAPACITOR HF CUT FOI AJUSTADO EM 47PF.	95
TABELA 12 VALORES COLETADOS DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} DO CIRCUITO "HEAD AMPLIFIER", BEM COMO OS GANHOS ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; TENSÃO DE ENTRADA V_{IN} AJUSTADA EM 0.5V PICO A PICO, E VALORES CALCULADOS DO GANHO V_{OUT}/V_{IN} ; CAPACITOR HF CUT FOI AJUSTADO EM 47PF.	97
TABELA 13 VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} , E RESPECTIVO GANHO ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; CHAVE MULTIPLICADORA X100 E CAPACITOR C4 DE 100PF.	99
TABELA 14 VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO "AC PRE AMPLIFIER" DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} , E RESPECTIVO GANHO ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; CHAVE MULTIPLICADORA X100 E CAPACITOR C4 DE 100NF.	100

TABELA 15 VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO “AC PRE AMPLIFIER” DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} , E RESPECTIVO GANHO ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; CHAVE MULTIPLICADORA X1000 E CAPACITOR C4 DE 100PF.
..... 101

TABELA 16 VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO “AC PRE AMPLIFIER” DE TENSÃO DE SAÍDA V_{OUT} , E RESPECTIVO GANHO ABSOLUTO E EM DECIBÉIS; CHAVE MULTIPLICADORA X1000 E CAPACITOR C4 DE 100NF.
..... 102

Lista de Abreviaturas e Siglas

Amp Op	Amplificador Operacional
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Escala Americana normalizada)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
dB	Decibéis
DDP	Diferença de Potencial
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relação Sinal-Ruído)
RF	Rádio Frequência
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor de Junção Bipolar)
FET	<i>Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo)
BW	<i>Bandwidth</i> (Faixa de Passagem)
EAG	Eletroantenograma
ECG	Eletrocardiograma
EMG	Eletromiografia

V	Volt
mV	Mili Volt
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
FDP	Função Densidade de Probabilidade
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor Quadrático Médio)
SMD	<i>Surface-mount Device</i> (Dispositivo de Montagem Superficial)
F	Faraday
pF	Pico Faraday
nF	Nano Faraday

Sumário

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	17
LISTA DE TABELAS.....	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	23
1. INTRODUÇÃO	29
1.1. MOTIVAÇÃO	29
1.2. OBJETIVOS.....	30
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	33
2.1. ELETROFISIOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO BIOMÉDICA	33
2.2. AMPLIFICADOR OPERACIONAL	36
2.3. AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL.....	37
2.3.1. <i>Terminais do Amp Op</i>	38
2.3.2. <i>Função e Característica do Amp Op Ideal</i>	39
2.4. TOPOLOGIAS	41
2.4.1. <i>Configuração Não Inversora</i>	42
2.4.2. <i>Configuração Inversora</i>	43
2.4.3. <i>Somador</i>	43
2.4.4. <i>Amplificador Diferencial</i>	44
2.5. RUÍDOS	46
2.5.1. <i>Ruído Interferente ou Externo</i>	47
2.5.2. <i>Ruído Inerente ou Interno</i>	48
2.5.3. <i>Tipos de Ruídos</i>	48
2.5.4. <i>Relação Sinal-Ruído</i>	49

2.6.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM CIRCUITOS ELETRÔNICOS.....	49
2.6.1.	<i>Largura de Banda</i>	50
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	53
3.2.	MONTAGEM EM PLACA PERFURADA PADRÃO.....	58
3.3.	<i>Bancada de Testes</i>	60
3.3.1.	<i>Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “Head Amplifier”</i>	61
3.3.2.	<i>Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “AC Pre Amplifier”</i>	64
4.	DISCUSSÕES E RESULTADOS	67
4.1.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	67
4.1.1.	<i>Largura de Banda do Circuito “Head Amplifier”</i>	67
4.1.2.	<i>Largura de Banda do Circuito “AC Pre Amplifier”</i>	69
4.2.	RESULTADOS EM BANCADA DE TESTES	82
4.2.1.	<i>Largura de Banda do Circuito “Head Amplifier”</i>	82
4.2.2.	<i>Largura de Banda do Circuito “AC Pre Amplifier”</i>	84
5.	CONCLUSÃO	89
	BIBLIOGRAFIA	91
	APÊNDICE A – VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO “HEAD AMPLIFIER”	93
	APÊNDICE B – VALORES COLETADOS EM BANCADA DO CIRCUITO “AC PRE AMPLIFIER”	99

1. Introdução

1.1. Motivação

Os seres vivos nas suas atividades normais desenvolvem processos fisiológicos, que podem ser medidos e utilizados em diferentes finalidades. Muitos desses processos são de grande importância para profissionais das áreas de saúde e biológicas, como por exemplo no diagnóstico de diversas patologias e no estudo e entendimento das funções vitais e das atividades celulares. Estes processos fisiológicos envolvem mecanismos químicos, físicos, elétricos e eletroquímicos que podem ser direta ou indiretamente medidos (Raminhos, 2009), sendo assim possível detectar os sinais elétricos produzidos em nível intra e extracelular.

O processo de estudo e análise das propriedades elétricas em células e tecidos que envolvem o disparo de potenciais de ação quando estimulados é chamado eletrofisiologia. Nos insetos a eletrofisiologia tem uma grande contribuição, por exemplo, na detecção de feromônios e demais substâncias capazes de atuar no comportamento dos mesmos (Ferreira, 2011). Assim sendo esses sinais objetos de estudo deste trabalho de conclusão de curso, que consiste na análise de um circuito amplificador e um pré amplificador que serão utilizados para tal finalidade.

Dado tal fato, ainda pode-se resaltar que o desenvolvimento de equipamentos de diagnóstico para monitorização e análise de sinais fisiológicos sofreu um forte crescimento nos últimos anos, e a procura de novos sistemas de aquisição para estes tipos de sinais justifica a criação de novas soluções que respondam à estas exigências (Pereira, 2008). Esses equipamentos são destinados ao diagnóstico, tratamento ou monitoração dos pacientes ou outros seres vivos, e em engenharia biomédica esse sistema de medição segue o seguinte diagrama de blocos (Webster, 1998):

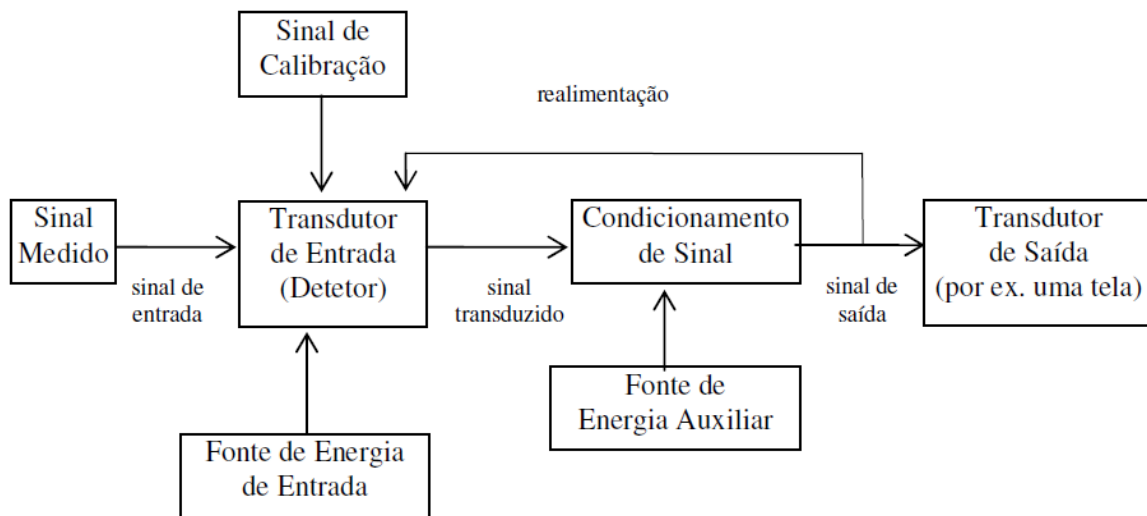


Figura 1-1 Diagram de blocos especificando um sistema de medição biomédica.

Resumindo o diagrama acima, inicialmente o equipamento deve localizar o sinal fisiológico que deve ser medido, que é detectado por um dispositivo chamado transdutor, ou popularmente conhecido como sensor. Depois da fase de transdução, tem-se o condicionamento do sinal, este separado em amplificação, filtragem, casamento de impedâncias e conversão analógico-digital. Na parte de amplificação que está o circuito de estudo deste trabalho. Ainda, por final, o sinal digital ou mesmo analógico vai para um dispositivo de saída também chamado de transdutor de saída, e a resposta da saída pode ser utilizada como realimentação do transdutor de entrada.

Assim, este trabalho tem o intuito de prover a análise dos circuitos propostos que serão apresentados nas seções seguintes. Essa análise será feita a partir de gráficos de ganho pela frequência gerados pelos circuitos em ambiente virtual e nos ensaios em bancada.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho residem basicamente na implementação de um circuito amplificador utilizado na pré-amplificação e na amplificação de sinais de eletrofisiologia de um inseto. São sinais de baixa intensidade e por isso susceptíveis a ruídos tanto internos quanto externos. Assim, com o intuito de amenizar esse problema e estudar o circuito de amplificação, os seguintes objetivos foram traçados:

- Construir as análises no espectro de frequências e obter algumas características elétricas dos circuitos de amplificação em ambiente virtual utilizando o *software LTspiceIV*;
- Implementação e montagem física dos circuitos e realização dos ensaios e testes em laboratório, e análise dos resultados.

1.3. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

- **Capítulo 1:** capítulo introdutório visa localizar ao leitor o problema proposto;
- **Capítulo 2:** Embasamento teórico sobre os conceitos e a história da eletrofisiologia, amplificadores operacionais e algumas propriedades de ruídos;
- **Capítulo 3:** apresenta a metodologia utilizada, bem como o detalhamento dos testes realizados;
- **Capítulo 4:** são descritos os resultados das simulações e dos testes experimentais nos circuitos;
- **Capítulo 5:** no ultimo capítulo, são feitas as análises e discussões dos resultados obtidos, e as perspectivas futuras e oportunidades para continuidade do trabalho.

2. Fundamentos Teóricos

Este capítulo tem como objetivo expor a teoria dos conceitos usados para se chegar a solução do problema proposto. Será apresentada uma breve explicação sobre eletrofisiologia, amplificadores operacionais, alguns parâmetros elétricos desses componentes e algumas topologias utilizadas no projeto de circuitos. Também serão apresentados métodos de modelagem e avaliação de desempenho de circuitos amplificadores que operam em faixas de médias e altas frequências, além de algumas propriedades de ruídos que interferem no projeto de circuitos eletrônicos.

2.1. Eletrofisiologia e Instrumentação Biomédica

O desenvolvimento da eletrofisiologia começou a se fundamentar por volta do século XVII, com o trabalho desenvolvido pelo cientista natural e microscopista Jan Swammerdam a partir de uma preparação neuromuscular com pernas de rã. Já em meados do final do século XVIII, o professor de anatomia, Luigi Galvani, juntamente com sua esposa Lucia Galeazzi e mais tarde seu sobrinho Giovanni Aldini, começaram a desenvolver experimentos eletrofisiológicos com a preparação de Swammerdam com pernas de rã. Galvani identificou e publicou seu fundamento sobre excitação elétrica nervo-muscular e descreveu alguns outros fenômenos do tipo. Vários outros cientistas desenvolveram ao longo dos anos técnicas e estudos baseados nos sinais elétricos de células e tecidos (Verkhatsky, et al., 2014).

Assim, como dito no capítulo introdutório, eletrofisiologia é o estudo das propriedades elétricas de células e tecidos dos seres vivos (bioeletricidade), e envolve a variação de tensão e corrente em uma ampla variedade de escalas. São fenômenos que ocorrem desde um único canal iônico até tecidos, como o cardíaco. Inclui também a avaliação da atividade elétrica dos neurônios, os quais sofrem uma alteração na concentração de certas substâncias químicas (íons de Sódio [Na] e Potássio [K]), e essa variação gera picos de tensão que podem ser chamados de “potencial de ação” (Kandel, et al., 2000).

Nos insetos, os estímulos elétricos são causados pelos órgãos sensoriais dos mesmos, em processos como a busca de parceiros, procura por hospedeiros, exploração do ambiente, busca por alimentos, entre outros. Fatores como odor, temperatura, estímulos gustativos são fatores decisivos no estudo da interação inseto-ambiente e os receptores que captam estes sentidos estão localizados ao longo do corpo dos mesmos, sendo que as informações sobre os recursos ambientais anteriormente citadas são percebidas graças a essas estruturas sensoriais. Estas estruturas recebem o nome de sensilas e são encontradas em maior quantidade nas antenas e em menor número em outras partes da região da cabeça, como maxilas e palpos labiais, nos tarsos e no aparelho ovopositor (Nascimento, et al., 2013).

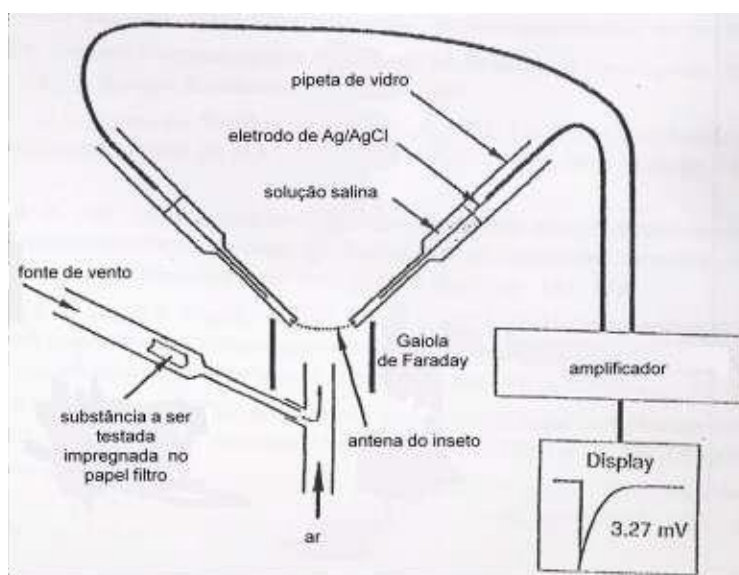


Figura 2-1 Esquema de um Eletroantenograma (EAG).

Uma técnica de eletrofisiologia utilizada em artrópodes é o Eletroantenograma (EAG), como mostra na Figura 2-1. É utilizada para detecção de feromônios, e consiste na medição da tensão entre a ponta e a base da antena de um inseto durante um estímulo de alguma substância volátil (Wibe, 2004).

Outra técnica utilizada é a eletrofisiologia em sensila única, que envolve o registro do potencial elétrico de cada célula através da implantação de eletrodos na base da sensila, seguida de estimulação com substâncias específicas. Essa técnica também é chamada de Registro de Sensila Única (RSU) ou de porta, e é ilustrada na Figura 2-2.

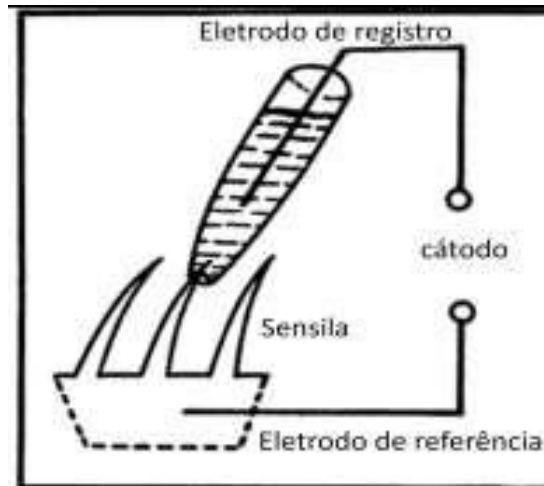


Figura 2-2 Diagrama da preparação para a técnica de Registro de Sensila Única (RSU).

As técnicas acima citadas seguem conceitos de Engenharia Biomédica, por estarem envolvidos com sinais biológicos mesmo não sendo de origem humana. Como citado na Motivação os equipamentos utilizados em Instrumentação Biomédica seguem a lógica do diagrama de blocos da Figura 1-1.

Ainda os sinais biomédicos podem ser classificados da seguinte forma:

- Dinâmicos: aqueles que mudam conforme o tempo. E podem ser:
 - Periódicos, como por exemplo o ECG (Eletrocardiograma).
 - Transiente, no caso dos experimentos citados acima, EAG e RSU, e potencial de ação dos neurônios.
 - Randômicos, como a EMG (Eletromiografia), exame realizado nas células musculares.
- Estáticos: não mudam com o tempo, ou mudam muito pouco, com uma resposta lenta, como por exemplo a temperatura corporal.

Uma forma de exemplificar os tipos de sinais biomédicos, abaixo segue a Tabela 1 com sinais de origem humana, e sua faixa de amplitude que pode ser convertida por transdutores para grandezas elétricas, e na tabela consta também a faixa de frequência dos sinais exemplificados.

Tabela 1 Exemplos de sinais biomédicos e suas aplicações.

Parâmetro fisiológico	Faixa de amplitude do sinal	Faixa de frequência do sinal
Fluxo sanguíneo	0-300 ml / s	DC – 20 Hz
PO ₂	30 – 100 mmHg	DC – 2 Hz
ECG	0,5 – 4 mV	0,01 – 250 Hz
Pneumatografia (taxa de fluxo)	0 – 600 l / min	DC – 40 Hz
Temperatura corporal	32 – 40° C	DC – 0,1 Hz

2.2. Amplificador Operacional

Amplificadores Operacionais (Amp Ops) Integrados são blocos analógicos essenciais para a eletrônica moderna. Introduzidos no final da década de sessenta, vêm sendo constantemente desenvolvidos e aprimorados, tendo alcançado nos dias atuais um alto nível de idealização. Esses blocos são, na realidade, amplificadores de uso universal e transparentes ao circuito do qual fazem parte, resultando em aplicações cujo funcionamento final depende, quase que total e exclusivamente, dos componentes externos, geralmente passivos, a ele agregados. Vistos como uma caixa preta universal e idealizada, esses dispositivos tornam-se extremamente simples quando usados em projetos de eletrônica, a tal ponto que, rigorosamente falando, para aplicá-los de modo eficaz e correto, o usuário necessita possuir conhecimentos, apenas, de resolução de Circuitos Elétricos (Veronese, 2009).

Desse modo, uma das razões da popularidade dos Amp Ops é sua versatilidade. Igualmente importante é o fato do Amp Op integrado tem características que por pouco se aproximam do ideal. Isto implica que é bastante fácil de projetar circuitos utilizando os Amp Ops integrados. Também, circuitos que utilizam Amp Ops trabalham em níveis de desempenho que são próximas à aquelas previstas teoricamente (Sedra, et al., 2011 p. 38), facilitando o projeto, uma vez que modelos teóricos se aproximam do componente real.

Apesar da versatilidade e da facilidade de aplicação, deve-se notar que nenhum Amp Op é universalmente aplicável. Um Amp Op que é ideal para interfaces com transdutores não vai funcionar em aplicações de RF (Rádio Frequência). E um Amp Op com uma boa performance em RF pode ter especificações CC extremamente infelizes. Todas as centenas de modelos de Amp Ops oferecidas pelos fabricantes são otimizadas de formas

ligeiramente diferentes, para que a tarefa do projetista de circuitos seja vasculhar entre as centenas de componentes e achar o punhado que é apropriado para sua aplicação específica (Carter, et al., 2009). Assim existe uma infinidade de circuitos integrados de Amp Ops no mercado, contando com vários fabricantes, uma vasta opção de características de desempenho e diferentes faixas de preços.

São componentes com uma vasta aplicação. São usados em amplificação, controle, geração de ondas senoidais ou não, em frequências desde CC (Corrente Contínua) até vários Mega-hertz. Com emprego na realização de funções clássicas matemáticas como adição, subtração, multiplicação, divisão, integração e diferenciação, os amplificadores operacionais são elementos básicos dos computadores analógicos. São úteis ainda em inúmeras aplicações em instrumentação, sistemas de controle, sistemas de regulação de tensão e corrente, processamento de sinais (Millman, et al., 1972), entre outras.

Nas próximas seções e subseções será apresentado o modelo idealizado do Amp Op, bem como algumas considerações sobre esse modelo comparado com o modelo real, e alguns circuitos que utilizam esse componente e que são objetos de estudo em vários livros.

2.3. Amplificador Operacional Ideal

Antes de mais nada, em um projeto que contenha amplificadores operacionais é necessário conhecer as especificações técnicas e parâmetros do componente oferecidas nos *datasheets* fornecidas pelos fabricantes. Esses parâmetros são geralmente fornecidas em forma de tabela, e usualmente possuem três colunas principais (Carter, et al., 2009).

Valores máximos, são os limites que os componentes não devem ultrapassar podendo comprometer a vida útil e danificar permanentemente o componente. Valores mínimos, os quais junto com os valores máximos formam uma faixa a qual o componente pode operar. E ainda uma coluna com as condições de operações recomendadas ou chamadas ainda de condições típicas de operação.

É possível encontrar uma série de parâmetros nos *datasheets* dos componentes, dos quais se destacam os valores de tensão de alimentação, *slew rate*, parâmetro de largura de banda, impedâncias de entrada e saída, capacitâncias de entrada e saída, condições de

frequências, faixas de corrente, ganhos e margens de ganhos, tempo de subida e tempo de acomodação, entre outros, que cabe ao projetista observar antes de dar continuidade ao projeto.

2.3.1. Terminais do Amp Op

Do ponto de vista do sinal, o Amp Op tem três terminais: dois terminais de entrada e um terminal de saída. A Figura 2-3 mostra o símbolo que é usado para representar o Amp Op. Terminais 1 e 2 são terminais de entrada, e o terminal 3 é o terminal de saída (Sedra, et al., 2011 p. 39).

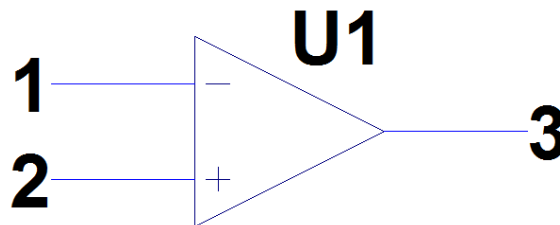


Figura 2-3 Símbolo do Amp Op, com os terminais de entrada, inversora(número 1) e não-inversora(número 2); o terminal número 3 é o terminal de saída.

Amplificadores requerem alimentação CC para operarem. A maioria dos Amp Ops integrados requer uma fonte de alimentação CC simétrica, como mostrado na Figura 2-4. Dois terminais, 4 e 5, representam a alimentação positiva V_{cc} e a negativa $-V_{ee}$. Os pinos nomeados como referido anteriormente baseiam-se em tecnologia BJT (*Bipolar Junction Transistor*, em português, Transistor de Junção Bipolar). Em Amp Ops baseados em tecnologia FET (*Field Effect Transistor*, em português, Transistor de Efeito de Campo), a alimentação positiva é chamada de V_{DD} , ou alimentação de dreno comum, enquanto a alimentação negativa de V_{SS} , ou alimentação de fonte comum. No modo geral podem ser apenas referidas como V_{cc+} e V_{cc-} , ou mesmo V_+ e V_- , mas muitas vezes esses pinos são retirados dos esquemas elétricos já se pressupondo a necessidade de alimentação desses componentes ativos, e uma forma de simplificar diagramas muito complexos.

Além dos três terminais de sinal e dos dois de alimentação, o Amp Op pode ter outros terminais para usos específicos. Esses outros terminais podem incluir terminal para ajuste de *offset*, também chamado de terminal de ajuste de zero, e terminal para compensação

de frequência. Esses terminais são necessários devido à diferenças causadas pelos processos de fabricação e configurações internas ao Amp Op, que diferem o modelo real do idealizado.

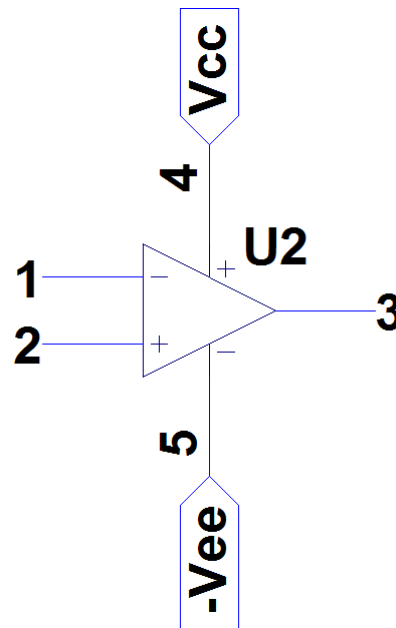


Figura 2-4 Amp Op e seus terminais de alimentação positiva indicado por 4, e negativa indicado por 5.

2.3.2. Função e Característica do Amp Op Ideal

Dando continuidade na análise desse componente será apresentada a função principal do Amp Op. O Amp Op é projetado para operar como um sensor de diferença entre os sinais de tensão aplicados nos seus dois terminais de entrada 2 e 1 (isto é, o valor de $v_2 - v_1$), multiplicando esse valor por um número A, que resulta numa tensão $A(v_2 - v_1)$, que aparece no terminal de saída 3 (Sedra, et al., 2011 p. 39).

Em um Amp Op ideal, supõe-se que nenhuma corrente de entrada seja drenada, ou seja, as correntes nos terminais 1 e 2 são iguais a zero. A partir dessa suposição, tem-se que a *impedância de entrada do Amp Op ideal é supostamente infinita*.

E o terminal de saída é suposto como se fosse o terminal de uma fonte de tensão ideal. Assim a tensão entre o terminal 3 e o terra será sempre igual a $A(v_2 - v_1)$, independentemente da corrente que possa ser drenada por uma impedância de carga. Portanto, a *impedância de saída do Amp Op ideal é supostamente igual a zero*.

Com as suposições dos parágrafos acima, chega-se ao modelo equivalente do circuito, mostrado na Figura 2-5. Nela é possível notar as correntes nos terminais 1 e 2 supostas zero, além da tensão da saída em fase com v_2 (mesmo sinal), por isso leva o sinal “+” e é denominado **terminal de entrada não inversora**, e defasada em relação a v_1 (sinal oposto), levando o sinal “-” e denominado **terminal de entrada inversora**, que pode ser também observado na Figura 2-3.

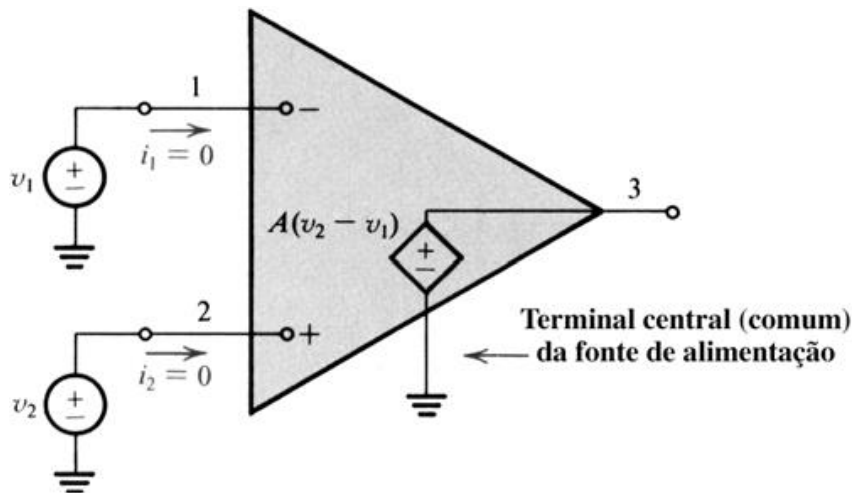


Figura 2-5 Circuito equivalente do Amp Op ideal (Sedra, et al., 2011 p. 23).

Outra propriedade do Amp Op ideal, é que ele responde apenas a diferença de sinal $v_2 - v_1$, sendo assim ignora qualquer sinal comum a ambas as entradas. Essa propriedade é chamada de **rejeição de modo comum**, e conclui-se que o Amp Op ideal tem rejeição de modo comum infinita, ou ainda, equivalentemente, **ganho de modo comum nulo**. Ao ganho A , descrito anteriormente, se dá o nome de **ganho diferencial**, ou ainda **ganho em malha aberta**.

Em relação à resposta em frequência, o Amp Op ideal tem um ganho A que permanece constante desde a frequência zero até a frequência infinita. Ou seja, o Amp Op amplificará sinais de qualquer frequência com igual ganho, resultando em uma largura de faixa de passagem infinita. Resumindo as características e suposições do Amp Op ideal seguem a Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 Características do Amp Op ideal.

-
1. Impedância de entrada infinita
 2. Impedância de saída nula
 3. Ganho de modo comum nulo ou, equivalentemente, rejeição de modo comum infinita.
 4. Ganho em malha aberta A infinito
 5. Largura de faixa de resposta em frequência infinita
-

Tabela 3 Suposições básicas do Amp Op ideal.

Nome do Parâmetro	Símbolo do Parâmetro	Valor
Corrente de Entrada	I_{IN}	0
Tensão de Entrada Offset	V_{OS}	0
Impedância de Entrada	Z_{IN}	∞
Impedância de Saída	Z_{OUT}	0
Ganho	A	∞

A partir das propriedades e características descritas anteriormente, serão apresentados algumas configurações de circuitos que utilizam o Amp Op, a efeito de exemplificação de seu uso.

2.4. Topologias

Serão apresentados os circuitos mais comuns que utilizam o Amp Op, e uma breve descrição de seus funcionamentos.

2.4.1. Configuração Não Inversora

A configuração não inversora tem o sinal de entrada conectado no terminal não inversor, como mostra a Figura 2-6. Pela suposição, a fonte de sinal vê uma impedância de entrada infinita, portanto a corrente $I_B=0$. Não há tensão de offset de entrada, ou seja, $V_{OS}=V_E=0$, assim a entrada inversora deve estar no mesmo potencial da entrada não inversora, fato este que exemplifica o conceito de curto-circuito virtual nos Amp Ops. A corrente de saída se divide até que a queda de tensão promovida por R_F no nó da entrada realimentada no terminal inversor se iguale a V_{IN} . Isso faz com que a DDP em R_G também seja V_{IN} .

$$V_{IN} = V_{OUT} \frac{R_G}{R_G + R_F} \quad [1]$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_G + R_F}{R_G} = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad [2]$$

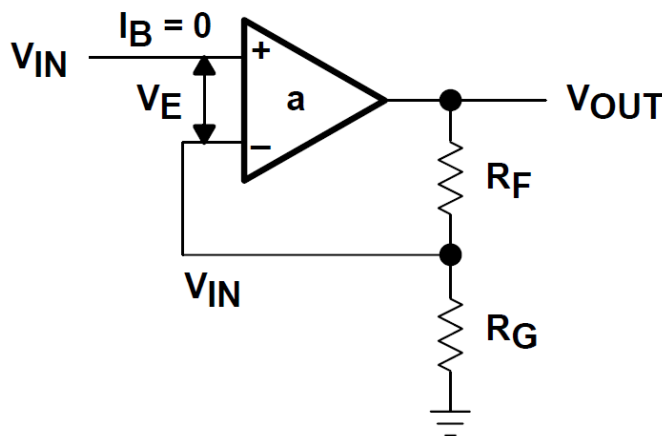


Figura 2-6 Amp Op utilizado na configuração não-inversora (Carter, et al., 2009 p. 23).

Da Figura 2-6, nota-se que V_{OUT} é a entrada do divisor de tensão, e V_{IN} é a saída. Como não há corrente fluindo para nenhum dos terminais do Amp Op, a regra do divisor de tensão pode ser aplicada.

A equação [1] demonstra o cálculo do divisor, e por manipulação algébrica se encontra o ganho, mostrado na Equação [2], o qual depende somente dos valores de R_F e R_G .

2.4.2. Configuração Inversora

Na configuração inversora o terminal de entrada não inversor é aterrado, como mostra a Figura 2-7. O fluxo de corrente nos terminais de entrada é suposto zero, portanto a corrente fluindo em R_G é igual a corrente que flui através de R_F . Usando a lei de *Kirchoff* tem se a Equação [3] e a manipulação algébrica da mesma nos dá a equação de ganho mostrada por [4]. O sinal negativo é usado porque essa é a entrada inversora

$$I_1 = \frac{V_{IN}}{R_G} = -I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F} \quad [3]$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_F}{R_G} \quad [4]$$

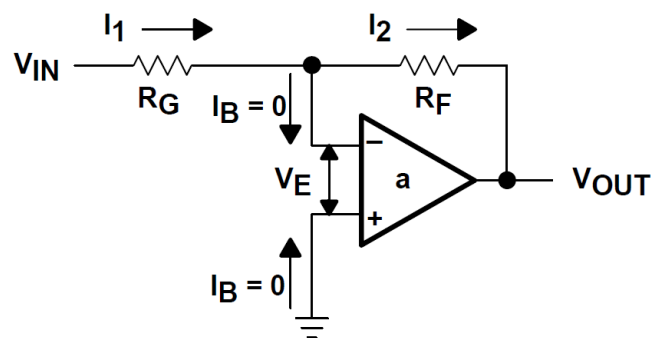


Figura 2-7 Amp Op utilizado na configuração inversora (Carter, et al., 2009 p. 25).

Nessa configuração o ganho é uma função unicamente da realimentação e dos resistores de ganho R_F e R_G , portanto a realimentação cumpre seu papel fazendo com que o ganho seja independente dos parâmetros do Amp Op. Assim a razão R_F/R_G determina o nível do ganho.

2.4.3. Somador

O circuito somador segue o raciocínio do amplificador inversor, conectando-se mais entradas no terminal inversor do Amp Op, como mostra a Figura 2-8.

O princípio da superposição é usado para calcular a tensão de saída resultado de cada entrada, e a tensão de saída é somada algebricamente para se obter a tensão total de

saída. As equações de superposição do circuito da Figura 2-8 são as equações[5], [6] e [7]. E a tensão de saída final é dada por [8].

$$V_{OUTN} = -\frac{R_F}{R_N} V_N \quad [5]$$

$$V_{OUT1} = -\frac{R_F}{R_1} V_1 \quad [6]$$

$$V_{OUT2} = -\frac{R_F}{R_2} V_2 \quad [7]$$

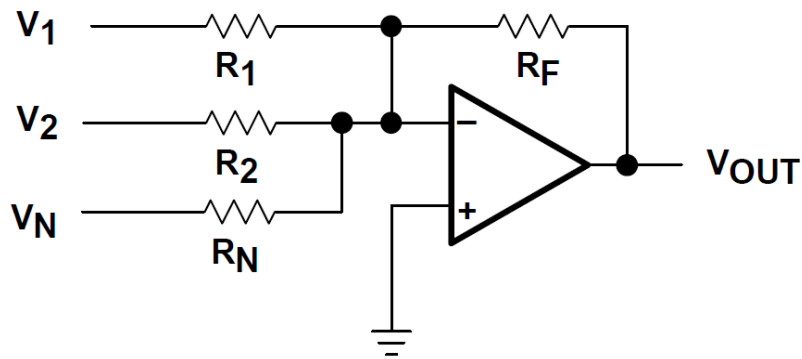


Figura 2-8 Circuito somador (Carter, et al., 2009 p. 26).

$$V_{OUT} = -\left(\frac{R_F}{R_N} V_N + \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2\right) \quad [8]$$

2.4.4. Amplificador Diferencial

O circuito amplificador diferencial amplifica a diferença entre os sinais aplicados nos terminais de entrada do Amp Op, como indica as fontes de tensão V_1 e V_2 da Figura 2-9. Superposição é usada para calcular a tensão de saída resultante de cada tensão de entrada, e então as duas tensões de saída são somadas para se chegar na tensão de saída final.

A tensão de entrada do Amp Op resultante da fonte de tensão V_1 é mostrada nas Equações [9] e [10]. É utilizada a regra do divisor de tensão para calcular V_+ , e a equação de ganho não inversora (Equação [2]) é usada para calcular a saída de tensão não inversora, V_{OUT1} .

$$V_+ = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [9]$$

$$V_{OUT1} = V_+(G_+) = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) \quad [10]$$

A Equação [4], de ganho da configuração inversora, é usada para o cálculo da entrada inversora indicado por V_{OUT2} em [11]. As equações inversora V_{OUT2} (Equação [11]) e não inversora V_{OUT1} (Equação [10]) são somadas para se chegar na equação de saída final, representada pela Equação [12].

$$V_{OUT2} = V_2 \left(-\frac{R_4}{R_3} \right) \quad [11]$$

$$V_{OUT} = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - V_2 \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad [12]$$

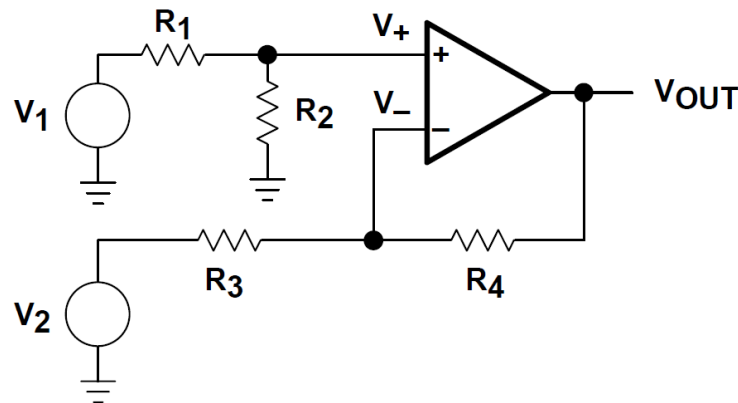


Figura 2-9 Amplificador diferencial (Carter, et al., 2009 p. 27).

Para melhor ilustrar a amplificação da diferença das fontes V_1 e V_2 , se $R_1=R_3$ e $R_2=R_4$, a Equação [12] se reduz a [13].

$$V_{OUT} = (V_1 - V_2) \frac{R_4}{R_3} \quad [13]$$

Assim é possível observar que a diferença de sinal (V_1-V_2) é multiplicada pela razão R_4/R_3 , sendo portanto um amplificador de diferenças.

Ainda há uma série de aplicações que utilizam Amp Ops com as mais diversas finalidades. Pode-se citar os filtros ativos (passa-baixa, passa-alta, passa-banda), comparadores, derivativos, integradores, amplificadores logarítmicos, retificadores, seguidores de tensão, entre outros.

2.5. Ruídos

Qualquer distúrbio não desejado que obscureça ou interfere um sinal de interesse é geralmente referido como *ruído* (Ott, 1988). O erro de desvio devido à corrente de polarização de entrada e a tensão de offset de entrada é um exemplo familiar de ruído, ruído CC neste caso. Entretanto, existem muitos outros tipos de ruídos, particularmente ruído CA, que pode degradar significativamente o desempenho de um circuito, a menos que medidas apropriadas para redução de ruídos forem tomadas. Dependendo da sua origem, ruído CA (Corrente Alternada) é classificado como ruído externo, ou interferente, e ruído interno, ou inerente (Franco, 2002).

Ruído é um sinal puramente aleatório, sendo que o valor ou a fase da forma de onda não podem ser preditos. Nos Amp Ops o ruído pode ser gerado internamente ou dos componentes passivos associados, mas usualmente as fontes de ruído externa são dominantes em relação a esse tipo de fenômeno (Carter, et al., 2009).

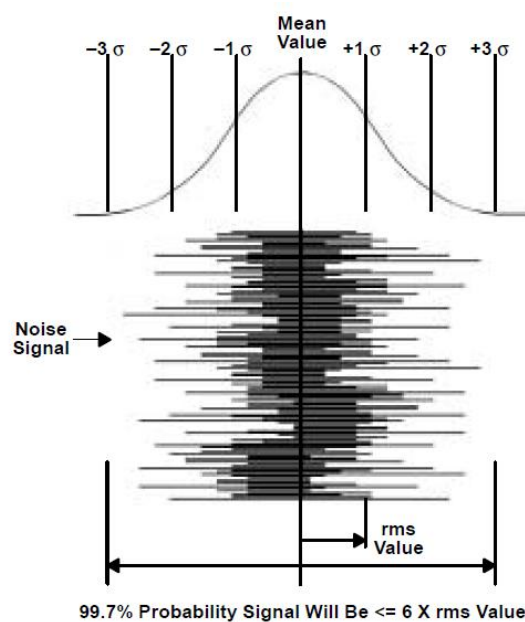


Figura 2-10 Distribuição Gaussiana da amplitude do ruído (Carter, et al., 2009).

A tensão de ruído instantânea tende a ser positiva e negativa, e quando plotada forma um padrão aleatório centrada em zero, e como as fontes de ruído tem essas amplitudes que variam aleatoriamente no tempo, uma forma de mesurar esse comportamento é através de teorias de probabilidade, mais especificamente, através da função densidade de probabilidade (FDP). A FDP mais comum é a Gaussiana, a qual tem um valor médio de amplitude o qual é o mais provável de ocorrer. E a probabilidade do ruído ocorrer e que seja maior ou menor que o valor médio decai em uma curva em formato de sino, o qual é simétrico à média (Carter, et al., 2009), como mostra a Figura 2-10.

O símbolo σ (sigma) é o desvio padrão da distribuição Gaussiana, e o *rms value* (*root mean square value*, ou valor quadrático médio) o valor da tensão e corrente do ruído. No caso de distribuição normal Gaussiana, 68,26% dos valores de ruído estão entre a média (*Mean Value*) e $\pm 1\sigma$, 95,46% entre a média e $\pm 2\sigma$ e 99,73% entre a média e $\pm 3\sigma$ (Magalhães, et al., 2004).

2.5.1. Ruído Interferente ou Externo

Esse tipo de ruído é causado pela interação não desejada entre o circuito e o mundo externo, ou mesmo entre diferentes partes do circuito entre si. Essa interação pode ser elétrica, magnética, eletromagnética, ou até mesmo eletromecânica, como microfonia e ruído piezoelétrico. Interações elétricas e magnéticas aparecem através de capacitâncias parasitas e indutância mútua entre circuitos adjacentes ou partes adjacentes do mesmo circuito. Interferência eletromagnética se manifestam do fato de que cada fio, cabo e trilha se comportam como uma potencial antena. Ruído externo pode também ser inadvertidamente injetado no circuito via aterramento e via alimentação

Ruído interferente pode ser periódico, intermitente, ou completamente aleatório. Usualmente é reduzido ou evitado se minimizando arranjo eletrostático e eletromagnético da frequência de linha e seus harmônicos, estações de rádio, arco de chaveamento mecânico, picos de tensão de componentes reativos, entre outros. Algumas técnicas de redução dos ruídos interferentes citados anteriormente podem incluir filtragem, desacoplamento, escudo eletrostático e eletromagnético, reorientação física dos componentes e trilhas e uso de fontes de alimentação de baixo ruído, além de uma série de outras técnicas. Embora muitas vezes

mal concebidas como “Magia Negra”, o ruído interferente pode ser explicado e tratado de forma racional (Ott, 1988).

2.5.2. Ruído Inerente ou Interno

Mesmo se gerenciado a fim de se remover todos os ruídos interferentes, um circuito ainda vai exibir ruídos inerentes. Essa forma de ruído é aleatória na natureza e é associada a fenômenos randômicos, como a agitação térmica de elétrons em resistores e da criação aleatória e recombinação de pares elétrons-lacunas em semicondutores. Por causa da agitação térmica, cada elétron vibrante dentro de um resistor constitui uma minúscula corrente. Essas correntes se somam algebricamente para originarem uma rede de correntes e, assim, uma rede de tensão que, através do zero como média flutua constantemente por causa da distribuição aleatória das magnitudes e das direções instantâneas das correntes individuais. Essas flutuações ocorrem mesmo se o resistor está no dreno do circuito. Assim, é bastante apropriado assumir que cada nó de tensão e cada corrente em um circuito estão constantemente flutuando em volta de seus valores desejados (Ott, 1988).

2.5.3. Tipos de Ruídos

Nos Amp Ops e em seus circuitos associados há cinco tipos de ruídos:

1. Ruído de corrente (*Shot noise*): Causado pela soma das flutuações randômicas no movimento de cargas em condutores, ou seja, no fluxo de corrente oriundo do movimento de elétrons e partículas carregadas que se movem de acordo com um potencial aplicado;
2. Ruído térmico (Ruído branco): Gerado da agitação térmica dos elétrons em um condutor;
3. Ruído de contato (*Flicker noise*): Sua origem é um dos mais antigos problemas não resolvidos da física. É presente em componentes ativos e passivos, e pode ser relacionado à imperfeição na estrutura cristalina dos semicondutores;
4. Ruído pipoca (*Burst noise*): Relacionado às imperfeições em materiais semicondutores, caracterizado por pulsos discretos de alta frequência. Chamado de ruído pipoca pois faz sons de estouro de frequência abaixo de 100 Hz quando tocado através de um alto falante;

5. Ruído avalanche: Provocado quando junções de semicondutores são operados em modo reverso.

Alguns ou todos os ruídos acima podem estar presentes em um projeto com Amp Ops, apresentando assim um espectro de ruído único para o sistema. Na maioria dos casos não é possível separar os efeitos, mas conhecendo as causas é possível otimizar o projeto, minimizando os ruídos em uma largura de banda de interesse. Os projetos que requerem baixo ruído devem ter um balanço entre as fontes de ruídos externas e as internas (Carter, et al., 2009).

2.5.4. Relação Sinal-Ruído

A presença de ruídos degrada a qualidade do sinal e representa o limite final do tamanho dos sinais que podem ser detectados com sucesso, medidos e interpretado. A qualidade de um sinal na presença de ruído é determinada por meio da relação sinal-ruído (do inglês *signal-to-noise ratio*, SNR).

$$SNR = \frac{S_{(f)}}{N_{(f)}} = \frac{\text{rms signal voltage}}{\text{rms noise voltage}}$$

[14]

Essa equação representa basicamente a razão entre a tensão eficaz do sinal pela tensão eficaz do ruído, e é uma forma de quantificar a presença do ruído no circuito.

2.6. Avaliação de Desempenho em Circuitos Eletrônicos

O uso de métodos de avaliação de desempenho de circuitos é importante pois permitem a classificação e a comparação entre diferentes projetos. Também permitem verificar se o circuito atende ou não pré-requisitos do projeto. A seguir serão apresentados métodos de avaliação para circuitos que operam na faixa de frequência dos amplificadores deste documento.

2.6.1. Largura de Banda

Os circuitos eletrônicos tendem a operar em uma faixa de frequências específica devido às limitações internas dos componentes, como é o caso dos amplificadores operacionais, que idealmente operam em uma faixa de frequências infinita como foi citado na seção 2.3.2 Função e Característica do Amp Op Ideal, mas que no caso dos componentes reais isso não ocorre.

Em certos circuitos essas limitações são desejadas, como é o caso de filtros, ou em alguns casos são indesejadas, limitando assim a excursão de frequências de operação do circuito. A medição desta faixa de frequências se faz necessária pois dá ao projetista as frequências que o circuito pode operar ou ainda se certos componentes são adequados ao circuito. Existem no mercado equipamentos que medem esse tipo de grandeza, chamado analisadores de rede, sendo estes muitas vezes equipamentos de alto custo (Santini, 2014).

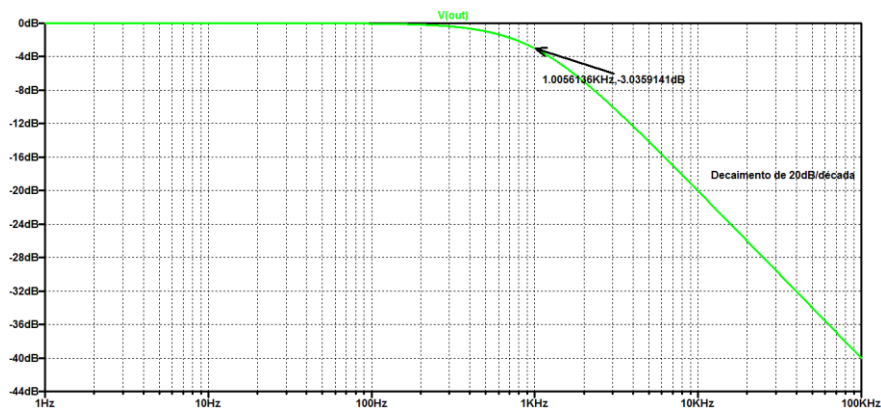


Figura 2-11 Resposta em frequência de um filtro passa-baixa passivo; frequência de corte de 1000Hz indicada pelo ponto de decaimento de 3dB.

Uma outra forma de se medir a largura de banda dos circuitos, consiste em monitorar o comportamento da saída para sinais com diferentes frequências injetados na entrada. A determinação da largura de banda é feita tomando-se a faixa de frequências que o sinal fica acima de um limiar, em geral acima do ponto que a potência do sinal cai pela metade, equivalente a decair 3 dB. Esse ponto é chamado de frequência de corte, como exemplifica a Figura 2-11, a qual é tomado a resposta em frequência do filtro passa-baixa passivo da Figura 2-12.

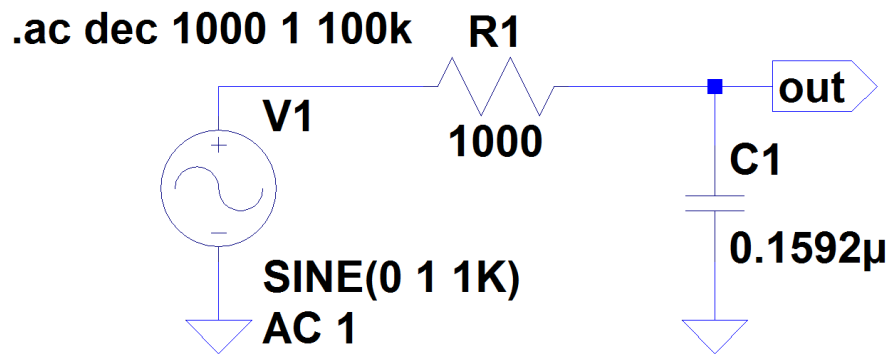


Figura 2-12 Filtro passivo passa-baixa, com frequência de corte de 1000Hz.

O cálculo da frequência de corte do filtro acima é dado pela equação [15], o qual é o resultado esperado como foi definido e indicado no gráfico de ganho da Figura 2-11.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2.3,14.1000.0,1592. 10^{-6}} = 1000Hz$$

[15]

Ainda existem circuitos que desenvolvem mais um ponto de frequência de corte, no caso por exemplo de filtros passa-faixa, essas chamadas de frequências de corte superior e inferior, e a diferença entre elas definem uma faixa de ganho acima do limiar de decaimento de 3 dB.

3. Materiais e Métodos

Nesse capítulo serão apresentados as simulações computacionais e os testes executados em laboratório.

3.1. Simulação Computacional

Para análise dos circuitos em ambiente virtual foi utilizado o software *LTspiceIV*. Esse *software* que foi utilizado é classificado como *freeware* (Engelhardt), ou seja, o seu uso não gera custo monetário ao usuário, entretanto não pode ser modificado ou redistribuído, ou ainda aplicado engenharia reversa no seu código sem a permissão do autor ou desenvolvedora. Dessa forma muitas vezes seu código não é aberto como em *softwares open-source*(código aberto).

O *LTspiceIV* é um *software* de propriedade da fabricante de semicondutores *Linear Technology*, e implementa simulações *SPICE* de circuitos eletrônicos (LTC, 2016). É um simulador de circuitos analógicos com capturas de esquemáticos integrada e visualizador de formas de ondas (Engelhardt). O *SPICE* é uma forma de simulação que pode ser utilizado para analisar o comportamento elétrico de um circuito que contém uma grande variedade de componentes, como transistores, resistores, diodos, capacitores, entre outros. Esta ferramenta computacional permite que se estime com grande precisão, através de variadas simulações, o comportamento de circuitos elétricos de diferentes tamanhos e níveis de complexidade (Vargas, et al.).

Os diagramas esquemáticos dos circuitos utilizados neste trabalho são mostrados na Figura 3-1, Figura 3-2 e Figura 3-3, que são respectivamente os circuitos nomeados “*Head Amplifier*” e “*AC Pre Amplifier*” com e sem filtro de saída, e implementados em ambiente virtual *LTspiceIV* o qual foi brevemente citado acima. A Tabela 4 apresenta alguns dos principais comandos utilizados na análise dos circuitos, assim como os comandos utilizados nas simulações aparecem nos esquemáticos apresentados.

Tabela 4 Principais comandos de análise *SPICE*.

Tipo de análise	Comando <i>SPICE</i>
Ponto de operação	.OP
Varredura CC	.DC nome_da_fonte valor_inicial valor_final valor_do_passo
Resposta CA em frequência	AC DEC pontos_por_decada freq_inicial freq_final .AC OCT pontos_por_oitava freq_inicial freq_final AC LIN total_de_pontos freq_inicial freq_final
Resposta transiente	TRAN passo_de_tempo tempo_final [tempo_sem_imprimir tamanho_máximo_do_passo]

As simulações que foram executadas nos circuitos foram com o comando *.AC*, que gera resposta CA em frequência. O *software* executa uma análise em frequência em pequenos sinais, onde calcula automaticamente o ponto de operação CC, e através do qual o *software* define os valores dos parâmetros que serão empregados nos circuitos de modelos equivalentes para pequenos sinais. Esse modelo então é analisado em uma faixa de frequência definida, a quantidade de pontos e o modo de espaçamento da análise é definida pelo usuário, sendo espaçados logaritmicamente, por década ou por oitava, Pode se ainda escolher fazer uma varredura linear, mas se utiliza usa função quando a faixa de frequências a se analisar é estreita, para faixas largas é usualmente utilizado a escala logarítmica (Vargas, et al.).

Os comandos utilizados nas simulações foram:

- *.ac oct 100 frecuencia_inicial frecuencia_final* : Resposta CA em frequência, com 100 pontos espaçados por oitava, com faixa de frequência definida conforme a simulação.
- *.step param C list valores de C*: Esse comando faz com que várias análise sejam repetidas em uma única simulação enquanto um parâmetro muda conforme definido. No caso, o parâmetro a ser modificado é C, e os valores serão os inseridos na ultima variável, *valores de C*.

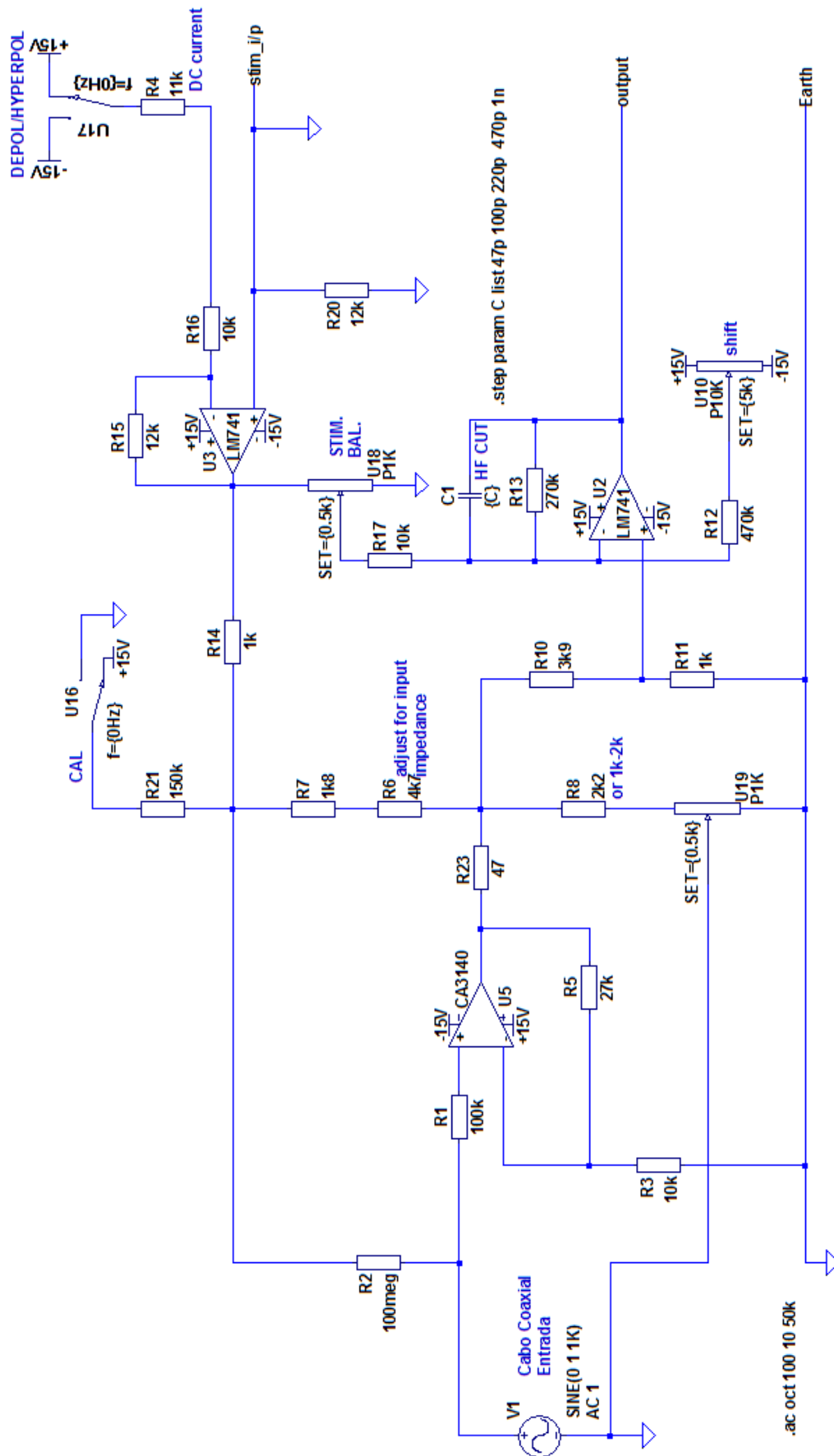


Figura 3-1 Esquemático do circuito eletrônico "Head Amplifier".

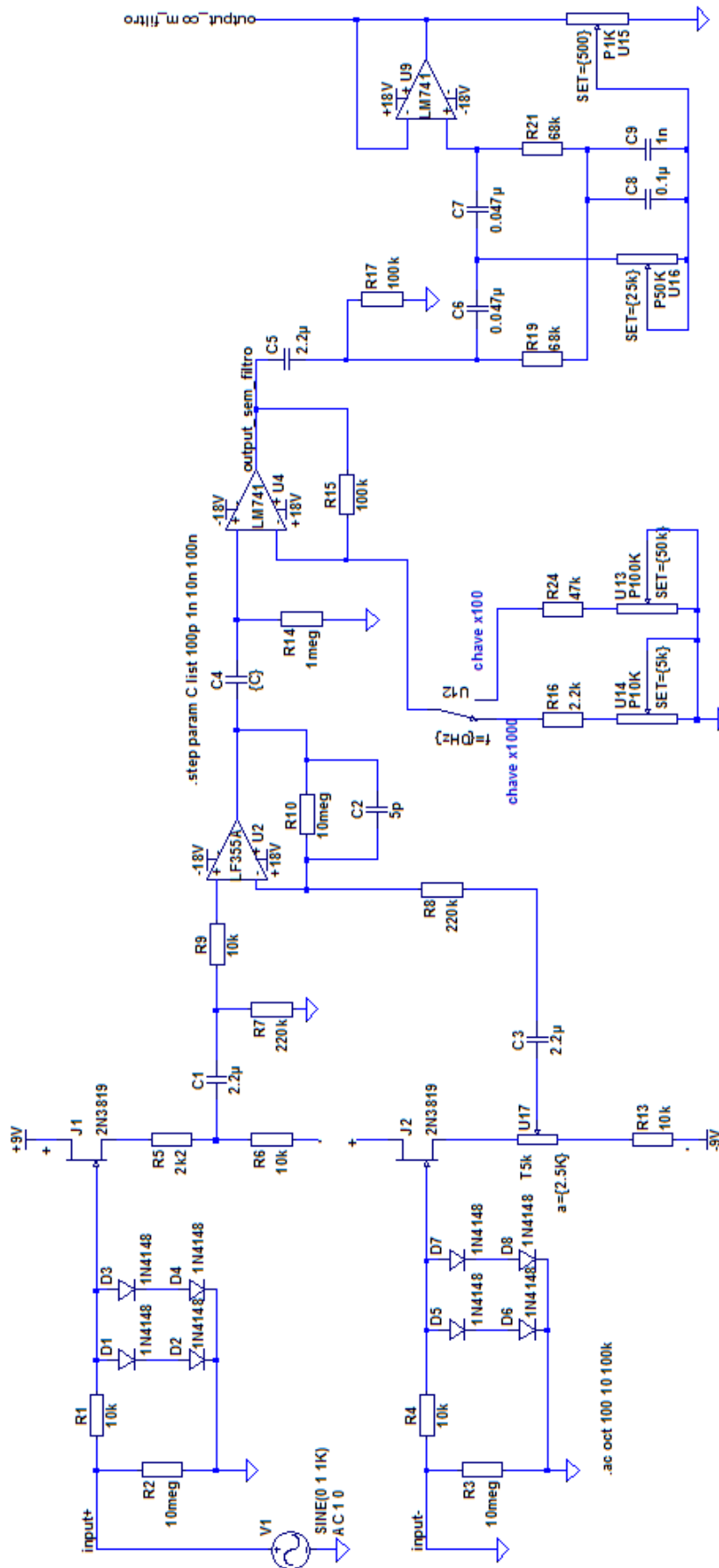


Figura 3-2 Esquemático do circuito eletrônico “AC Pre Amplifier” com filtro de saída.

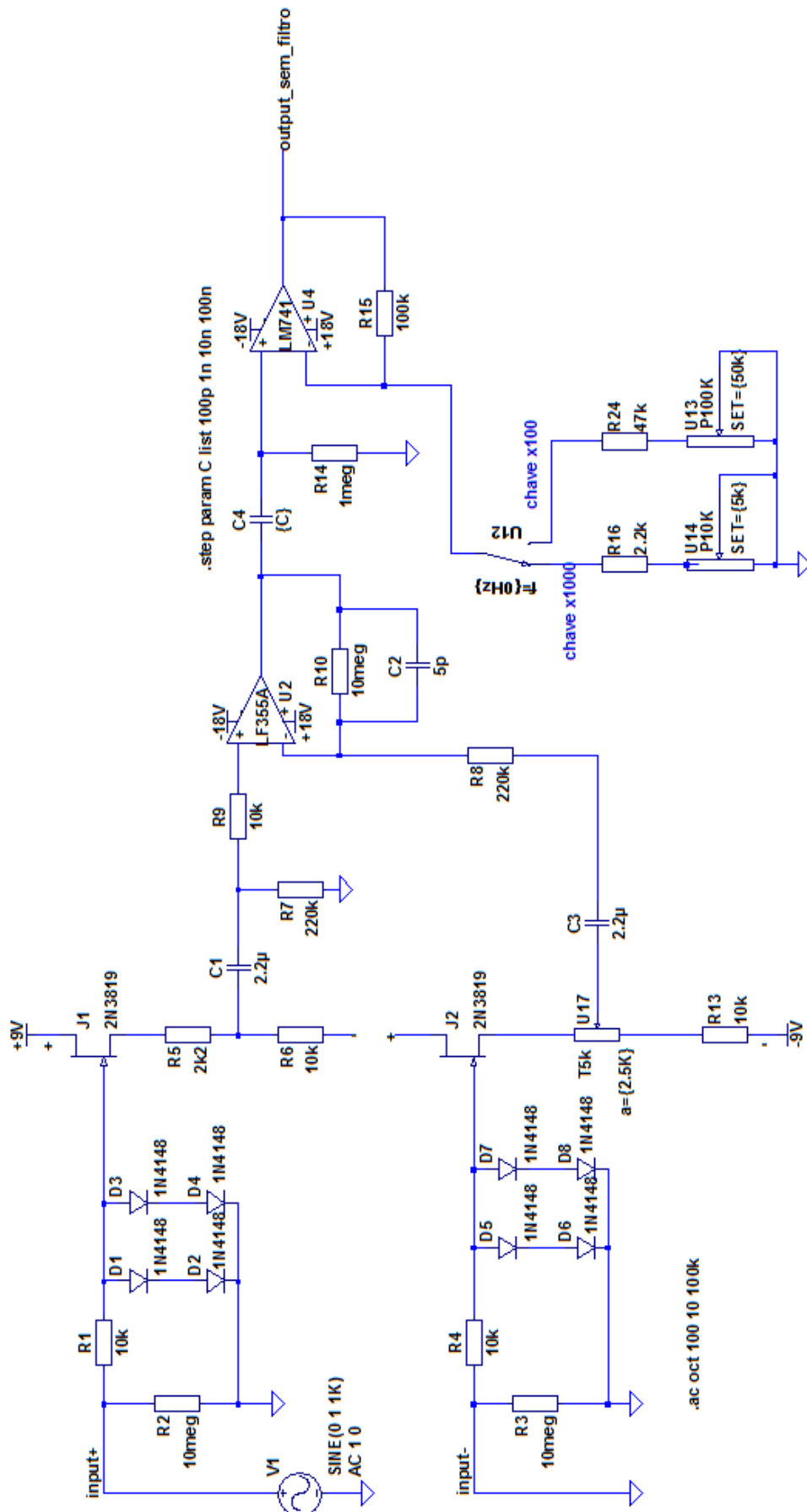


Figura 3-3 Esquemático do circuito eletrônico “AC Pre Amplifier” sem filtro de saída.

Os resultados e gráficos de ganho gerados pelas simulações computacionais são mostrados nas seções 4.1.1 Largura de Banda do Circuito “*Head Amplifier*”. e 4.1.2 Largura de Banda do Circuito “*AC Pre Amplifier*”. Alguns detalhes de como foram feitas as simulações também são discutidas nestas seções.

3.2. Montagem em Placa Perfurada Padrão

Para a montagem dos circuitos, foi escolhida uma técnica que utiliza placas perfuradas padrão, no qual as trilhas são traçadas utilizando um cordão de solda de estanho para ligar os terminais dos componentes. As placas eletrônicas são mostradas na Figura 3-4, Figura 3-5, Figura 3-6 e Figura 3-7.

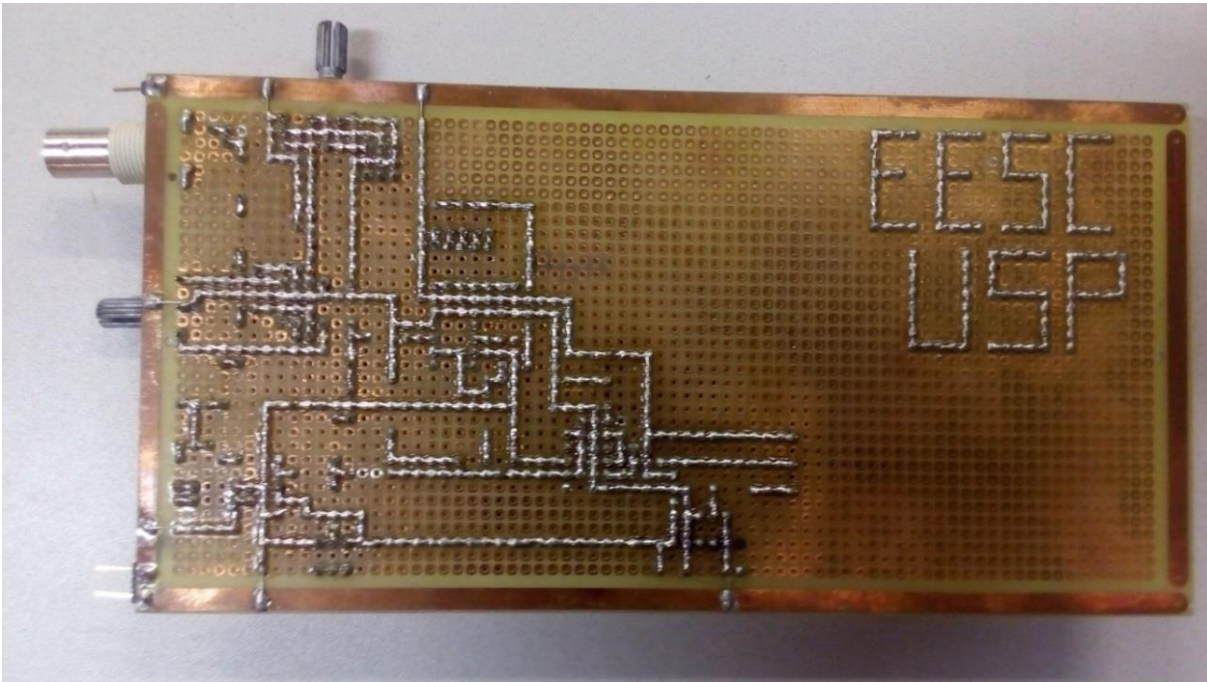


Figura 3-4 Vista inferior do circuito "*Head Amplifier*".

Esse tipo de técnica é uma forma de montagem de circuitos que já foram previamente definidos, seja por simulação computacional ou em montagem em matriz de contato. Além de prover uma solução rápida para se executar testes em bancada e mais confiável que a matriz, sem a necessidade de ser feito o *design* e implementação em softwares de PCB (*Printed Circuit Board*, em português, Placa de Circuito Impresso).

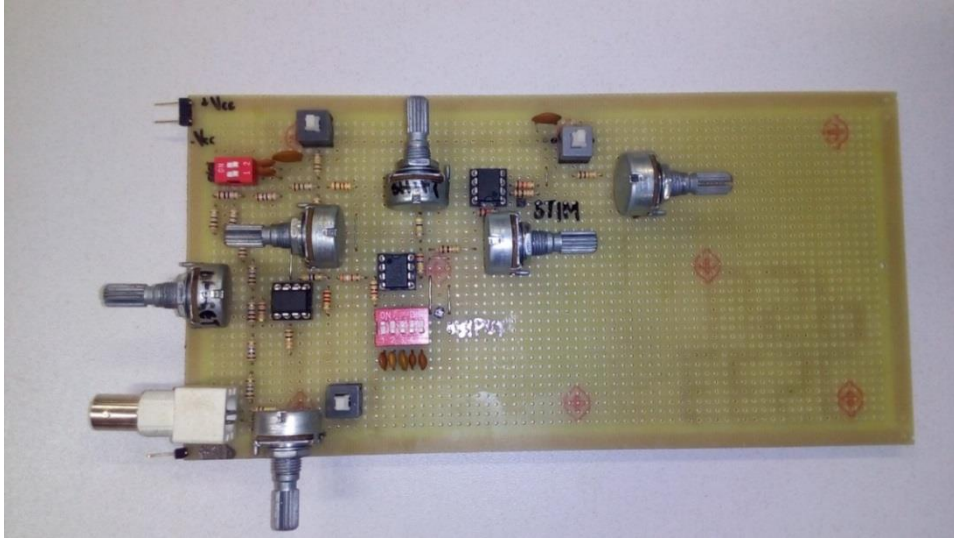


Figura 3-5 Vista superior do circuito "Head Amplifier".

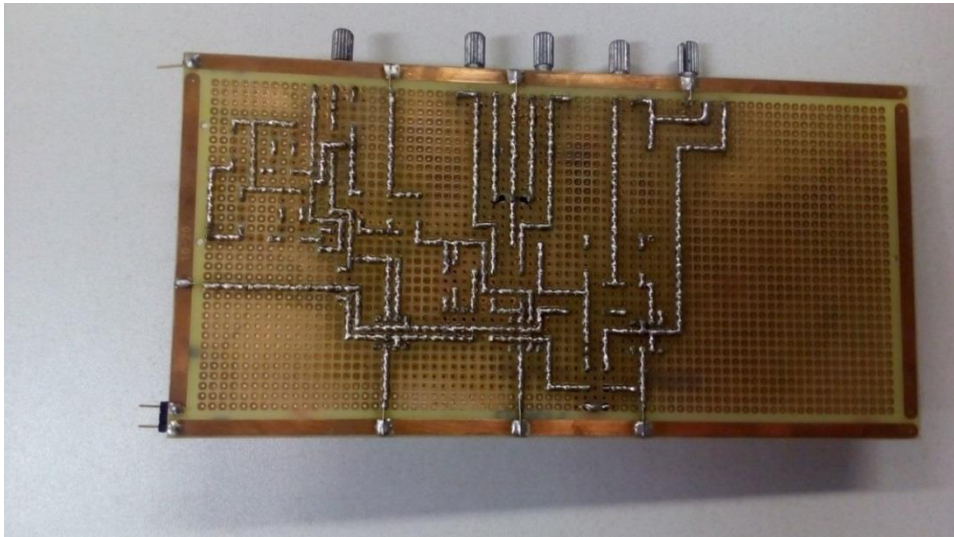


Figura 3-6 Vista inferior do circuito "AC Pre Amplifier".

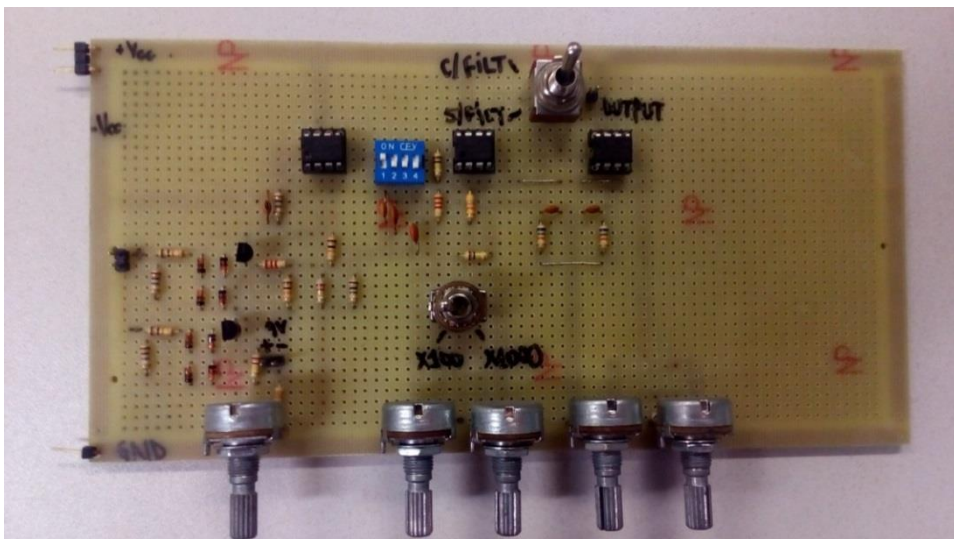


Figura 3-7 Vista superior do circuito "AC Pre Amplifier".

3.3. Bancada de Testes

Para a realização dos testes em bancada, foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Gerador de funções arbitrárias *Tektronix AFG320* (Figura 3-8);
2. Fonte de alimentação digital *Minipa MPC-303D* (Figura 3-9);
3. Osciloscópio digital *Tektronix TDS210* (Figura 3-10).



Figura 3-8 Gerador de funções arbitrárias.



Figura 3-9 Fonte de alimentação digital CC.

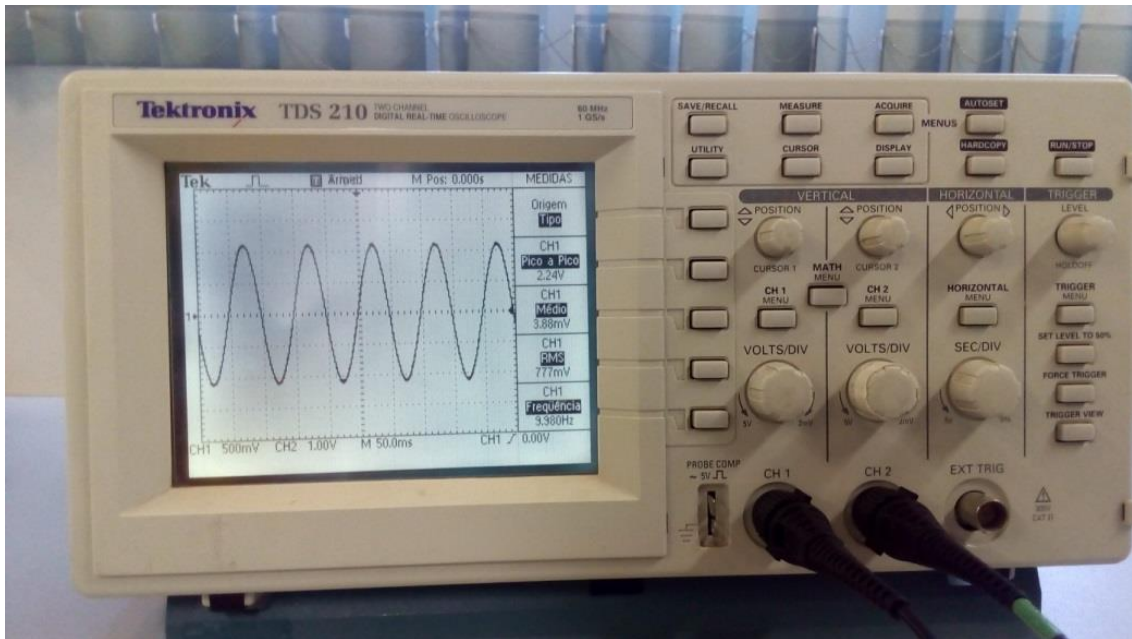


Figura 3-10 Osciloscópio digital.

3.3.1. Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “*Head Amplifier*”.

A disposição dos equipamentos e do circuito eletrônico neste teste é ilustrado abaixo em Figura 3-11 e Figura 3-12, no qual o circuito em teste em questão é o “*Head Amplifier*”, indicado pela esquemático da Figura 3-1 e pelas Figura 3-4 e Figura 3-5.

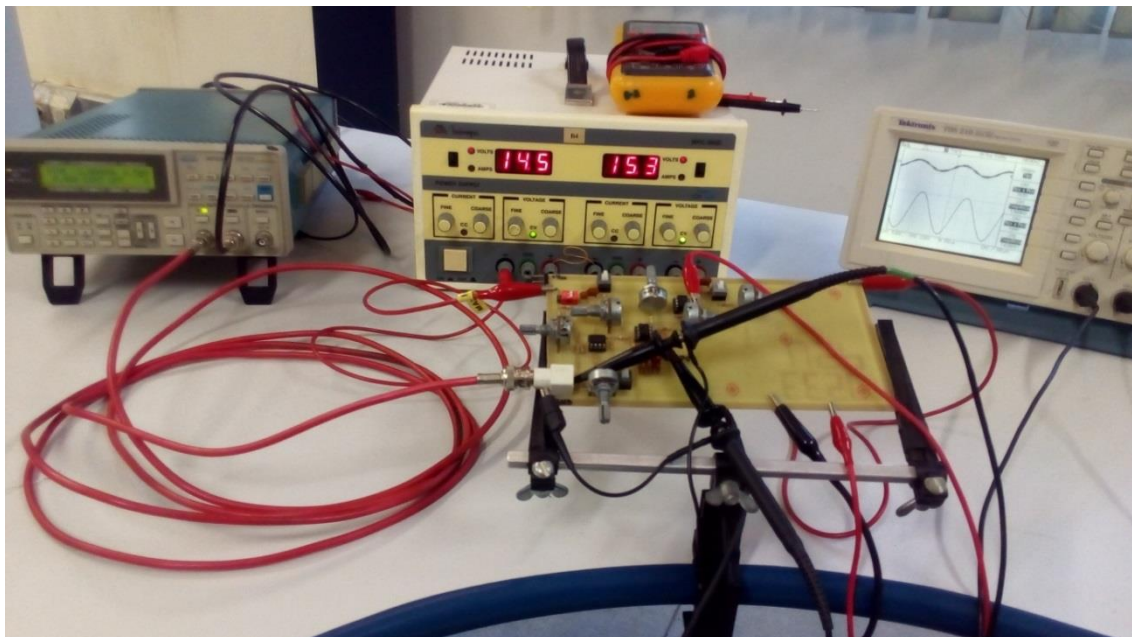


Figura 3-11 Montagem da bancada de testes para o circuito “*Head Amplifier*”.

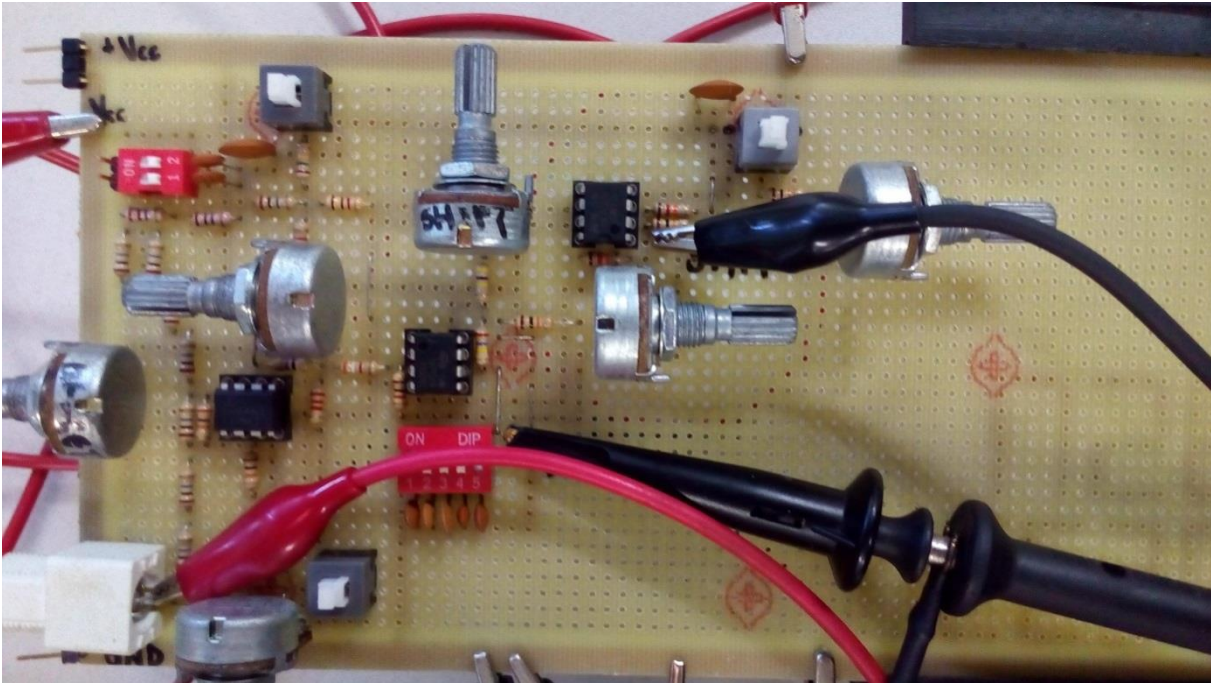


Figura 3-12 Circuito "Head Amplifier" devidamente alimentado, conectado à fonte geradora de sinais e ao osciloscópio.

Para este teste, após a correta alimentação da placa com a fonte CC configurada como fonte simétrica com valores de $\pm 15V$, foi determinada a seguinte metodologia:

1. Fixou-se o gerador de sinais com uma forma de onda senoidal na frequência 1,0kHz e amplitude de 0,05V, ou seja, tensão senoidal pico a pico de 0,1V; vale salientar que essa tensão é a menor gerada pelo gerador de funções utilizado (o modelo do equipamento está referido na seção 3.3);

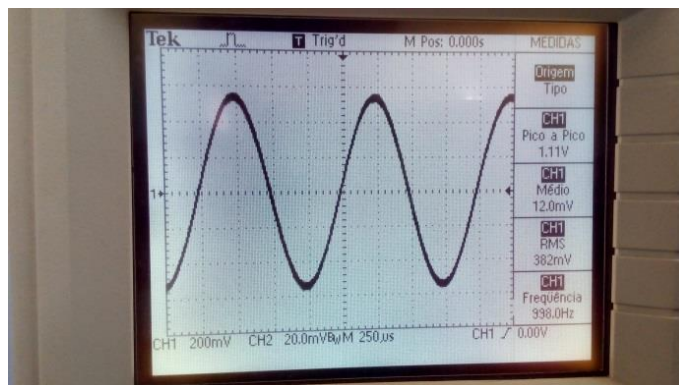


Figura 3-13 Saída do circuito "Head Amplifier" com entrada ajustada em 1,0kHz senoidal e 0,05V de amplitude.

2. Fez-se a escolha do capacitor HF CUT para 1,0 nF, e aterrou-se a entrada STIM I/P. O capacitor HF CUT aparece na Figura 3-1.

3. Conferindo no osciloscópio em acoplamento CC a saída do circuito, ajustou-se os potenciômetros para o maior ganho antes que saturasse a forma de onda senoidal na saída e houvesse o “ceifamento” do sinal, e com os mesmos ajustes determinou-se o valor médio próximo a zero (Figura 3-13) a fim de ser eliminar componentes CC;
4. Fez-se uma varredura nas frequências de 1,0Hz a 30,0kHz como mostrado no Apêndice A, Tabela 9;
5. Ainda com o capacitor HF CUT de 1,0nF, fez-se o ajuste do gerador de sinais em 1,0kHz e amplitude de 0,5V(equivalente 1,0V pico a pico), e observou-se a saída do sinal no osciloscópio fazendo-se o ajuste dos potenciômetros para se obter o maior ganho antes do “ceifamento” do sinal e com o valor médio próximo a zero (Figura 3-14);
6. Como no item 4 fez-se uma varredura nas frequências de 1,0Hz a 30,0kHz e os valores obtidos são mostrados no Apêndice A, Tabela 10;

Seguiu-se os mesmos procedimentos desde o item 2 com o capacitor HF CUT de 47pF, e os valores obtidos são apresentados no Apêndice A, nas tabelas Tabela 11 e Tabela 12.

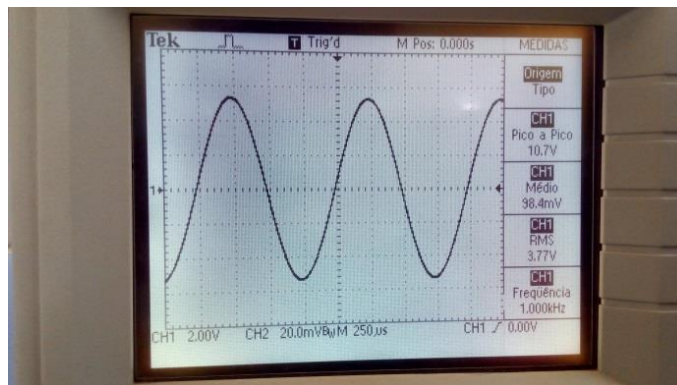


Figura 3-14 Saída do circuito "Head Amplifier" com entrada ajustada em 1,0kHz senoidal e 0,5V de amplitude.

Com os valores obtidos, fez-se o cálculo do ganho e gerou-se os gráficos apresentados na seção 4.2.1.

3.3.2. Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “AC Pre Amplifier”.

Para o teste no circuito “AC Pre Amplifier” foi necessário o uso de uma segunda fonte de alimentação CC, também configurada como fonte simétrica, sendo uma com valores de $\pm 15V$ e outra $\pm 9V$, como ilustra a Figura 3-15 a seguir.

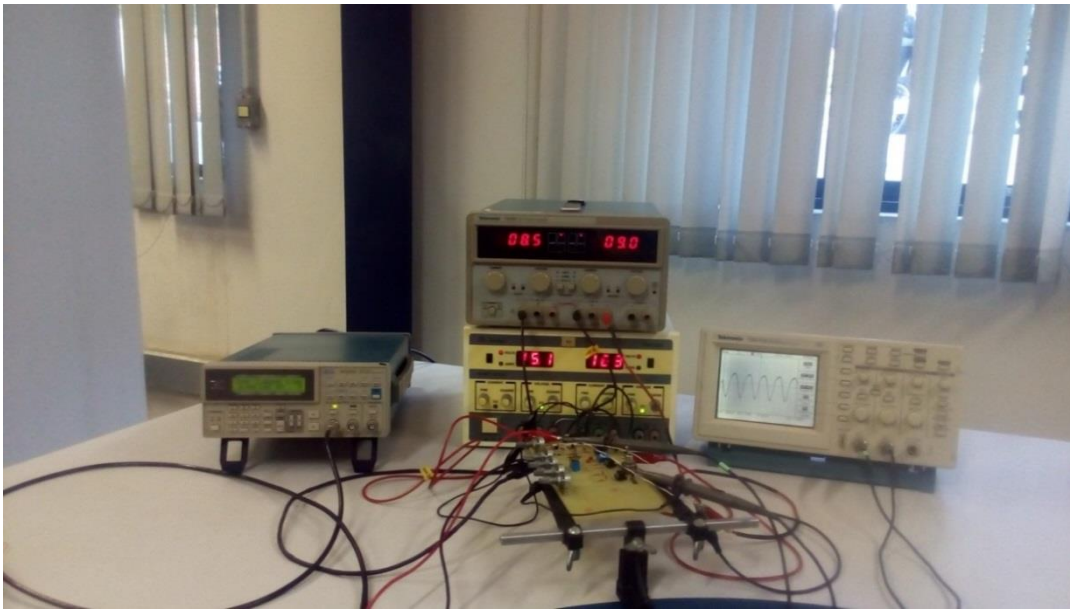


Figura 3-15 Montagem da bancada de testes para o circuito “AC Pre Amplifier”.

O esquemático do circuito em teste nesta seção é mostrado pela Figura 3-3, ou seja, fez a coleta dos dados no circuito “AC Pre Amplifier” sem o filtro de saída, embora este conste na montagem do circuito. Fez-se essa opção para se obter apenas a resposta de amplificação do circuito sem a filtragem. Após a ajustagem das fontes de alimentação CC, seguiu os seguintes passos:

1. Ajustou-se o gerador de sinais arbitrários com uma onda senoidal de frequência 1,0 kHz e amplitude 0,5V (Tensão pico a pico 1,0V).
2. O sinal do gerador foi injetado em input+, e o input- foi aterrado, como mostra a Figura 3-3. Os passos seguintes são para os valores da chave multiplicadora selecionados em x100 e x1000, com o capacitor C4 nos valores de 100pF e 100nF.

3. Conferindo a saída do circuito no osciloscópio em acoplamento CC, ajustou-se os potenciômetros afim de se obter o maior ganho antes do ceifamento ou deformação da onda. Esse detalhe é mostrado nas figuras abaixo, conforme a seleção das chaves e potenciômetros, descritas nas legendas das figuras.

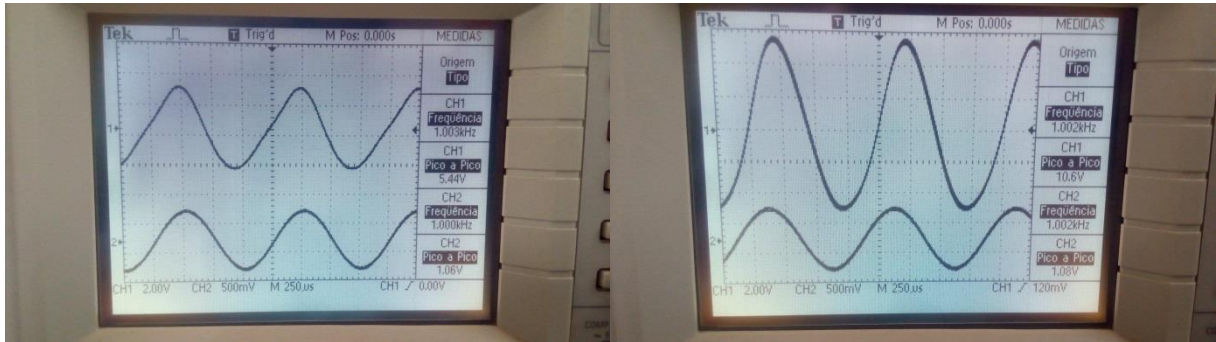


Figura 3-16 Sinais de entrada e saída observados no osciloscópio, para entrada senoidal de 1,0KHz e amplitude 0,5V e chave multiplicadora selecionada x100; onda superior no osciloscópio é a saída e a inferior a entrada; na direita o capacitor C4 é de valor 100pF e na esquerda 100nF.



Figura 3-17 Sinais de entrada e saída observados no osciloscópio, para entrada senoidal de 1,0KHz e amplitude 0,5V e chave multiplicadora selecionada x1000; onda superior no osciloscópio é a saída e a inferior a entrada; na direita o capacitor C4 é de valor 100pF e na esquerda 100nF.

4. Feito os ajustes descritos acima, fez-se uma varredura em frequência, de 1,0Hz a 100,0kHz. Os valores coletados são apresentados no Apêndice B, na Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16.

Com os dados coletados, fez-se o cálculo do ganho e os gráficos são apresentados na seção 4.2.2.

A fonte geradora de funções arbitrárias permitiu uma grande exatidão nos valores de frequência de entrada determinados, o modelo do equipamento é especificado em 3.3 Bancada de Testes, sendo assim não foi necessário a aferição em tempo real do sinal do equipamento com um dos canais do osciloscópio pela confiança no gerador de sinais.

4. Discussões e Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no presente trabalho. Eles são baseados nos testes feitos em bancada, na observação das características e critérios de desempenho do circuito que foram obtidos. Os resultados são apresentados nos seguintes tópicos: resultados obtidos com a simulação computacional dos circuitos e resultados obtidos no circuito físico implementado em placa perfurada padrão.

4.1. Resultados das Simulações Computacionais

Nesta seção seguem os resultados das simulações no *software LTspiceIV*, mais precisamente do ganho em função da frequência. A partir das setas nos gráficos indicados com os valores de frequência e ganho, é possível determinar o ponto em que há um decaimento de 3dB e assim determinar as frequências de corte e estimar a largura de banda.

4.1.1. Largura de Banda do Circuito “*Head Amplifier*”.

Os gráficos aqui apresentados são os resultados da simulação em *LTspiceIV* do circuito da Figura 3-1, “*Head Amplifier*”, o qual tem especificada também os comandos de simulação utilizados. A Figura 4-1 representa o ganho do circuito “*Head Amplifier*” com capacitor HF CUT selecionado para 1,0 nF, na Figura 4-2 o capacitor HF CUT foi de 47,0 pF, enquanto na Figura 4-3 uma relação de capacitores foi utilizada para gerar um gráfico comparativo.

Na primeira análise (Figura 4-1) tem se como referência o ponto de maior ganho de 26,13dB e a frequência de corte observada é de 587,9Hz, e a largura de banda 577,9Hz, dado que a simulação foi executada a partir de 10Hz, usada como frequência de corte inferior.

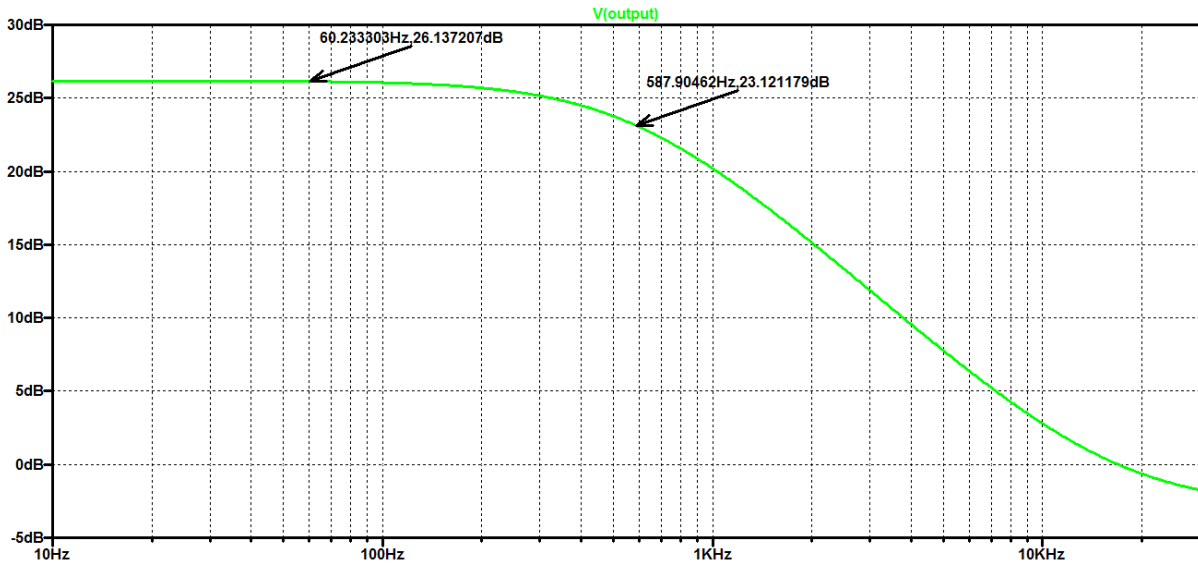


Figura 4-1 Ganho em dB do circuito "Head Amplifier" com capacitor HF CUT de 1,0nF obtido por simulação computacional; em detalhe os valores para a determinação da frequência de corte.

Na segunda análise(Figura 4-2), a referência novamente de 26,13dB, e a frequência de corte de 9473,7Hz, e largura de banda de 9463,7Hz, mais uma vez a frequência de corte inferior tomada como 10Hz.

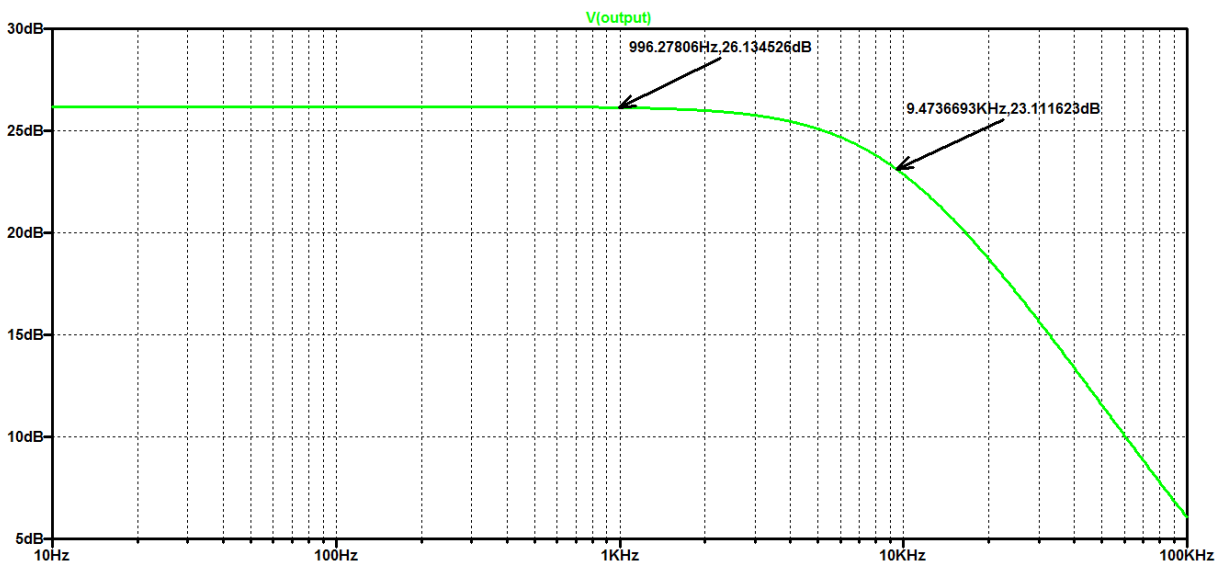


Figura 4-2 Ganho em dB do circuito"Head Amplifier" com capacitor HF CUT de 47pF obtido por simulação computacional; em detalhe os valores para a determinação da frequência de corte.

Os valores de frequência de corte e largura de banda dessas duas análises acima são organizados na Tabela 5 no final desta seção, que também possui os resultados obtidos em bancada seção 4.2.1 afim de comparar com os resultados acima.

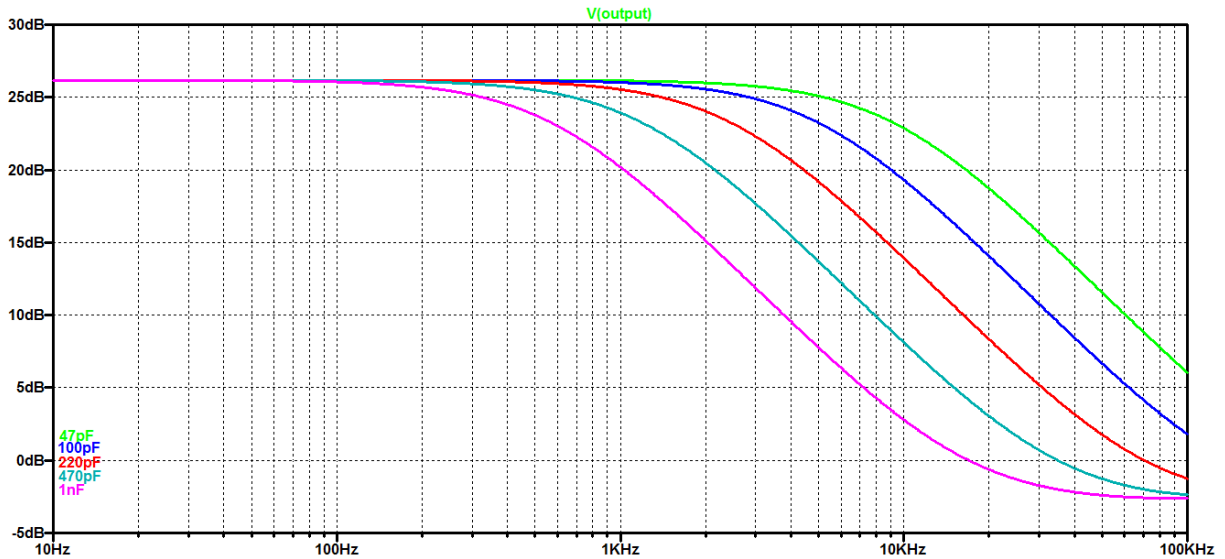


Figura 4-3 Ganho em dB do circuito "Head Amplifier" com capacitor HF CUT variando entre os valores 47pF, 100pF, 220pF, 470pF e 1nF; obtido por simulação computacional.

4.1.2. Largura de Banda do Circuito “AC Pre Amplifier”.

As análises seguintes são resultados das simulações do circuito “AC Pre Amplifier” sem filtro representado pela Figura 3-3, nela consta alguns comandos que foram utilizados. Um outro detalhe é que foi utilizado outro comando *.step param* no potenciômetro da chave multiplicadora para gerar a Figura 4-4, Figura 4-9, Figura 4-14 e Figura 4-19, que são gráficos que mostram como a variação dos valores desse potenciômetro afetam o ganho, além de gráficos com o menor valor desse potenciômetro e maior, com suas respectivas frequências de corte.

4.1.2.1. Simulação com chave multiplicadora x100 e capacitor C4 100pF.

A Figura 4-4 representa o ganho em decibéis do circuito referido no título da seção, em uma faixa de 10 Hz a 100 kHz, com o capacitor C4 selecionado no valor de 100pF, e com a chave multiplicadora selecionada em x100; o comando *.step param* foi aplicado no potenciômetro da chave multiplicadora variando nos valores de 1,0 Ω , 10k Ω , 22k Ω , 47k Ω , 75k Ω e 100k Ω , afim de gerar um gráfico comparativo.

A Figura 4-5 e a Figura 4-6 são da mesma simulação descrita acima, com a escolha do valor do resistor da chave multiplicadora de $1,0\Omega$ e $100k\Omega$, respectivamente. Foi adicionado nos gráficos as frequências de corte, indicadas pelas setas, o qual são um ponto abaixo 3 dB do ponto máximo que é tomado como referência e é indicado na janela aberta *Waveform V(out)* nos mesmos gráficos.

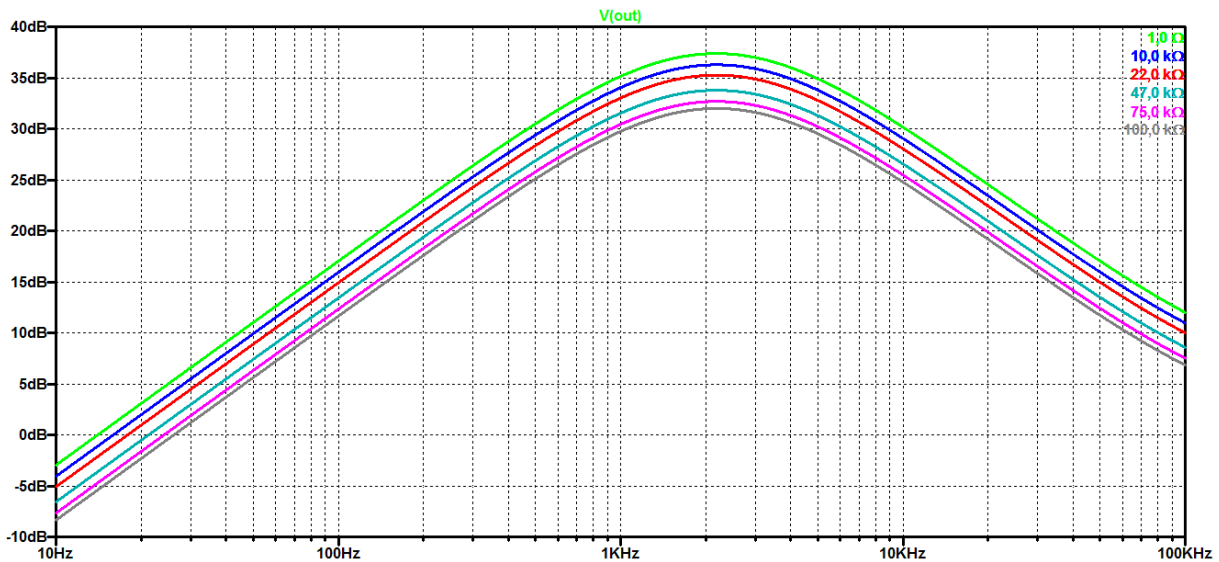


Figura 4-4 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora variando entre os valores $1,0\Omega$, $10k\Omega$, $22k\Omega$, $47k\Omega$, $75k\Omega$ e $100k\Omega$; capacitor C4 de $100pF$; obtido por simulação computacional.

Na primeira análise (Figura 4-5) o valor de ganho máximo adotado como referência foi de $37,37dB$, e as frequências de corte superior é $5445,9Hz$ e a inferior é $871,5Hz$, resultando em uma largura de banda de $4574,4Hz$.

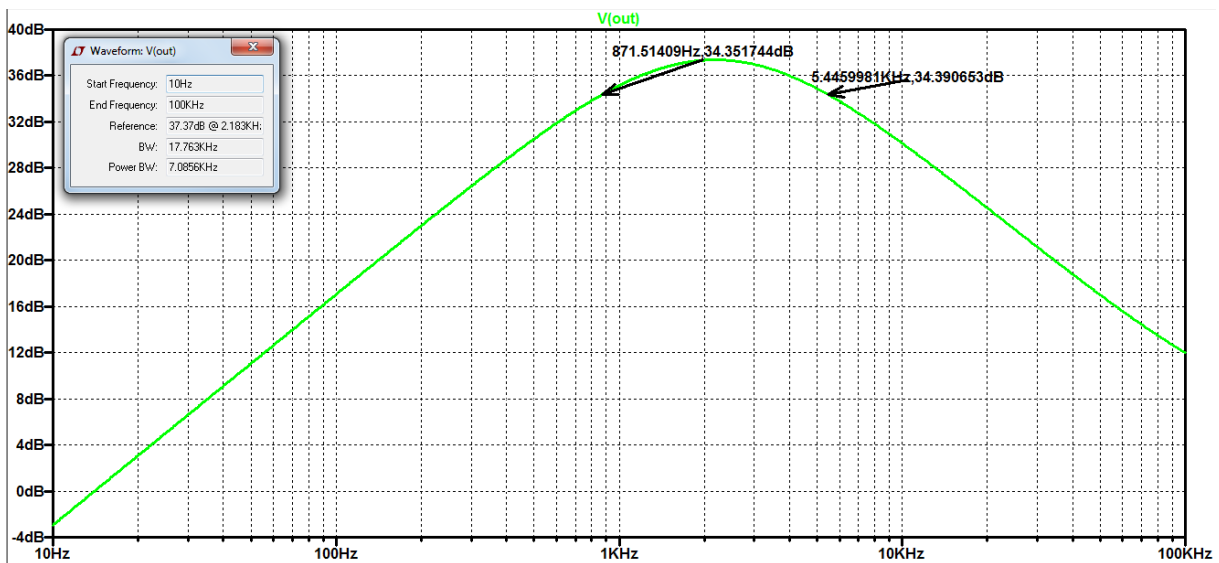


Figura 4-5 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em $1,0\Omega$; capacitor C4 de $100pF$; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Na segunda análise (Figura 4-6), a referência de ganho utilizada foi de 31,99dB, a frequência de corte superior foi de 5442,8Hz e a inferior de 880,8Hz, resultando em uma largura de banda de 4562Hz.

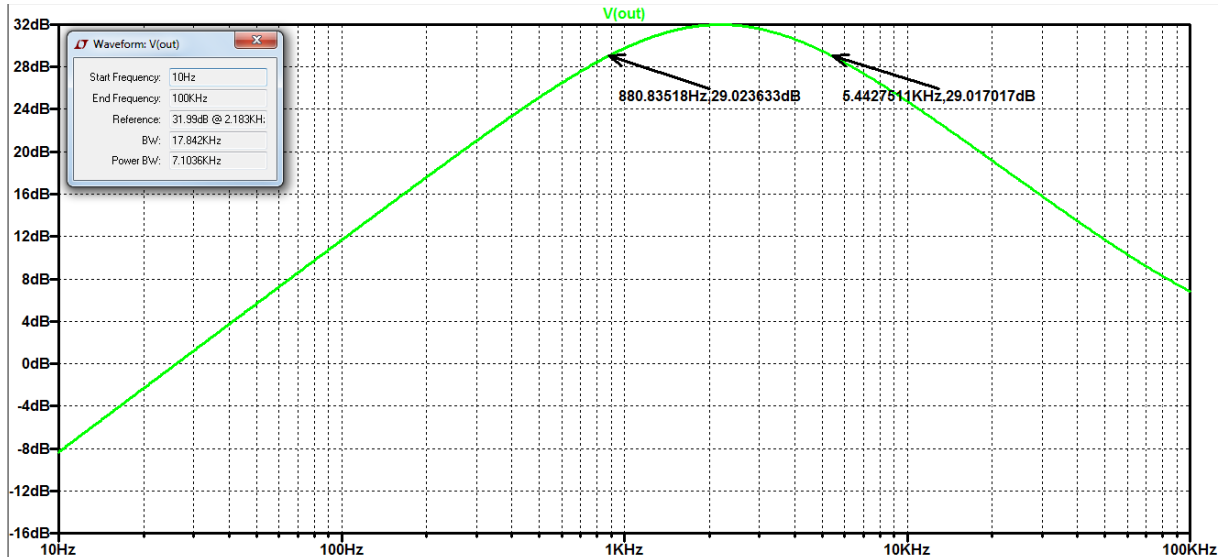


Figura 4-6 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 100k Ω ; capacitor C4 de 100pF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Entretanto, se observado os resultados obtidos acima, estes não se aproximam dos gráficos obtidos em bancada, mostrados na seção 4.2.2. Afim de se aproximar a simulação dos resultados reais, executaram se novas simulações e por tentativa e erro chegou se ao circuito da Figura 4-7. O gráfico de ganho gerado é mostrado por Figura 4-8.

Observa se nesta simulação (Figura 4-7) os valores ajustados dos potenciômetros. O potenciômetro da chave multiplicadora foi fixado em 100K Ω e o U9 em $set=\{30\}$. Nos resultados, o ganho máximo adotado como referência foi de 16,8 dB, e as frequências de corte superior foi de 5898,37 Hz e inferior de 907,24 Hz, gerando uma largura de banda de 4991,13 Hz.

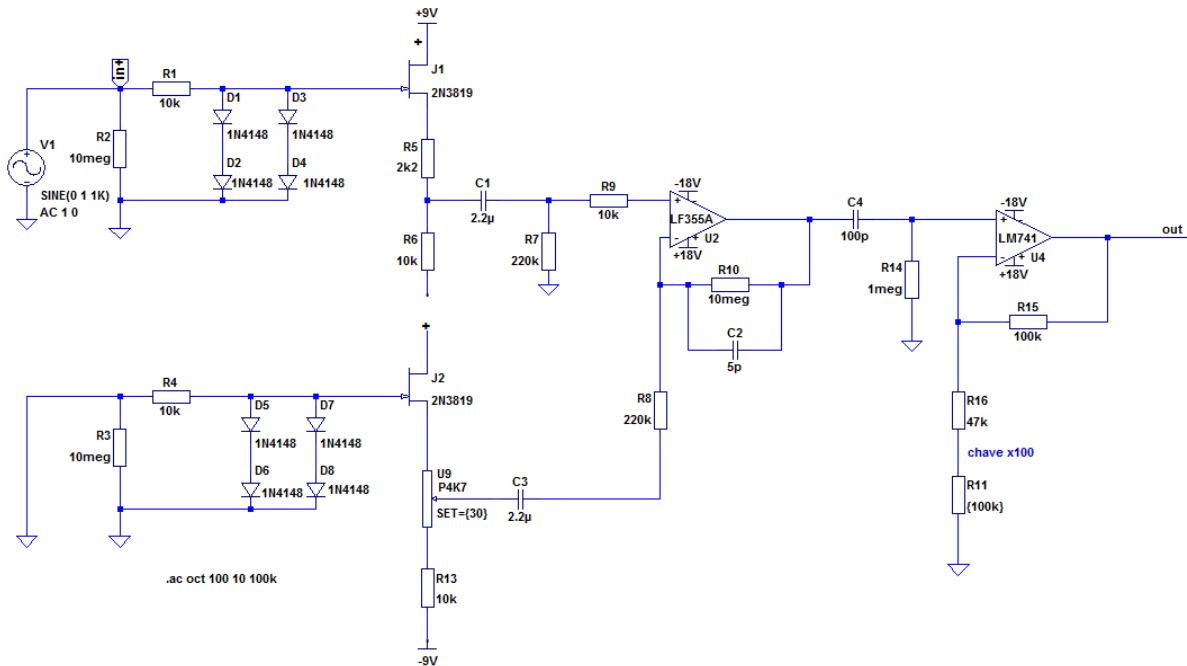


Figura 4-7 Simulação do circuito "AC Pre Amplifier" com chave multiplicadora x100 e capacitor C4 100pF, com valores dos potenciômetros ajustados para aproximação dos resultados em bancada.

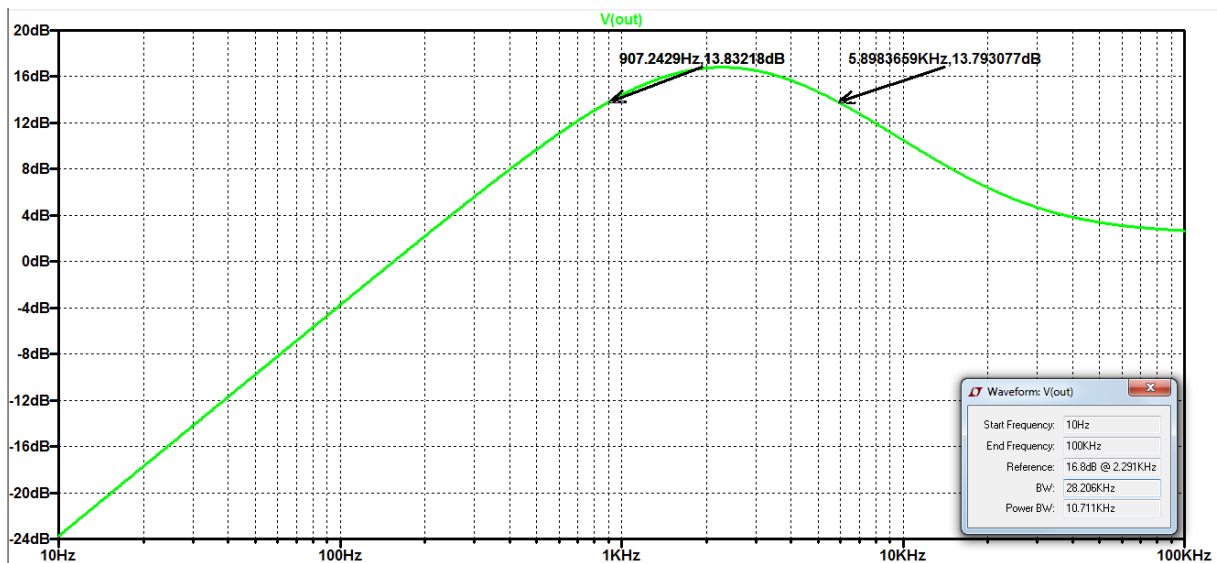


Figura 4-8 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier" resultado da simulação da figura 4-7; chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 100k Ω ; capacitor C4 de 100pF; potenciômetro U9 set={30}; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

4.1.2.2. Simulação com chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 100pF.

A Figura 4-9 representa o ganho em decibéis do circuito referido no título da seção, em uma faixa de 10Hz a 100KHz, com o capacitor C4 selecionado no valor de 100pF, e com a chave multiplicadora selecionada em x1000; o comando `.step` param foi aplicado no potenciômetro da chave multiplicadora variando nos valores de 1,0 Ω , 1,0k Ω , 2,2k Ω , 4,7k Ω , 7,5k Ω e 10,0k Ω , afim de gerar um gráfico comparativo.

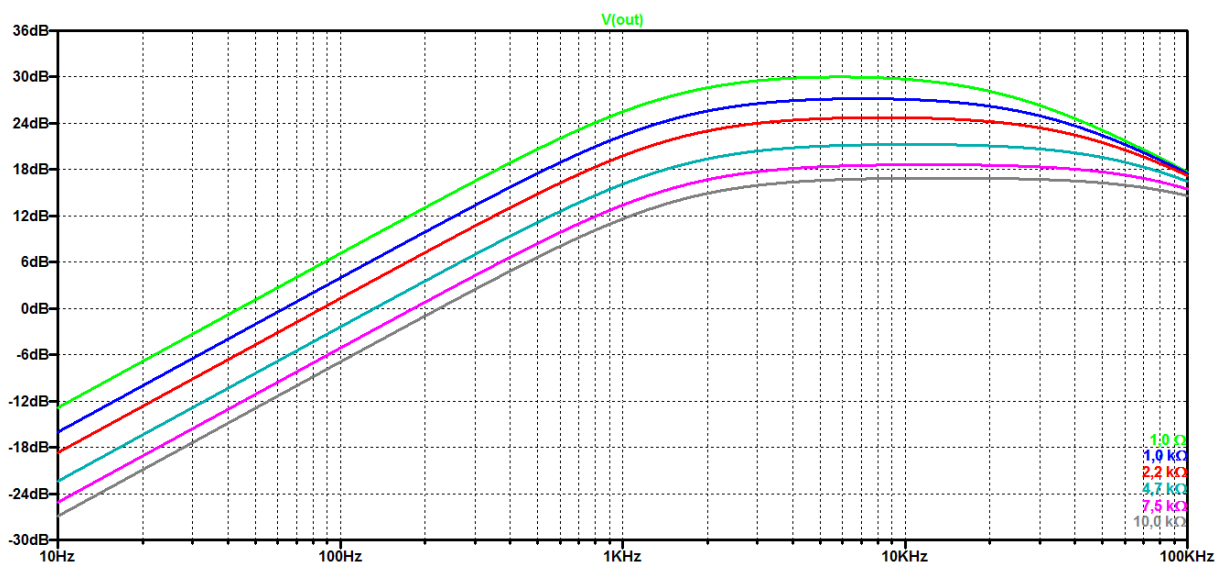


Figura 4-9 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora variando entre os valores 1,0 Ω , 1,0k Ω , 2,2k Ω , 4,7k Ω , 7,5k Ω e 10,0k Ω ; capacitor C4 de 100pF; obtido por simulação computacional.

As Figura 4-10 e Figura 4-11 são da mesma simulação descrita acima, com a escolha do valor do resistor da chave multiplicadora de 1,0 Ω e 10,0k Ω , respectivamente. Foi adicionado nos gráficos as frequências de corte, indicadas pelas setas. O ponto máximo que é tomado como referência é indicado na janela aberta *Waveform V(out)* nos mesmos gráficos.

A terceira análise (Figura 4-10), tem como referência o valor de 29,99dB, frequência de corte superior de 26,09kHz e inferior de 1,34kHz, resultando um uma largura de banda de 24,75kHz.

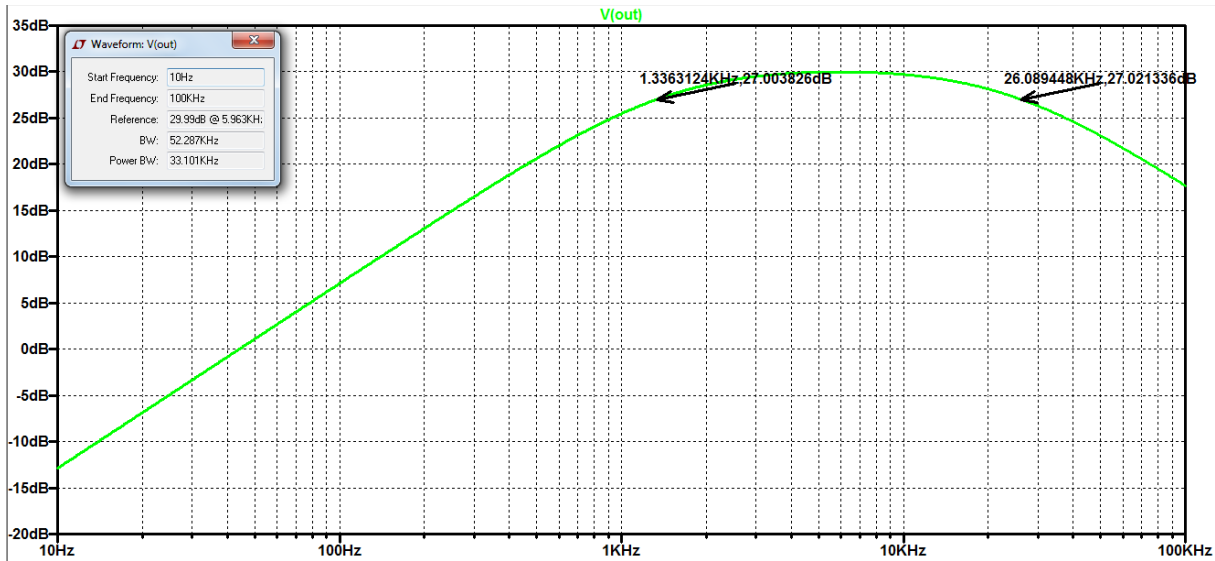


Figura 4-10 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 1,0 Ω ; capacitor C4 de 100pF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Na quarta análise (Figura 4-11) usou-se como referência o valor máximo de ganho de 16,89dB, a frequência de corte superior não foi encontrada pois a simulação feita até 100kHz não atingiu o decaimento de 3dB, assim foi utilizado a frequência de corte superior de 100kHz, e a inferior de 1,55kHz, e a largura de banda de 98,45kHz.

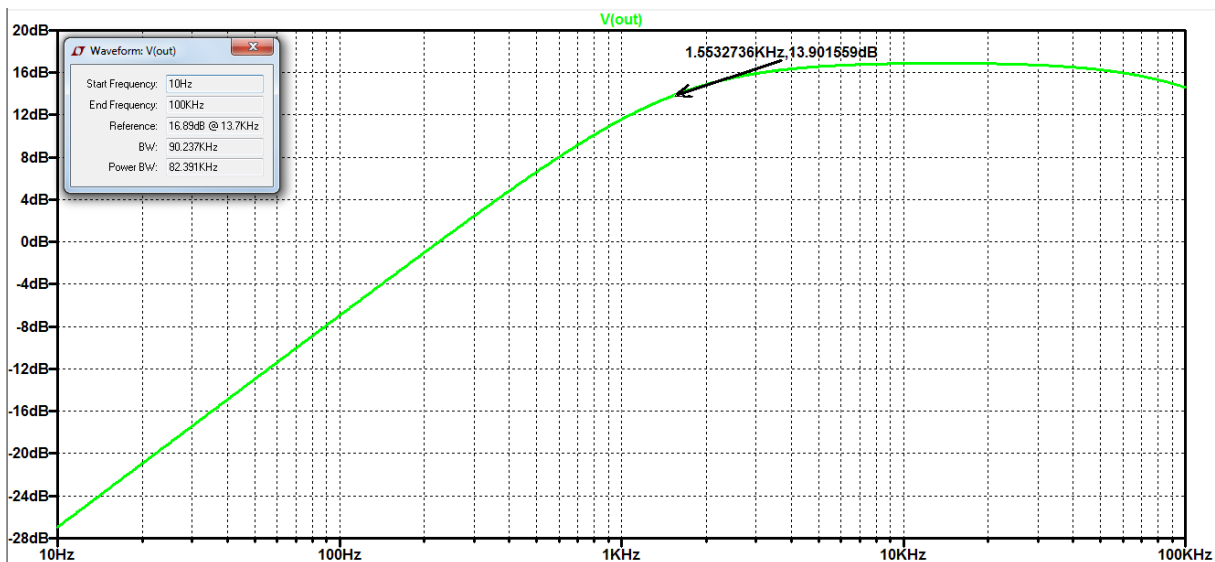


Figura 4-11 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 10k Ω ; capacitor C4 de 100pF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Novamente, se observado os resultados obtidos acima, estes não se aproximam dos gráficos obtidos em bancada, mostrados na seção 4.2.2. Afim de se aproximar a simulação dos resultados reais, executaram se novas simulações e chegou se ao circuito da Figura 4-12. O gráfico de ganho gerado é mostrado pela Figura 4-13.

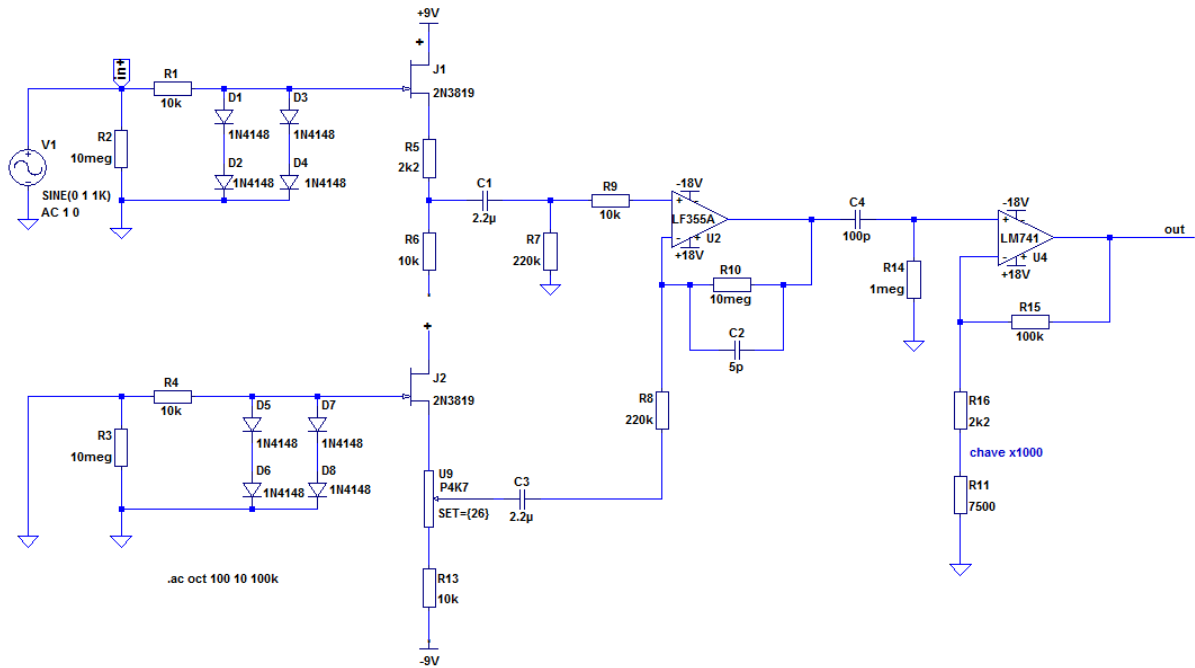


Figura 4-12 Simulação do circuito "AC Pre Amplifier" com chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 100pF, com valores dos potenciômetros ajustados para aproximação dos resultados em bancada.

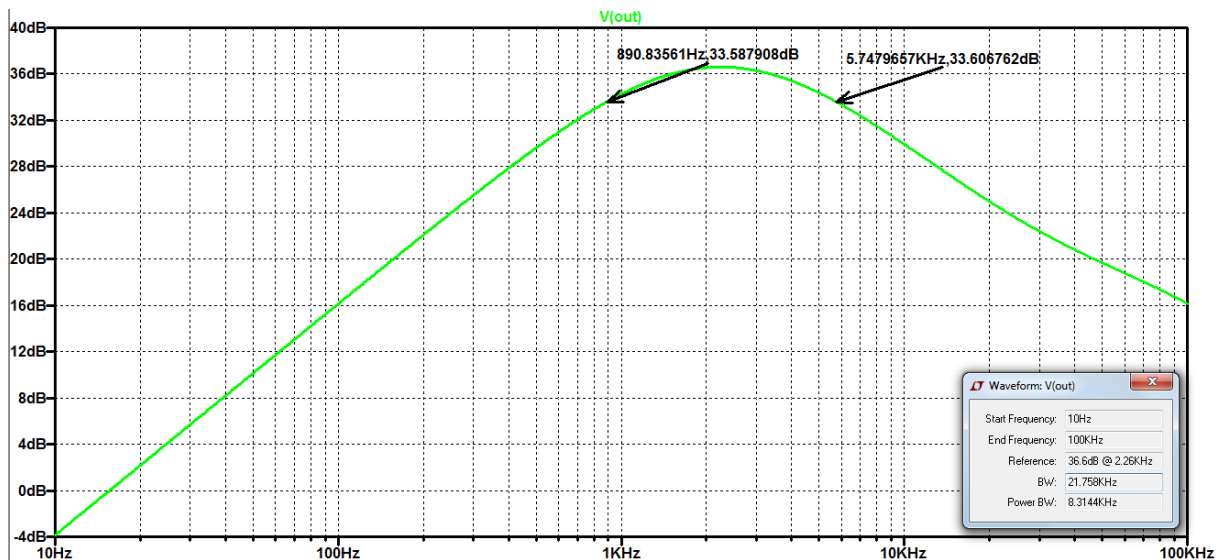


Figura 4-13 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier" resultado da simulação da figura 4-12; chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 7,5K Ω ; capacitor C4 de 100pF; potenciômetro U9 $set=\{26\}$; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Observa se nesta simulação (Figura 4-12) os valores ajustados dos potenciômetros. O potenciômetro da chave multiplicadora foi fixado em 7,5K Ω e o U9 em $set=\{26\}$. Nos resultados, o ganho máximo adotado como referência foi de 36,6 dB, e as frequências de corte superior foi de 5747,9 Hz e inferior de 890,84 Hz, gerando uma largura de banda de 4857,13 Hz.

4.1.2.3. Simulação com chave multiplicadora x100 e capacitor C4 100nF.

A Figura 4-14 representa o ganho em decibéis do circuito referido no título da subseção, em uma faixa de 1,0Hz a 100KHz, com o capacitor C4 selecionado no valor de 100nF, e com a chave multiplicadora selecionada em x100; o comando *.step* param foi aplicado no potenciômetro da chave multiplicadora variando nos valores de 1,0Ω, 10kΩ, 22kΩ, 47kΩ, 75kΩ e 100kΩ, afim de gerar um gráfico comparativo.

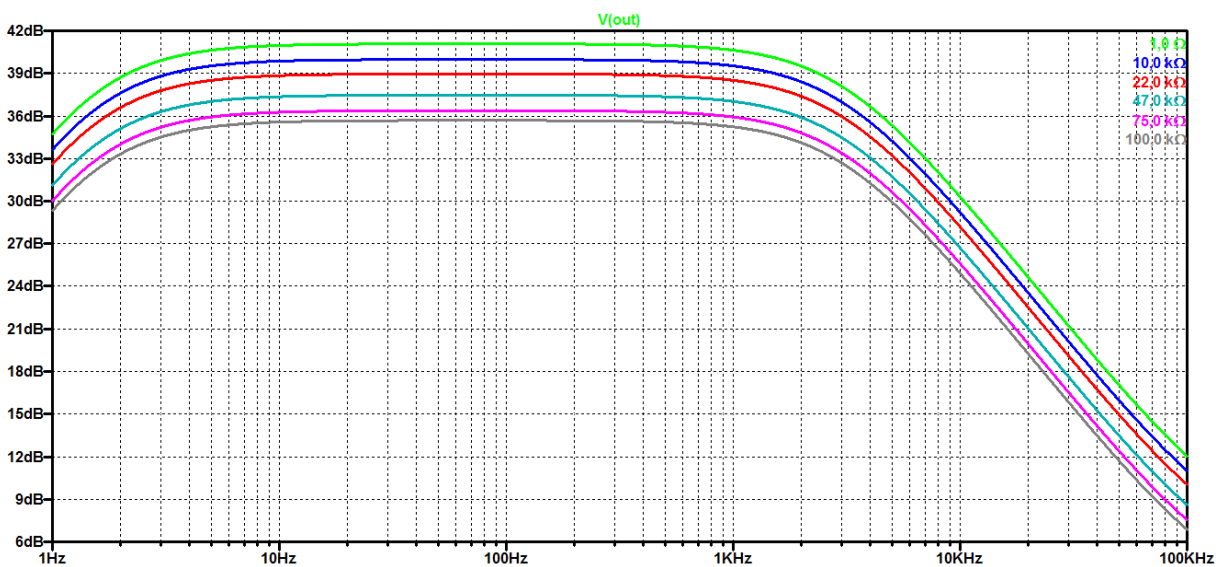


Figura 4-14 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier",chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora variando entre os valores 1,0Ω, 10kΩ, 22kΩ, 47kΩ, 75kΩ e 100kΩ; capacitor C4 de 100nF;obtido por simulação computacional.

As Figura 4-15 e Figura 4-16 são da mesma simulação descrita acima, com a escolha do valor do resistor da chave multiplicadora de 1,0Ωe 100kΩ, respectivamente. Foi adicionado nos gráficos as frequências de corte, indicadas pelas setas, o qual são um ponto abaixo 3dB do ponto máximo que é tomado como referência indicada na janela aberta *Waveform V(out)* nos mesmos gráficos.

A Figura 4-15 é a quinta análise, e tem como referência o ganho de 41,08dB, frequência de corte superior 3010,3Hz e inferior 1,7142Hz, resultando num largura de banda de 3008,6Hz.

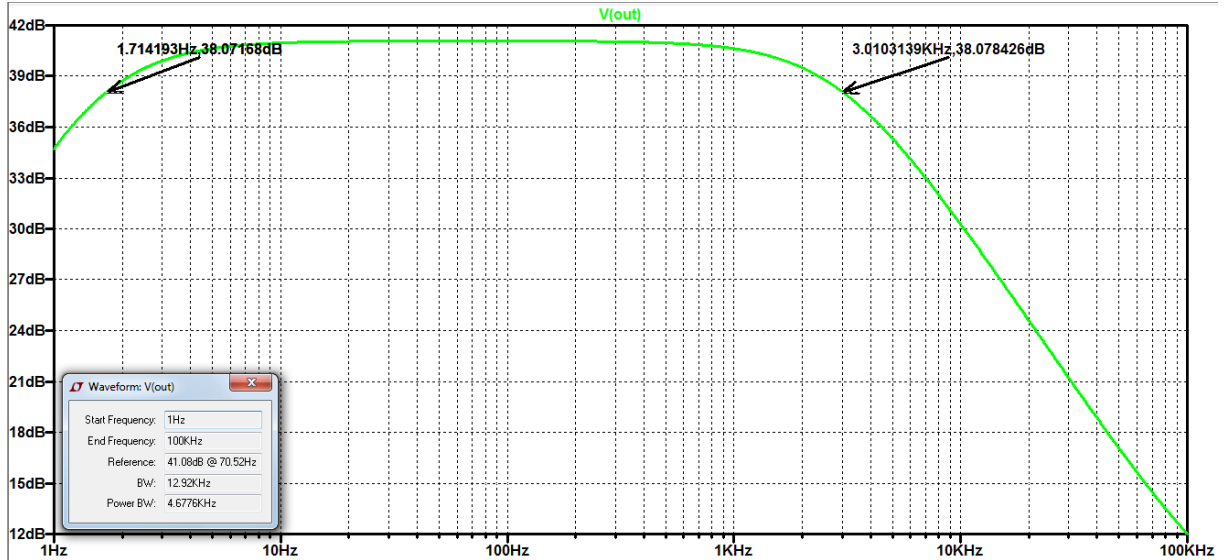


Figura 4-15 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 1,0 Ω ; capacitor C4 de 100nF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

A sexta análise (Figura 4-16) tem como referência o ganho de 35,68dB, frequência de corte superior de 3010,3Hz e inferior de 1,7142Hz, e largura de banda de 3008,6Hz.

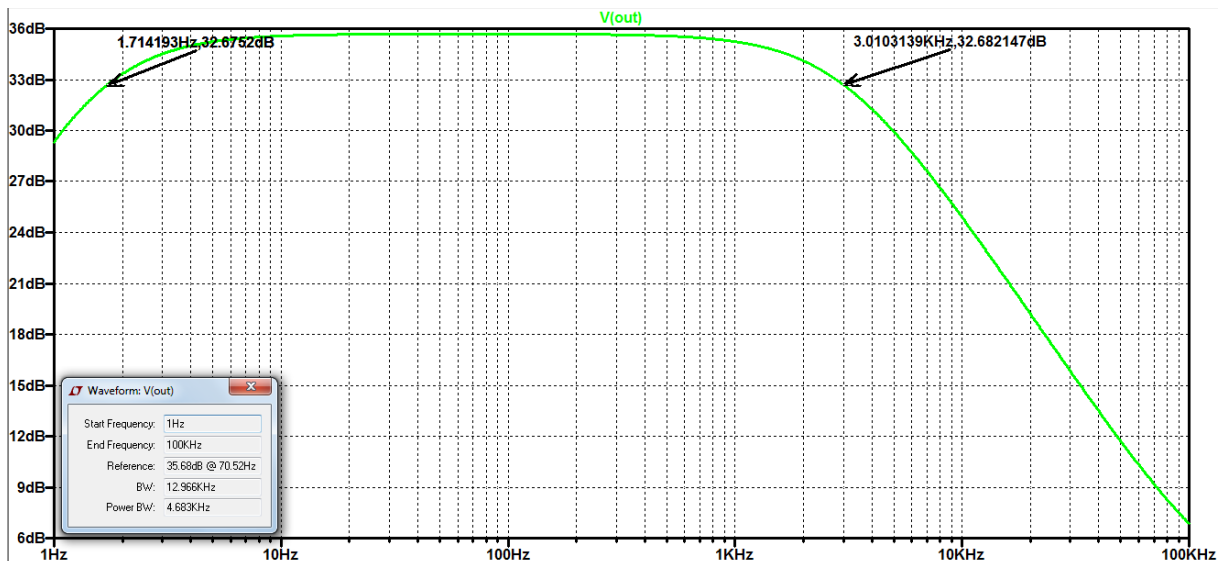


Figura 4-16 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 100k Ω ; capacitor C4 de 100nF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Dos resultados obtidos acima, estes não se aproximam dos gráficos obtidos em bancada, mostrados na seção 4.2.2. Afim de se aproximar a simulação dos resultados reais, executou se novas simulações e chegou se ao circuito da Figura 4-17. O gráfico de ganho gerado é mostrado pela Figura 4-18.

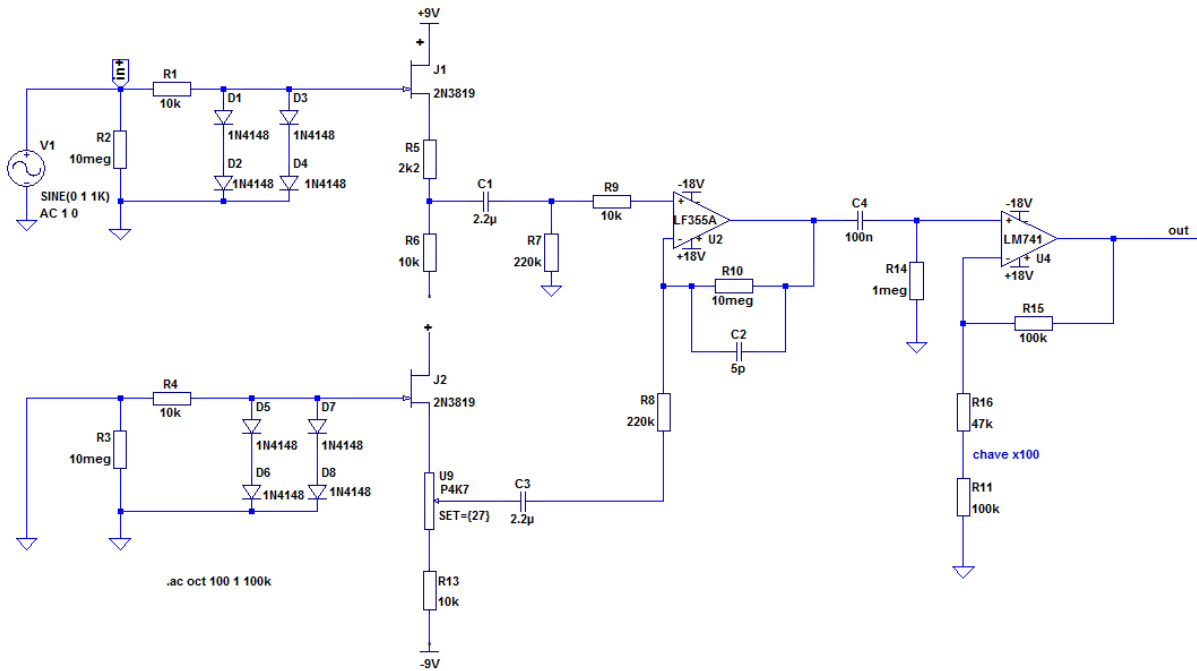


Figura 4-17 Simulação do circuito "AC Pre Amplifier" com chave multiplicadora x100 e capacitor C4 100nF, com valores dos potenciômetros ajustados para aproximação dos resultados em bancada.

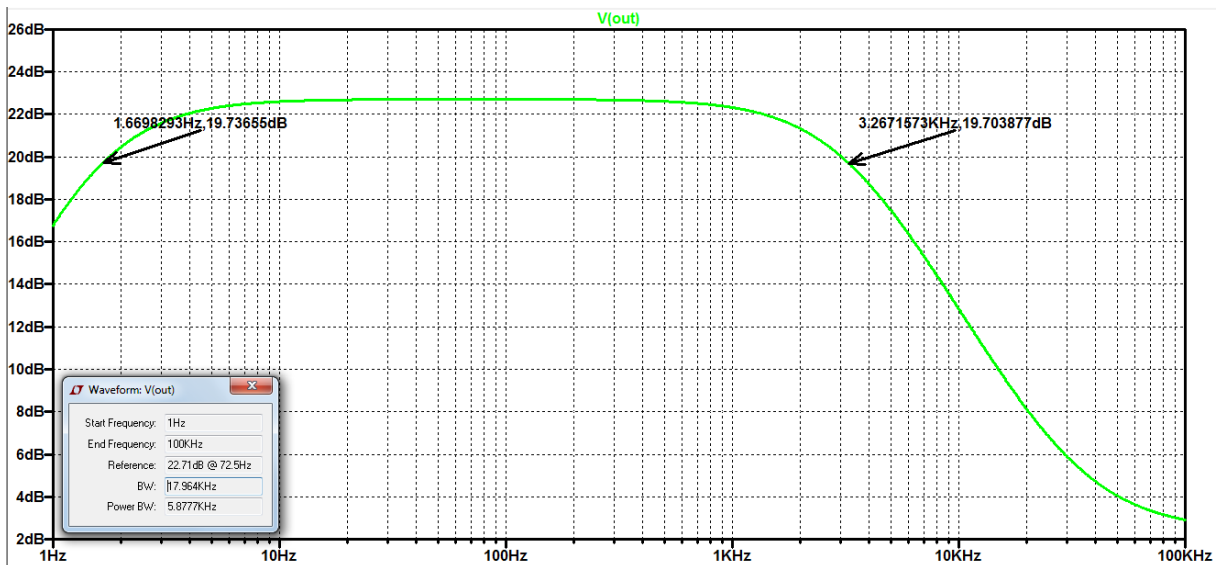


Figura 4-18 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier" resultado da simulação da figura 4-17; chave multiplicadora x100 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 100K Ω ; capacitor C4 de 100nF; potenciômetro U9 $set=\{27\}$; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Observa-se nesta simulação (Figura 4-17) os valores ajustados dos potenciômetros. O potenciômetro da chave multiplicadora foi fixado em 100K Ω e o U9 em $set=\{27\}$. Nos resultados, o ganho máximo adotado como referência foi de 22,71 dB, e as frequências de corte superior foi de 3267,16 Hz e inferior de 1,67 Hz, gerando uma largura de banda de 3265,49 Hz.

4.1.2.4. Simulação com chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 100nF.

A Figura 4-19 representa o ganho em decibéis do circuito referido no título da subseção, em uma faixa de 1Hz a 100KHz, com o capacitor C4 selecionado no valor de 100nF, e com a chave multiplicadora selecionada em x1000; o comando *.step* param foi aplicado no potenciômetro da chave multiplicadora variando nos valores de 1,0Ω, 1,0kΩ, 2,2kΩ, 4,7kΩ, 7,5kΩ e 10,0kΩ, afim de gerar um gráfico comparativo.

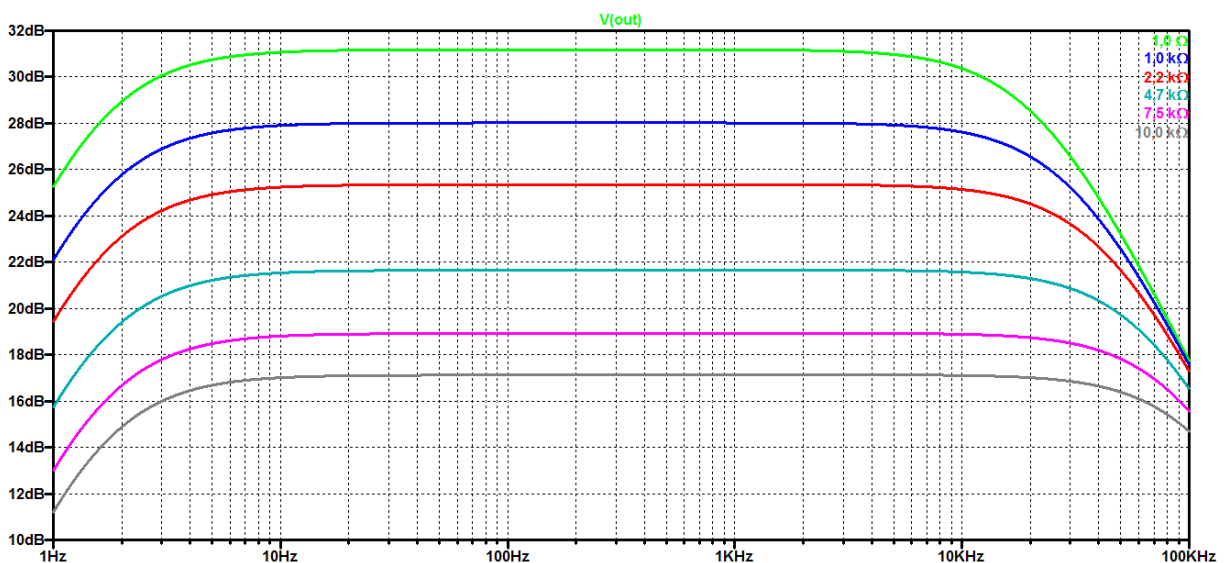


Figura 4-19 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora variando entre os valores 1,0Ω, 1,0kΩ, 2,2kΩ, 4,7kΩ, 7,5kΩ e 10,0kΩ; capacitor C4 de 100nF; obtido por simulação computacional.

A Figura 4-20 [A] e [B] são da mesma simulação descrita acima, com a escolha do valor do resistor da chave multiplicadora de 1,0Ω e 10,0kΩ, respectivamente. Foi adicionado nos gráficos as frequências de corte, indicadas pelas setas, o qual são um ponto abaixo 3dB do ponto máximo que é tomado como referência indicada na janela aberta *Waveform V(out)* nos mesmos gráficos.

A sétima análise (Figura 4-20-(A)) tem como referência o ganho de 31,13dB, frequência de corte superior de 21,99kHz e inferior 1,67Hz, resultando numa largura de banda de 21,988kHz.

E por fim, a oitava análise (Figura 4-20-(B)) tem como referência o ganho de 17,11dB, e não é possível estipular a frequência de corte superior na simulação até 100kHz,

sendo esse valor tomado como frequência de corte superior. A frequência de corte inferior é de 1,68Hz. Assim a largura de banda é de 99,998kHz.

Os resultados destas oito análises em que se variou o potenciômetro da chave multiplicadora foram organizados na Tabela 8.

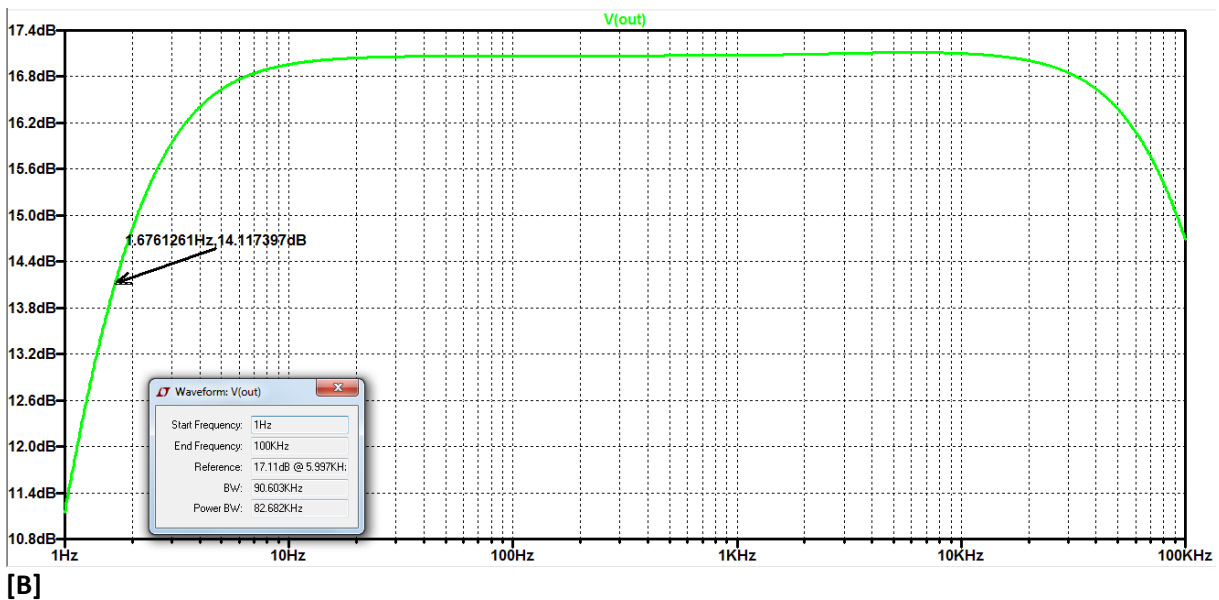
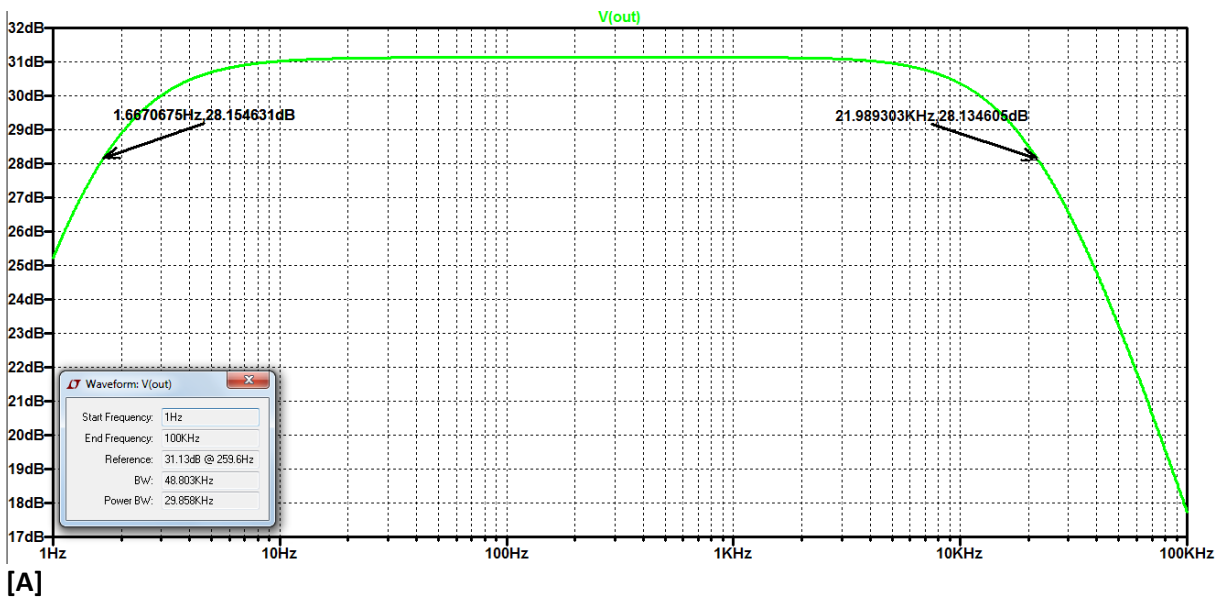


Figura 4-20 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier", chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora em (A): 1,0 Ω e (B): 10k Ω ; capacitor C4 de 100nF; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Dos resultados obtidos acima, estes não se aproximam dos gráficos obtidos em bancada, mostrados na seção 4.2.2. Afim de se aproximar a simulação dos resultados reais, executou se novas simulações e chegou se ao circuito da Figura 4-21. O gráfico de ganho gerado é mostrado pela Figura 4-22.

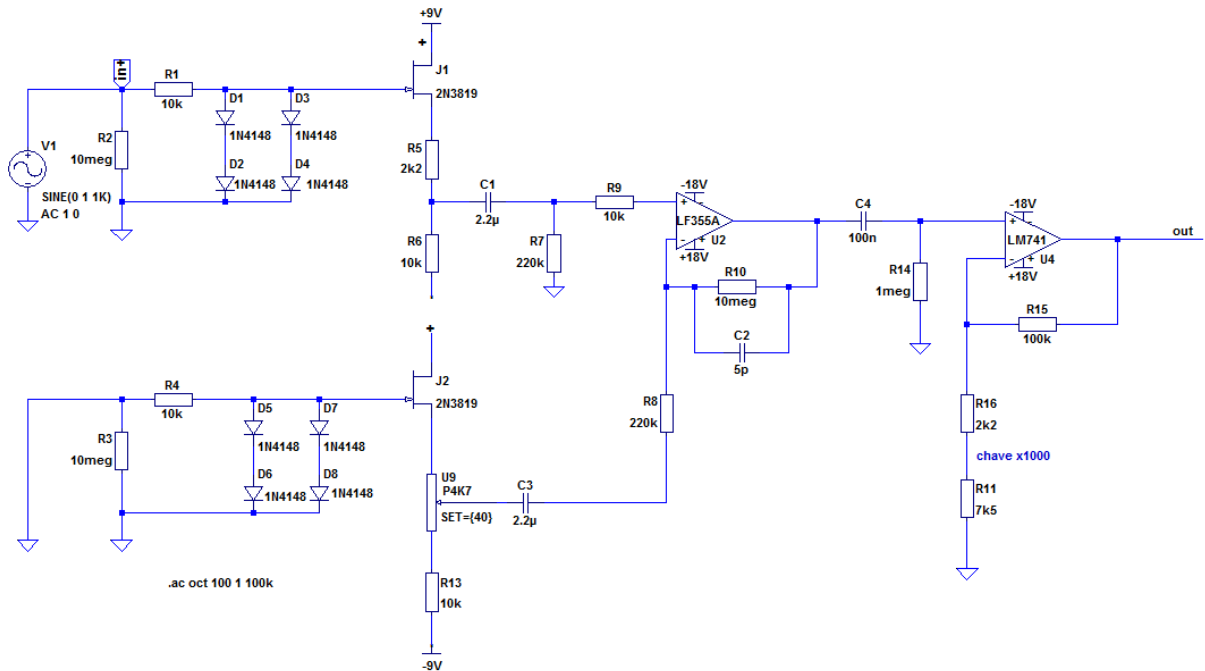


Figura 4-21 Simulação do circuito "AC Pre Amplifier" com chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 100nF, com valores dos potenciômetros ajustados para aproximação dos resultados em bancada.

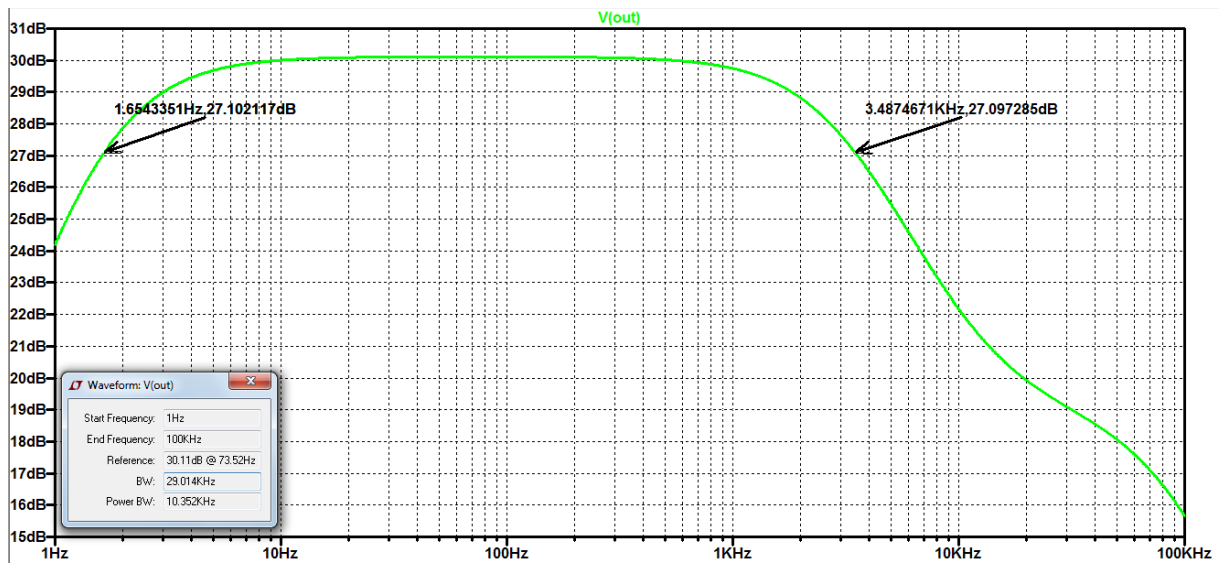


Figura 4-22 Ganho em dB do circuito "AC Pre Amplifier" resultado da simulação da figura 4-22; chave multiplicadora x1000 com o potenciômetro da chave multiplicadora em 7,5K Ω ; capacitor C4 de 100nF; potenciômetro U9 set={40}; obtido por simulação computacional com os valores para determinação da largura de banda.

Observa se nesta simulação (Figura 4-21) os valores ajustados dos potenciômetros. O potenciômetro da chave multiplicadora foi fixado em 7,5K Ω e o U9 em set={40}. Nos resultados, o ganho máximo adotado como referência foi de 30,11 dB, e as frequências de corte superior foi de 3487,47 Hz e inferior de 1,65 Hz, gerando uma largura de banda de 3485,82 Hz. Os resultados destas simulações, em que se aproximou os valores dos

potenciômetros afim de se obter resultados próximos dos extraídos dos testes em bancada, são resumidos na Tabela 7.

4.2. Resultados em Bancada de Testes

Nesta seção seguem os resultados da coleta de dados em bancada, de ambos circuitos analisados neste trabalho. Para gerar os gráficos foi utilizado a ferramenta de plotagem de gráficos do *software Matlab* e os dados são apresentados nos Apêndice A – Valores coletados em bancada do circuito “*Head Amplifier*” e Apêndice B – Valores coletados em bancada do circuito “*AC Pre Amplifier*” em forma de tabelas.

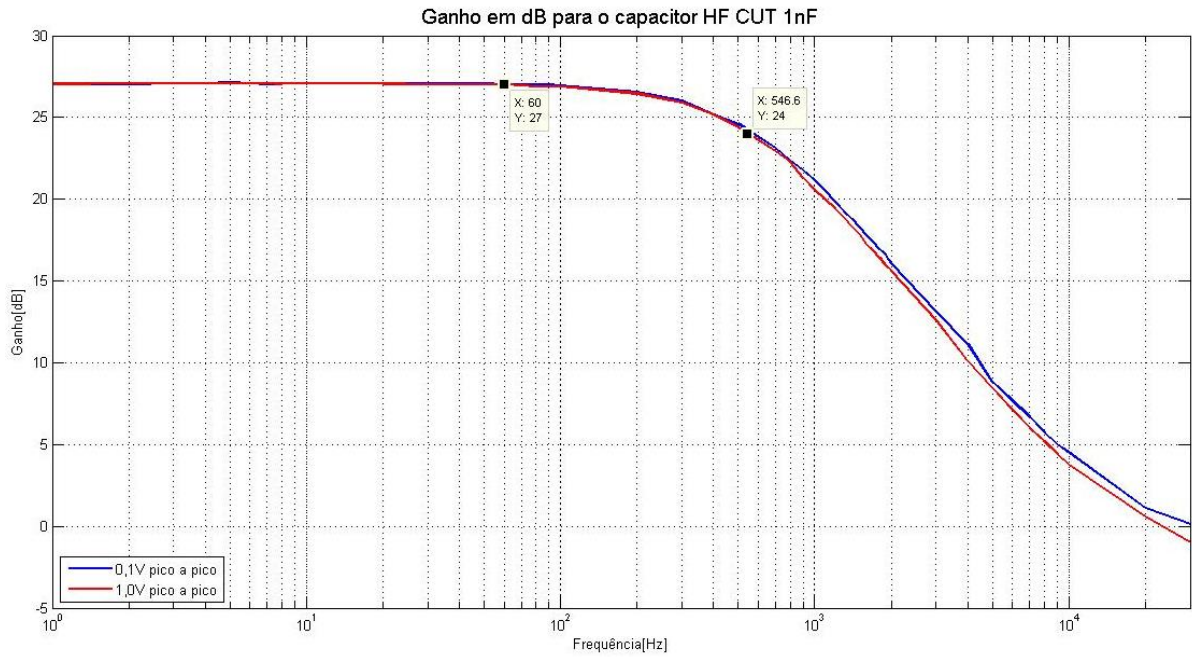
4.2.1. Largura de Banda do Circuito “*Head Amplifier*”

A descrição da metodologia utilizada é apresentada em 3.3.1 Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “*Head Amplifier*”. O gráfico da tem os dados coletados na Tabela 9 e Tabela 10, enquanto o gráfico da Figura 4-23, na Tabela 11 e Tabela 12.

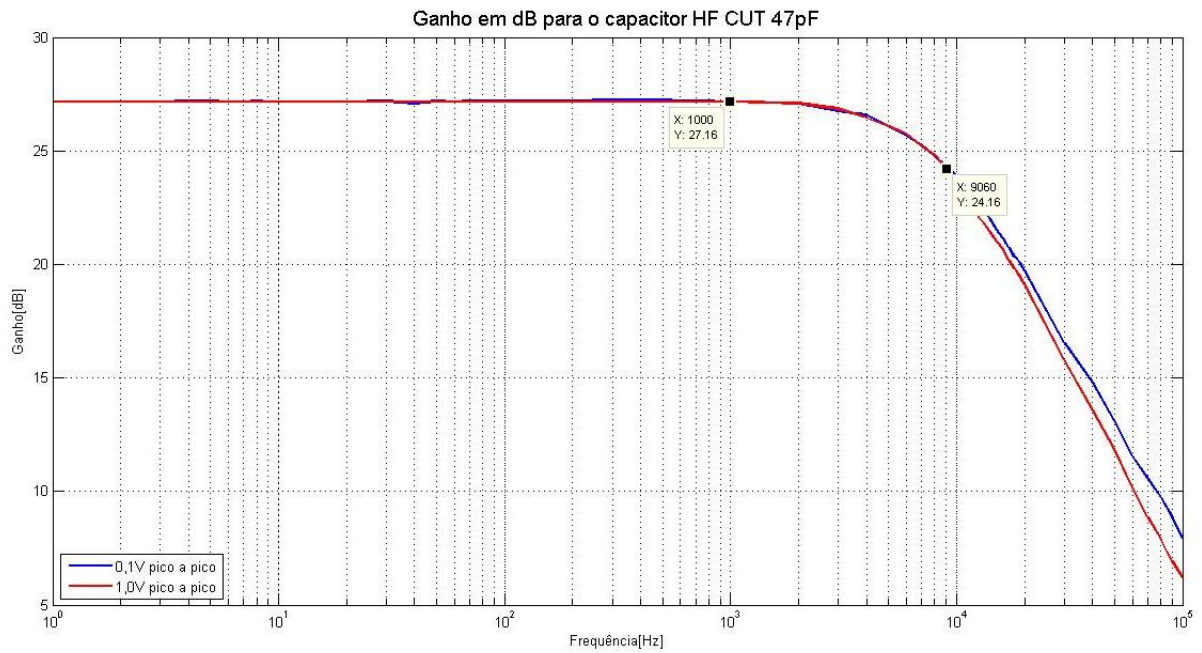
A largura de banda deste circuito foi estimada a partir dos valores indicados nos gráficos, ou seja, a partir de um ponto de máximo ganho tomado como referência e de um ponto com decaimento de 3 dB para se determinar a frequência de corte.

Na Figura 4-23-[A] tem-se o ponto de referência o ganho máximo o valor de 27dB, e a frequência de corte observada é de 546,6Hz e uma largura de banda de 545,6Hz, uma vez que a frequência de corte inferior adotada é a frequência inicial utilizada na coleta dos valores de ganho.

No gráfico da Figura 4-23-[B], o ponto de máximo ganho tomado como referência é de 27,16dB, e assim a frequência de corte determinada é de 9060Hz e a largura de banda de 9059Hz, mais uma vez utilizando o valor de 1,0Hz como frequência de corte inferior. Os resultados dessas duas análises está organizado na Tabela 5, no final desta seção. Os resultados dessas duas análises são resumidos na Tabela 5



[A]



[B]

Figura 4-23 Ganho em dB da placa "Head Amplifier" com capacitor HF CUT de (A): 1,0nF e (B): 47pF; obtido via testes em bancada e gerado pelo software Matlab; em detalhe os valores para a determinação da frequência de corte.

4.2.2. Largura de Banda do Circuito “AC Pre Amplifier”

A descrição da metodologia utilizada é apresentada em 3.3.2 Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “AC Pre Amplifier”. Os gráficos das Figura 4-24, Figura 4-25, Figura 4-26 e Figura 4-27 foram gerados a partir dos dados das Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16, respectivamente.

Na primeira análise (Figura 4-24), o valor de referência tomado o de maior ganho no gráfico foi de 15,68dB, e assim determinou-se a frequência de corte superior no valor de 3196Hz, a inferior de 552,9Hz e a largura de banda de 2643,1Hz

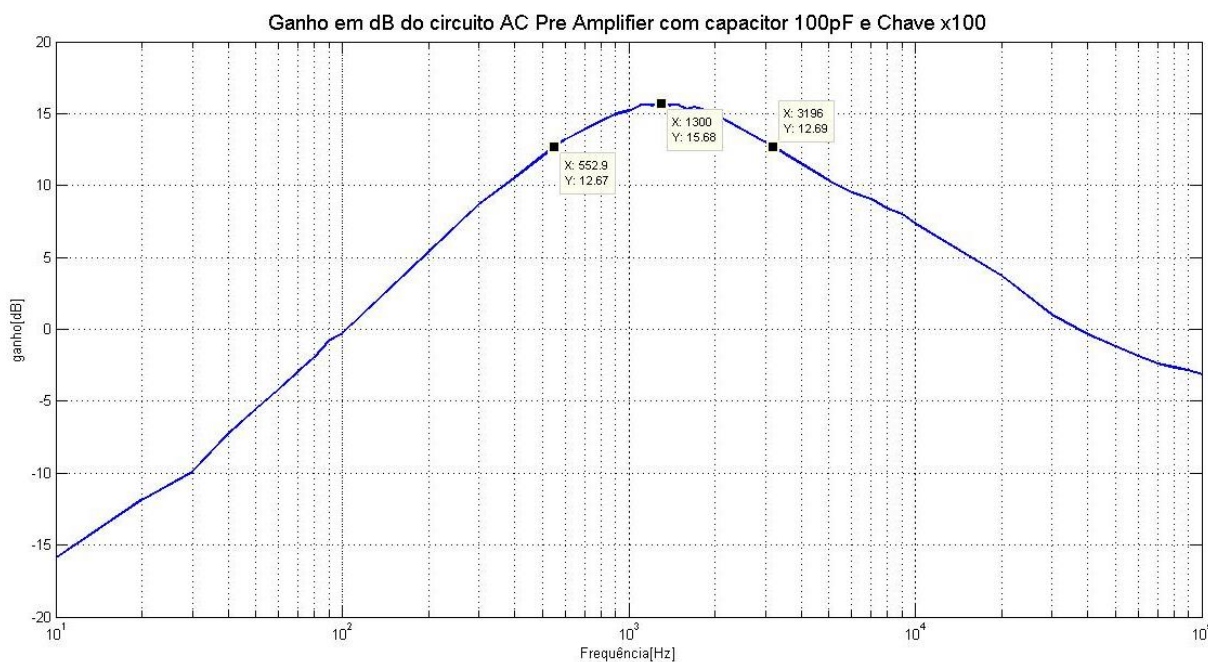


Figura 4-24 Ganho em dB do circuito “AC Pre Amplifier” com capacitor C4 de 100pF e chave multiplicadora x100, obtido via testes de bancada e plotado pelo *software Matlab*.

Na segunda análise (Figura 4-25) o valor de referência foi de 30,1dB, resultando na frequência de corte superior de 3400Hz e a inferior de 515,7Hz, e largura de banda de 2884,3Hz.

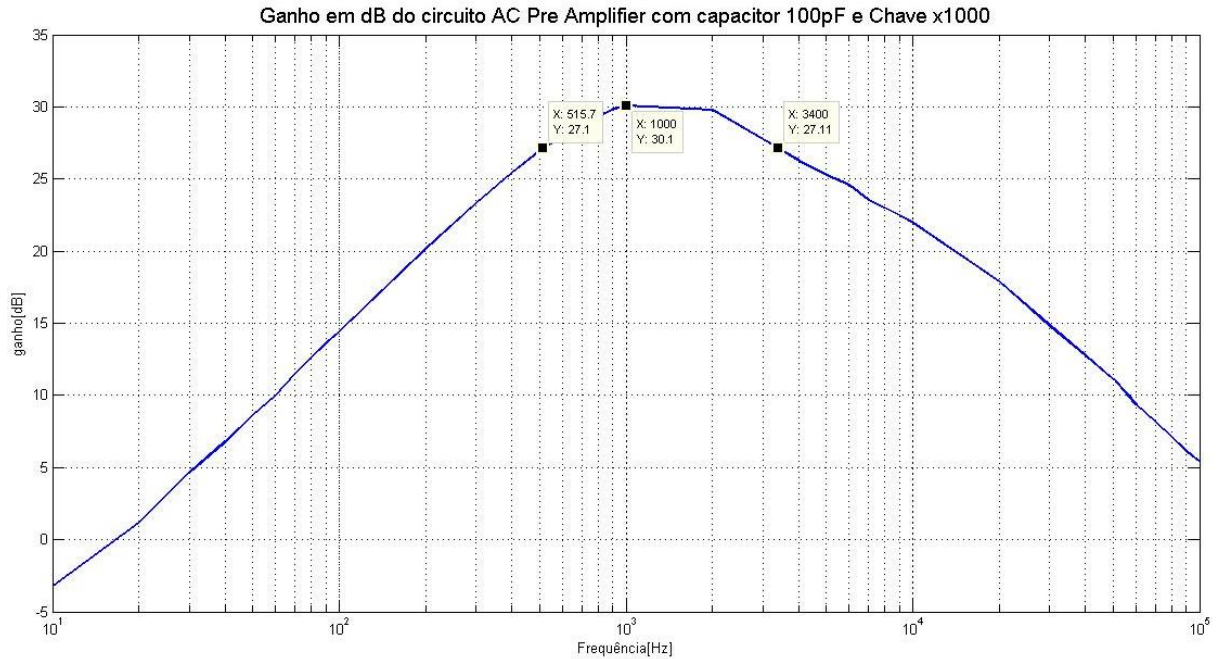


Figura 4-25 Ganho em dB do circuito “AC Pre Amplifier” com capacitor C4 de 100pF e chave multiplicadora x1000, obtido via testes de bancada e plotado pelo *software Matlab*.

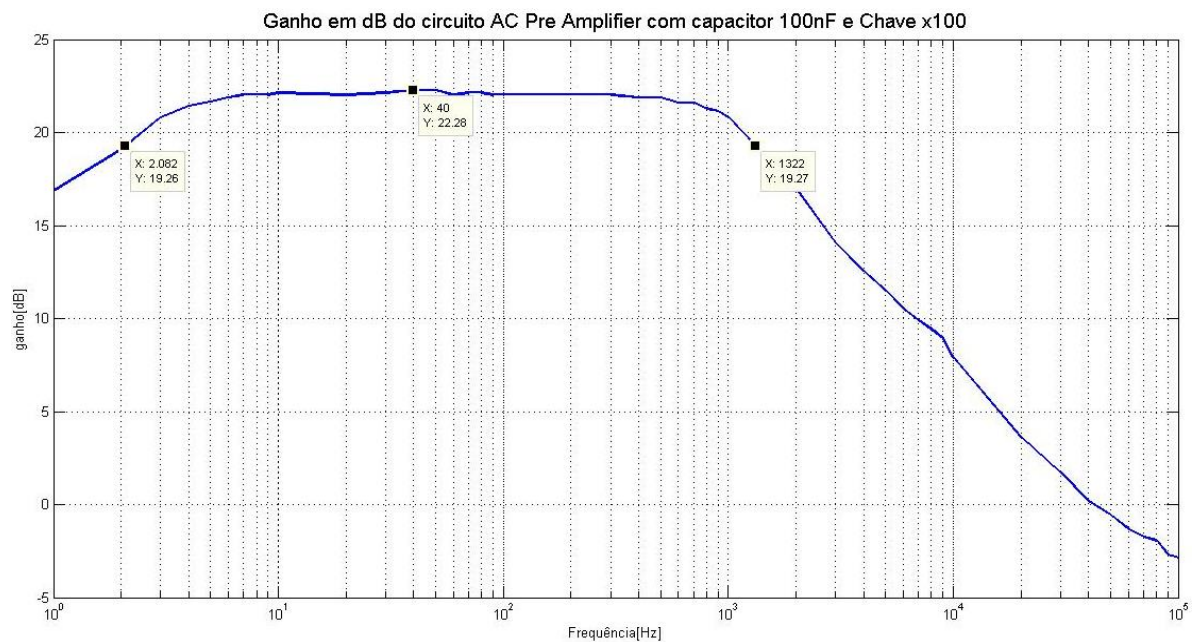


Figura 4-26 Ganho em dB do circuito “AC Pre Amplifier” com capacitor C4 de 100nF e chave multiplicadora x100, obtido via testes de bancada e plotado pelo *software Matlab*.

Na terceira análise (Figura 4-26) o valor de referência adotado foi de 22,28dB, e o valor de frequência de corte superior de 1322Hz e inferior 2,08Hz resultando numa largura de banda de 1319,92Hz.

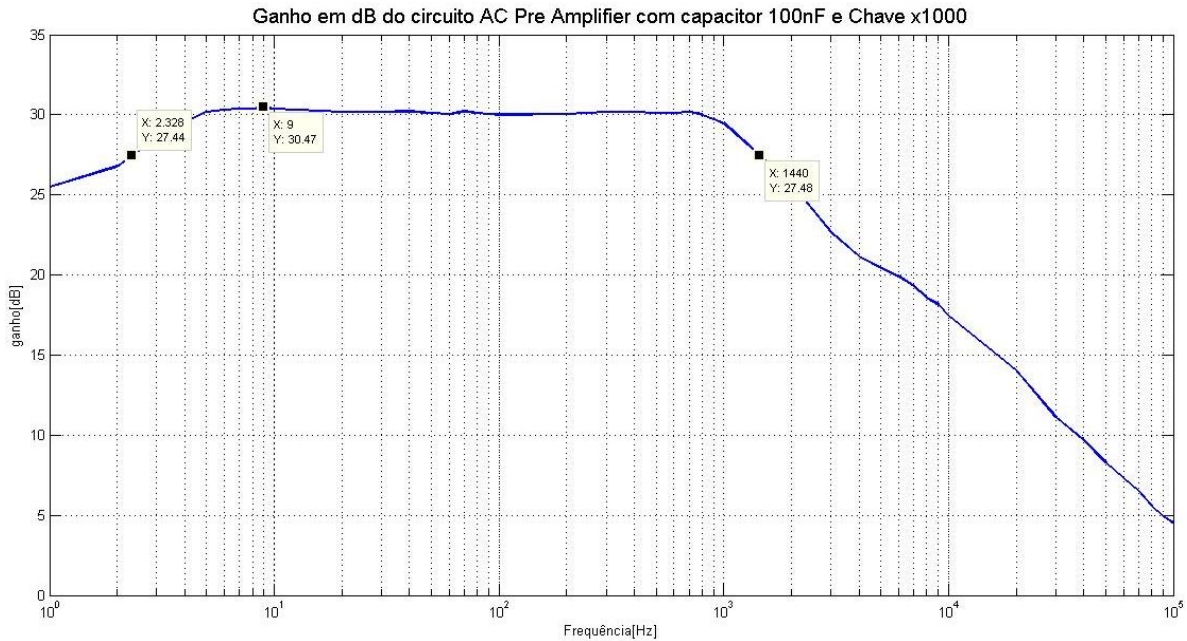


Figura 4-27 Ganho em dB do circuito “AC Pre Amplifier” com capacitor C4 de 100nF e chave multiplicadora x1000, obtido via testes de bancada e plotado pelo *software Matlab*.

Na quarta e ultima análise(Figura 4-27), a referência foi de 30,47dB e a frequência de corte superior foi de 1440Hz e a inferior de 2,328Hz, resultando numa largura de banda de 1437,67Hz.Os resultados são apresentados de uma forma organizada na Tabela 6.

As tabelas a seguir resumem organizadamente os resultados obtidos tanto em teste em bancada quanto em simulação computacional.

Tabela 5 Resultados obtidos do circuito "Head Amplifier"; frequência de corte e largura de banda em Hz, obtidos em simulação e em bancada.

Circuito "Head Amplifier"		Simulação Valores	Bancada Valores
Análise 1	Frequência de Corte	587,9Hz	546,6 Hz
	Largura de Banda	577,9Hz	545,6 Hz
Análise 2	Frequência de Corte	9476,7Hz	9060 Hz
	Largura de Banda	9463,7Hz	9059 Hz

Tabela 6 Resultados obtidos da bancada de teste do circuito "AC Pre Amplifier"; Valores de frequência de corte superior, inferior e largura de banda em Hz.

Resultado em Bancada Circuito "AC Pre Amplifier"		Valores
Análise 1: Chave x100; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	3196 Hz
	Frequência de Corte Inferior	552,9 Hz
	Largura de Banda	2643,1 Hz
	Ganho de Referência	15,68 dB
Análise 2: Chave x1000; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	3400 Hz
	Frequência de Corte Inferior	515,7 Hz
	Largura de Banda	2884,3 Hz
	Ganho de Referência	30,1 dB
Análise 3: Chave x100; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	1322 Hz
	Frequência de Corte Inferior	2,08 Hz
	Largura de Banda	1319,92 Hz
	Ganho de Referência	22,28 dB
Análise 4: Chave x1000; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	1440 Hz
	Frequência de Corte Inferior	2,328 Hz
	Largura de Banda	1437,67 Hz
	Ganho de Referência	30,47 dB

Tabela 7 Resultados das simulações no circuito "AC Pre Amplifier" com ajustes buscando a aproximação dos resultados obtidos em bancada.

Simulação do Circuito "AC Pre Amplifier"		Valores
Análise 1: Chave x100; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	5898,37 Hz
	Frequência de Corte Inferior	907,24 Hz
	Largura de Banda	4991,13 Hz
	Ganho de Referência	16,8 dB
Análise 2: Chave x1000; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	5747,97 Hz
	Frequência de Corte Inferior	890,84 Hz
	Largura de Banda	4857,13 Hz
	Ganho de Referência	36,6 dB
Análise 3: Chave x100; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	3267,16 Hz
	Frequência de Corte Inferior	1,67 Hz
	Largura de Banda	3265,49 Hz
	Ganho de Referência	22,71 dB
Análise 4: Chave x1000; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	3487,47 Hz
	Frequência de Corte Inferior	1,65 Hz
	Largura de Banda	3485,82 Hz
	Ganho de Referência	30,11 dB

Tabela 8 Resultados obtidos da simulação do circuito "AC Pre Amplifier"; Valores de frequência de corte superior, inferior e largura de banda em Hz.

Simulação Circuito "AC Pre Amplifier"		Valores
Análise 1: Chave x100; potenciômetro 1,0 Ω ; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	5445,9 Hz
	Frequência de Corte Inferior	871,5 Hz
	Largura de Banda	4574,4 Hz
	Ganho de Referência	37,37 dB
Análise 2: Chave x100; potenciômetro 100K Ω ; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	5442,8 Hz
	Frequência de Corte Inferior	880,8 Hz
	Largura de Banda	4562 Hz
	Ganho de Referência	31,99 dB
Análise 3: Chave x1000; potenciômetro 1,0 Ω ; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	26,09 kHz
	Frequência de Corte Inferior	1,34 kHz
	Largura de Banda	24,75 kHz
	Ganho de Referência	29,99 dB
Análise 4: Chave x1000; potenciômetro 10K Ω ; capacitor C4 100pF.	Frequência de Corte Superior	100 kHz
	Frequência de Corte Inferior	1,55 kHz
	Largura de Banda	98,45 kHz
	Ganho de Referência	16,89 dB
Análise 5: Chave x100; potenciômetro 1,0 Ω ; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	3010,3 Hz
	Frequência de Corte Inferior	1,7 Hz
	Largura de Banda	3008,6 Hz
	Ganho de Referência	41,08 dB
Análise 6: Chave x100; potenciômetro 100K Ω ; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	3010,3 Hz
	Frequência de Corte Inferior	1,7 Hz
	Largura de Banda	3008,6 Hz
	Ganho de Referência	35,68 dB
Análise 7: Chave x1000; potenciômetro 1,0 Ω ; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	21,99 kHz
	Frequência de Corte Inferior	1,67 Hz
	Largura de Banda	21,988 kHz
	Ganho de Referência	31,13 dB
Análise 8: Chave x1000; potenciômetro 10K Ω ; capacitor C4 100nF.	Frequência de Corte Superior	100 kHz
	Frequência de Corte Inferior	1,68 Hz
	Largura de Banda	99,998 kHz
	Ganho de Referência	17,11 dB

5. Conclusão

A montagem do circuito utilizando o método apresentado é uma solução rápida para se executar os testes em bancada. Se comparado com outro método para desenvolvimentos de protótipos de circuitos eletrônicos que é utilizar uma matriz de contatos, essa por vezes apresenta mau contato, seja nos contatos da placa ou mesmo nas ligações que se utiliza fios e cabos de rede e telefônicos adaptados, de bitola 24 AWG (*American Wire Gauge*) ou aproximadamente 0,5 milímetro de diâmetro. Outra vantagem dessa técnica é não correr o risco de perder ligações elétricas dos circuitos, já que as ligações e trilhas são fixas por solda de estanho, como mostra a Figura 5-1, as trilhas e ligações dos componentes em detalhe.

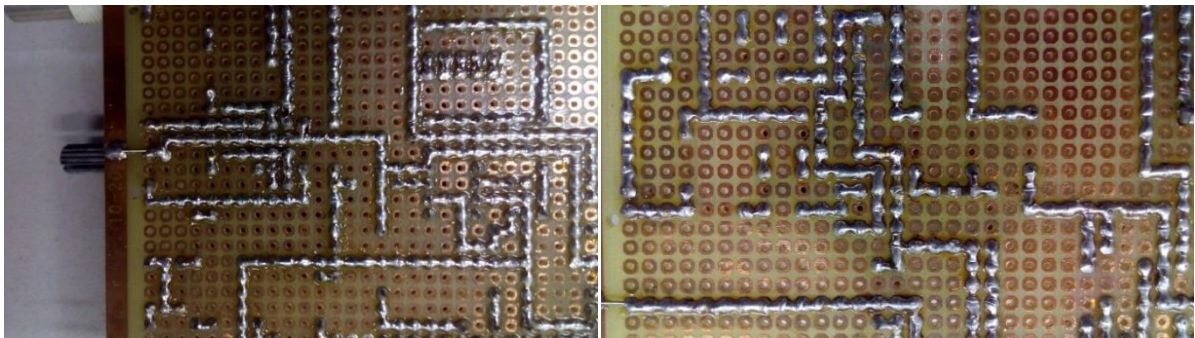


Figura 5-1 Trilhas em estanho na placa perfurada padrão em detalhe.

Entretanto alguns dos empecilhos enfrentados por esse tipo de técnica são as capacitâncias parasitas e indutâncias mútuas produzidas por trilhas próximas, como foi citado na seção 2.5.1. Ainda existem interferências eletromagnéticas advindas do ambiente que aparecem devidos estas mesmas trilhas se comportarem como antenas. Outra questão envolve a manufatura das placas, que uma vez sendo protótipos estão susceptíveis a sofrerem danos elétricos, e com essa técnica de prototipagem há uma maior dificuldade em se substituir componentes danificados em eventuais testes.

Na determinação da largura de banda dos circuitos, no circuito “*Head Amplifier*” observou-se uma grande proximidade dos valores de largura de banda e frequência de corte obtidos tanto nos ensaios em bancada quanto nos ensaios computacionais. O circuito se comportou como um filtro passa-baixa, com frequência de corte e largura de banda que dependem da configuração que se encontram, e os valores são mostrados na Tabela 5

Já no outro circuito em análise, o “*AC Pre Amplifier*” ocorreu um desacordo dos valores obtidos em bancada e em ambiente virtual, como indica os resultados nas Tabela 6 e Tabela 7, esta última resultados das simulações computacionais que buscavam a aproximação com os resultados em bancada, e mesmo assim não se chegou a respostas próximas. Um dos fatos que podem explicar esse comportamento foi a distorção observada nos sinais de saída. Observa-se esse comportamento nas Figura 3-16 e Figura 3-17, quando se estava calibrando o circuito para a coleta de dados. Para trabalhos futuros, deve se revisar a montagem em circuito real para buscar equívocos na montagem, buscar boas práticas de montagem em PCB a fim de se evitar ruídos e interações mútuas, tanto de ambiente interno à placa quanto à fatores externos. Pode se tentar também aumentar a alimentação dos Amp Ops, que nesse trabalho estão operando em uma faixa de alimentação um pouco abaixo da máxima.

Também, uma das recomendações que se faz para futuros trabalhos será o projeto dos circuitos em softwares de design de PCB, se possível utilizando componentes SMD para economia de área de placa, e seguindo boas práticas de projetos de PCB afim de se evitar capacitâncias parasitas e indutâncias mútuas no circuito e ruídos externos provenientes de componentes RF e da rede. Outro ponto seria buscar utilizar CIs de um mesmo encapsulamento.

Ainda para facilitar o manuseio das placas e execução de testes pode se incluir no projeto a construção de uma fonte de alimentação CC simétrica para os valores de $\pm 15,0V$ e $\pm 9,0V$, composta de um retificador de onda completa, trafo abaixador de tensão capaz de fornecer corrente suficiente para os circuitos e alguns circuitos integrados reguladores de tensão (tanto positiva quanto negativa).

Bibliografia

Carter, Bruce and Mancini, Ron. 2009. *Op Amps For Everyone, 3rd Edition*. s.l. : Elsevier Inc., 2009.

Engelhardt, Mike. LTspice IV Help → F.A.Q. → License and Distribution. [Help of software version 4.23I of 22 July 2016].

—. LTspice IV Help → Introduction. [Help of software version 4.23I of 22 July 2016].

Ferreira, Lorena Lopes. 2011. Técnica de Eletrofisiologia em Carrapatos. [Seminário apresentado junto à Disciplina Seminários Aplicados do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Escola de Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Goiás(Mestrado)]. Goiânia : Universidade Federal de Goiás; Escola de Veterinária e Zootecnia., 2011. p. 27.

Franco, S. 2002. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 3rd Edition*. New York : McGraw-Hill, 2002.

Kandel, Eric R., et al. 2000. *Principles of Neural Science*. Fifth Edition. New York : McGraw-Hill, 2000. p. 1568.

LTC. 2016. Design Simulation and Device Models. [Online] Linear Technology, 2016. <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>.

Magalhães, Marcos Nascimento and Lima, Antonio Carlos Pedroso. 2004. *Noções de Probabilidade e Estatística*. 6ª edição. s.l. : EDUSP, 2004.

Millman, Jacob and Halkias, Christos C. 1972. *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*. New York : McGraw-Hill, 1972.

Nascimento, Marcília Aparecida, Salomão, Tânia Maria Fernandes and Martins, Gustavo Ferreira. 2013. Estudo Comparativo das Sensilas Antenais de Operárias de *Melipona scutellaris* Latreille (Hymenoptera: Apidae) de Diferentes Altitudes. *EntomoBrasilis*. 2013, Vol. 6, pp. 64-67.

Ott, Henry W. 1988. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. 2ª edição. New York : John Wiley & Sons, 1988.

Pereira, Bruno Miguel Agostinho dos Santos. 2008. Sistema de aquisição de sinais biomédicos baseado num telefone celular. *Aplicação na estimação da temperatura Central para determinação do ciclo circadiano do sono*. [Dissertação(Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores)]. Lisboa : Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa, Abril 2008. p. 106.

Raminhos, João Pedro Batista Dionízio Vilhena. 2009. Aquisição de Sinais Fisiológicos. *Aplicação ao controlo de uma plataforma móvel a partir do EOG*. [Dissertação(Mestrado em Engenharia Electrónica)]. Lisboa : Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa, Julho 2009. p. 75.

Santini, Tales Roberto de Souza. 2014. Projeto e Análise de Aplicações de Circuladores Ativos para a Operação em Frequências de Ultrassom Doppler de Ondas Contínuas. [Dissertação(Mestrado em Engenharia Elétrica)]. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos; Universidade de São Paulo, 2014. p. 86.

Sedra, A. S. and Smith, K. C. 2011. *Microelectronic Circuits, 6th Edition*. New York : Oxford University Press, 2011.

Vargas, Fabian and Benfica, Juliano. Tutorial do Simulador SPICE. [Online] [http://www.feng.pucrs.br/~vargas/Disciplinas/Microeletronica-EE\(4458G-04\)/HSpice-WEB/Manuais/Tutorial%20HSPICE%20\(Marlon\).pdf](http://www.feng.pucrs.br/~vargas/Disciplinas/Microeletronica-EE(4458G-04)/HSpice-WEB/Manuais/Tutorial%20HSPICE%20(Marlon).pdf).

Verkhatsky, Alexei and Parpura, Vladimir. 2014. History of Electrophysiology and the Patch Clamp. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*. Julho 2014.

Veronese, Paulo Roberto. 2009. Introdução a Amplificadores Operacionais Integrados. *Material de apoio às disciplinas SEL0313/0314/0315*. São Carlos : SEL- EESC- USP, 2009.

Webster, John G. 1998. Medical Instrumentation: Application and Design. 3rd Edition . s.l. : Houghton Mifflin Company, 1998, Chapter 1.

Wibe, Atle. 2004. How the choice of method influence on the results in electrophysiological studies of insect olfaction. *Journal of Insect Physiology*. 6, Julho 2004, Vol. 50, pp. 497-503.

Apêndice A – Valores coletados em bancada do circuito “*Head Amplifier*”

Este apêndice apresenta as tabelas com os dados coletados segundo descrito na seção 3.3.1 Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “*Head Amplifier*”..

Tabela 9 Valores coletados de tensão de saída V_{OUT} do circuito “*Head Amplifier*”, bem como os ganhos absoluto e em decibéis; tensão de entrada V_{IN} ajustada em 0,05V pico a pico, e valores calculados do ganho V_{OUT}/V_{IN} ; capacitor HF CUT foi ajustado em 1,0nF.

$V_{IN}[V]$	0,05		
f[Hz]	$V_{OUT}[V_{pp}]$	V_{OUT}/V_{IN}	$V_{OUT}/V_{IN}[dB]$
1,0	2,240	22,400	13,502
2,0	2,240	22,400	13,502
3,0	2,260	22,600	13,541
4,0	2,260	22,600	13,541
5,0	2,280	22,800	13,579
6,0	2,260	22,600	13,541
7,0	2,240	22,400	13,502
8,0	2,250	22,500	13,522
9,0	2,250	22,500	13,522
10,0	2,250	22,500	13,522
20,0	2,250	22,500	13,522
30,0	2,250	22,500	13,522
40,0	2,250	22,500	13,522
50,0	2,250	22,500	13,522
60,0	2,240	22,400	13,502
70,0	2,240	22,400	13,502
80,0	2,240	22,400	13,502
90,0	2,240	22,400	13,502
100,0	2,220	22,200	13,464
200,0	2,120	21,200	13,263
300,0	2,000	20,000	13,010
400,0	1,820	18,200	12,601
500,0	1,700	17,000	12,304
600,0	1,550	15,500	11,903
700,0	1,430	14,300	11,553
800,0	1,310	13,100	11,173
900,0	1,220	12,200	10,864
1000,0	1,140	11,400	10,569
1100,0	1,060	10,600	10,253

1200,0	0,980	9,800	9,912
1300,0	0,918	9,180	9,628
1400,0	0,868	8,680	9,385
1500,0	0,818	8,180	9,128
1600,0	0,774	7,740	8,887
1700,0	0,736	7,360	8,669
1800,0	0,703	7,030	8,470
1900,0	0,675	6,750	8,293
2000,0	0,637	6,370	8,041
3000,0	0,452	4,520	6,551
4000,0	0,360	3,600	5,563
5000,0	0,276	2,760	4,409
6000,0	0,242	2,420	3,838
7000,0	0,216	2,160	3,345
8000,0	0,194	1,940	2,878
9000,0	0,178	1,780	2,504
10000,0	0,168	1,680	2,253
20000,0	0,114	1,140	0,569
30000,0	0,102	1,020	0,086

Tabela 10 Valores coletados de tensão de saída V_{OUT} do circuito “*Head Amplifier*”, bem como os ganhos absoluto e em decibéis tensão de entrada V_{IN} ajustada em 0.5V pico a pico, e valores calculados do ganho V_{OUT}/V_{IN} ; capacitor HF CUT foi ajustado em 1,0nF.

$V_{IN}[V]$	0,5		
f[Hz]	$V_{OUT}[V_{pp}]$	V_{OUT}/V_{IN}	$V_{OUT}/V_{IN} [dB]$
1,0	22,500	22,500	13,522
2,0	22,600	22,600	13,541
3,0	22,600	22,600	13,541
4,0	22,600	22,600	13,541
5,0	22,600	22,600	13,541
6,0	22,600	22,600	13,541
7,0	22,600	22,600	13,541
8,0	22,500	22,500	13,522
9,0	22,500	22,500	13,522
10,0	22,500	22,500	13,522
20,0	22,500	22,500	13,522
30,0	22,400	22,400	13,502
40,0	22,400	22,400	13,502
50,0	22,400	22,400	13,502
60,0	22,400	22,400	13,502
70,0	22,300	22,300	13,483
80,0	22,100	22,100	13,444

90,0	22,100	22,100	13,444
100,0	22,100	22,100	13,444
200,0	21,000	21,000	13,222
300,0	19,700	19,700	12,945
400,0	18,200	18,200	12,601
500,0	16,600	16,600	12,201
600,0	15,100	15,100	11,790
700,0	14,000	14,000	11,461
800,0	13,000	13,000	11,139
900,0	11,600	11,600	10,645
1000,0	10,700	10,700	10,294
1100,0	9,990	9,990	9,996
1200,0	9,350	9,350	9,708
1300,0	8,780	8,780	9,435
1400,0	8,220	8,220	9,149
1500,0	7,770	7,770	8,904
1600,0	7,280	7,280	8,621
1700,0	6,920	6,920	8,401
1800,0	6,600	6,600	8,195
1900,0	6,280	6,280	7,980
2000,0	6,040	6,040	7,810
3000,0	4,250	4,250	6,284
4000,0	3,200	3,200	5,051
5000,0	2,650	2,650	4,232
6000,0	2,270	2,270	3,560
7000,0	2,000	2,000	3,010
8000,0	1,820	1,820	2,601
9000,0	1,660	1,660	2,201
10000,0	1,540	1,540	1,875
20000,0	1,070	1,070	0,294
30000,0	0,890	0,890	-0,506

Tabela 11 Valores coletados de tensão de saída V_{OUT} do circuito “*Head Amplifier*”, bem como os ganhos absoluto e em decibéis; tensão de entrada V_{IN} ajustada em 0.05V pico a pico, e valores calculados do ganho V_{OUT}/V_{IN} ; capacitor HF CUT foi ajustado em 47pF.

$V_{IN}[V]$	0,05		
f[Hz]	$V_{OUT}[V_{pp}]$	V_{OUT}/V_{IN}	$V_{OUT}/V_{IN} [dB]$
1,0	2,280	22,800	13,579
2,0	2,280	22,800	13,579
3,0	2,280	22,800	13,579
4,0	2,290	22,900	13,598
5,0	2,290	22,900	13,598

6,0	2,280	22,800	13,579
7,0	2,280	22,800	13,579
8,0	2,290	22,900	13,598
9,0	2,280	22,800	13,579
10,0	2,280	22,800	13,579
20,0	2,280	22,800	13,579
30,0	2,290	22,900	13,598
40,0	2,260	22,600	13,541
50,0	2,290	22,900	13,598
60,0	2,280	22,800	13,579
70,0	2,290	22,900	13,598
80,0	2,290	22,900	13,598
90,0	2,290	22,900	13,598
100,0	2,290	22,900	13,598
200,0	2,290	22,900	13,598
300,0	2,300	23,000	13,617
400,0	2,300	23,000	13,617
500,0	2,300	23,000	13,617
600,0	2,290	22,900	13,598
700,0	2,290	22,900	13,598
800,0	2,290	22,900	13,598
900,0	2,280	22,800	13,579
1000,0	2,280	22,800	13,579
2000,0	2,260	22,600	13,541
3000,0	2,170	21,700	13,365
4000,0	2,130	21,300	13,284
5000,0	2,020	20,200	13,054
6000,0	1,920	19,200	12,833
7000,0	1,830	18,300	12,625
8000,0	1,730	17,300	12,380
9000,0	1,640	16,400	12,148
10000,0	1,570	15,700	11,959
11000,0	1,500	15,000	11,761
12000,0	1,430	14,300	11,553
13000,0	1,370	13,700	11,367
14000,0	1,260	12,600	11,004
15000,0	1,190	11,900	10,755
16000,0	1,140	11,400	10,569
17000,0	1,090	10,900	10,374
18000,0	1,040	10,400	10,170
19000,0	1,010	10,100	10,043
20000,0	0,968	9,680	9,859
30000,0	0,672	6,720	8,274
40000,0	0,548	5,480	7,388
50000,0	0,452	4,520	6,551

60000,0	0,378	3,780	5,775
70000,0	0,338	3,380	5,289
80000,0	0,306	3,060	4,857
90000,0	0,278	2,780	4,440
100000,0	0,250	2,500	3,979

Tabela 12 Valores coletados de tensão de saída V_{OUT} do circuito “*Head Amplifier*”, bem como os ganhos absoluto e em decibéis; tensão de entrada V_{IN} ajustada em 0.5V pico a pico, e valores calculados do ganho V_{OUT}/V_{IN} ; capacitor HF CUT foi ajustado em 47pF.

$V_{IN}[V]$	0,5		
f[Hz]	$V_{OUT}[V_{pp}]$	V_{OUT}/V_{IN}	$V_{OUT}/V_{IN} [dB]$
1,0	22,800	22,800	13,579
2,0	22,800	22,800	13,579
3,0	22,800	22,800	13,579
4,0	22,800	22,800	13,579
5,0	22,800	22,800	13,579
6,0	22,800	22,800	13,579
7,0	22,800	22,800	13,579
8,0	22,800	22,800	13,579
9,0	22,800	22,800	13,579
10,0	22,800	22,800	13,579
20,0	22,800	22,800	13,579
30,0	22,800	22,800	13,579
40,0	22,800	22,800	13,579
50,0	22,800	22,800	13,579
60,0	22,800	22,800	13,579
70,0	22,800	22,800	13,579
80,0	22,800	22,800	13,579
90,0	22,800	22,800	13,579
100,0	22,800	22,800	13,579
200,0	22,800	22,800	13,579
300,0	22,800	22,800	13,579
400,0	22,800	22,800	13,579
500,0	22,800	22,800	13,579
600,0	22,800	22,800	13,579
700,0	22,800	22,800	13,579
800,0	22,800	22,800	13,579
900,0	22,800	22,800	13,579
1000,0	22,800	22,800	13,579
2000,0	22,600	22,600	13,541
3000,0	22,000	22,000	13,424
4000,0	21,000	21,000	13,222

5000,0	20,200	20,200	13,054
6000,0	19,400	19,400	12,878
7000,0	18,200	18,200	12,601
8000,0	17,400	17,400	12,405
9000,0	16,200	16,200	12,095
10000,0	15,400	15,400	11,875
11000,0	13,800	13,800	11,399
12000,0	13,000	13,000	11,139
13000,0	12,400	12,400	10,934
14000,0	11,800	11,800	10,719
15000,0	11,200	11,200	10,492
16000,0	10,800	10,800	10,334
17000,0	10,200	10,200	10,086
18000,0	9,760	9,760	9,894
19000,0	9,440	9,440	9,750
20000,0	9,040	9,040	9,562
30000,0	6,160	6,160	7,896
40000,0	4,760	4,760	6,776
50000,0	3,920	3,920	5,933
60000,0	3,220	3,220	5,079
70000,0	2,780	2,780	4,440
80000,0	2,480	2,480	3,945
90000,0	2,220	2,220	3,464
100000,0	2,040	2,040	3,096

Apêndice B – Valores coletados em bancada do circuito “AC Pre Amplifier”

Este apêndice apresenta as tabelas com os dados coletados segundo descrito na 3.3.2 Obtenção da Largura de Banda em Bancada do Circuito “AC Pre Amplifier”.

Tabela 13 Valores coletados em bancada do circuito “AC Pre Amplifier” de tensão de saída V_{OUT} , e respectivo ganho absoluto e em decibéis; chave multiplicadora x100 e capacitor C4 de 100pF.

Chave x100		Capacitor 100pF	
f[Hz]	Vout[Vpp]	Vout/Vin	Vout/Vin[dB]
10,0	0,160	0,160	-15,918
20,0	0,256	0,256	-11,835
30,0	0,320	0,320	-9,897
40,0	0,432	0,432	-7,290
50,0	0,528	0,528	-5,547
60,0	0,616	0,616	-4,208
70,0	0,712	0,712	-2,950
80,0	0,800	0,800	-1,938
90,0	0,912	0,912	-0,800
100,0	0,968	0,968	-0,282
200,0	1,860	1,860	5,390
300,0	2,720	2,720	8,691
400,0	3,360	3,360	10,527
500,0	4,000	4,000	12,041
600,0	4,560	4,560	13,179
700,0	4,960	4,960	13,910
800,0	5,320	5,320	14,518
900,0	5,600	5,600	14,964
1000,0	5,760	5,760	15,208
1100,0	6,000	6,000	15,563
1200,0	6,000	6,000	15,563
1300,0	6,080	6,080	15,678
1400,0	6,000	6,000	15,563
1500,0	6,000	6,000	15,563
1600,0	5,840	5,840	15,328
1700,0	5,920	5,920	15,446
1800,0	5,840	5,840	15,328
1900,0	5,680	5,680	15,087
2000,0	5,600	5,600	14,964

3000,0	4,480	4,480	13,026
4000,0	3,760	3,760	11,504
5000,0	3,280	3,280	10,317
6000,0	3,000	3,000	9,542
7000,0	2,840	2,840	9,066
8000,0	2,640	2,640	8,432
9000,0	2,520	2,520	8,028
10000,0	2,320	2,320	7,310
20000,0	1,530	1,530	3,694
30000,0	1,120	1,120	0,984
40000,0	0,960	0,960	-0,355
50000,0	0,872	0,872	-1,190
60000,0	0,808	0,808	-1,852
70000,0	0,760	0,760	-2,384
80000,0	0,736	0,736	-2,662
90000,0	0,720	0,720	-2,853
100000,0	0,696	0,696	-3,148

Tabela 14 Valores coletados em bancada do circuito “AC Pre Amplifier” de tensão de saída V_{OUT} , e respectivo ganho absoluto e em decibéis; chave multiplicadora x100 e capacitor C4 de 100nF.

Chave x100		Capacitor 100nF	
f[Hz]	Vout[Vpp]	Vout/Vin	Vout/Vin[dB]
1,0	6,960	6,960	16,852
2,0	9,000	9,000	19,085
3,0	11,000	11,000	20,828
4,0	11,800	11,800	21,438
5,0	12,100	12,100	21,656
6,0	12,400	12,400	21,868
7,0	12,600	12,600	22,007
8,0	12,600	12,600	22,007
9,0	12,600	12,600	22,007
10,0	12,800	12,800	22,144
20,0	12,600	12,600	22,007
30,0	12,800	12,800	22,144
40,0	13,000	13,000	22,279
50,0	13,000	13,000	22,279
60,0	12,600	12,600	22,007
70,0	12,800	12,800	22,144
80,0	12,800	12,800	22,144
90,0	12,600	12,600	22,007

100,0	12,600	12,600	22,007
200,0	12,600	12,600	22,007
300,0	12,600	12,600	22,007
400,0	12,400	12,400	21,868
500,0	12,400	12,400	21,868
600,0	12,000	12,000	21,584
700,0	12,000	12,000	21,584
800,0	11,600	11,600	21,289
900,0	11,400	11,400	21,138
1000,0	11,000	11,000	20,828
2000,0	7,040	7,040	16,951
3000,0	5,040	5,040	14,049
4000,0	4,240	4,240	12,547
5000,0	3,760	3,760	11,504
6000,0	3,360	3,360	10,527
7000,0	3,120	3,120	9,883
8000,0	2,960	2,960	9,426
9000,0	2,800	2,800	8,943
10000,0	2,480	2,480	7,889
20000,0	1,520	1,520	3,637
30000,0	1,220	1,220	1,727
40000,0	1,020	1,020	0,172
50000,0	0,940	0,940	-0,537
60000,0	0,860	0,860	-1,310
70000,0	0,820	0,820	-1,724
80000,0	0,800	0,800	-1,938
90000,0	0,736	0,736	-2,662
100000,0	0,720	0,720	-2,853

Tabela 15 Valores coletados em bancada do circuito “AC Pre Amplifier” de tensão de saída V_{OUT} , e respectivo ganho absoluto e em decibéis; chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 de 100pF.

Chave x1000		Capacitor 100pF	
f[Hz]	Vout[Vpp]	Vout/Vin	Vout/Vin[dB]
10,0	0,688	0,688	-3,248
20,0	1,140	1,140	1,138
30,0	1,710	1,710	4,660
40,0	2,180	2,180	6,769
50,0	2,700	2,700	8,627
60,0	3,160	3,160	9,994
70,0	3,740	3,740	11,457

80,0	4,280	4,280	12,629
90,0	4,800	4,800	13,625
100,0	5,280	5,280	14,453
200,0	10,200	10,200	20,172
300,0	14,600	14,600	23,287
400,0	18,600	18,600	25,390
500,0	22,200	22,200	26,927
600,0	25,000	25,000	27,959
700,0	27,400	27,400	28,755
800,0	29,400	29,400	29,367
900,0	31,000	31,000	29,827
1000,0	32,000	32,000	30,103
2000,0	30,800	30,800	29,771
3000,0	24,400	24,400	27,748
4000,0	20,600	20,600	26,277
5000,0	18,400	18,400	25,296
6000,0	17,000	17,000	24,609
7000,0	15,000	15,000	23,522
8000,0	14,100	14,100	22,984
9000,0	13,300	13,300	22,477
10000,0	12,500	12,500	21,938
20000,0	7,840	7,840	17,886
30000,0	5,520	5,520	14,839
40000,0	4,360	4,360	12,790
50000,0	3,600	3,600	11,126
60000,0	2,940	2,940	9,367
70000,0	2,560	2,560	8,165
80000,0	2,260	2,260	7,082
90000,0	2,020	2,020	6,107
100000,0	1,860	1,860	5,390

Tabela 16 Valores coletados em bancada do circuito “AC Pre Amplifier” de tensão de saída V_{OUT} , e respectivo ganho absoluto e em decibéis; chave multiplicadora x1000 e capacitor C4 de 100nF.

Chave x1000		Capacitor 100nF	
f[Hz]	Vout[Vpp]	Vout/Vin	Vout/Vin[dB]
1,0	18,800	18,800	25,483
2,0	21,800	21,800	26,769
3,0	26,800	26,800	28,563
4,0	30,000	30,000	29,542
5,0	32,200	32,200	30,157

6,0	32,800	32,800	30,317
7,0	33,000	33,000	30,370
8,0	33,000	33,000	30,370
9,0	33,400	33,400	30,475
10,0	33,000	33,000	30,370
20,0	32,200	32,200	30,157
30,0	32,200	32,200	30,157
40,0	32,400	32,400	30,211
50,0	32,000	32,000	30,103
60,0	31,800	31,800	30,049
70,0	32,400	32,400	30,211
80,0	32,000	32,000	30,103
90,0	31,800	31,800	30,049
100,0	31,600	31,600	29,994
200,0	31,800	31,800	30,049
300,0	32,200	32,200	30,157
400,0	32,200	32,200	30,157
500,0	32,000	32,000	30,103
600,0	32,000	32,000	30,103
700,0	32,200	32,200	30,157
800,0	31,600	31,600	29,994
900,0	30,600	30,600	29,714
1000,0	29,800	29,800	29,484
2000,0	19,200	19,200	25,666
3000,0	13,600	13,600	22,671
4000,0	11,400	11,400	21,138
5000,0	10,500	10,500	20,424
6000,0	9,920	9,920	19,930
7000,0	9,200	9,200	19,276
8000,0	8,480	8,480	18,568
9000,0	8,080	8,080	18,148
10000,0	7,440	7,440	17,431
20000,0	5,040	5,040	14,049
30000,0	3,600	3,600	11,126
40000,0	3,040	3,040	9,657
50000,0	2,600	2,600	8,299
60000,0	2,320	2,320	7,310
70000,0	2,120	2,120	6,527
80000,0	1,900	1,900	5,575
90000,0	1,760	1,760	4,910
100000,0	1,680	1,680	4,506

