

Prefácio

Amplificadores Operacionais Integrados são blocos analógicos essenciais para a eletrônica moderna. Introduzidos no mercado no final da década de sessenta, vêm sendo constantemente desenvolvidos e aprimorados, tendo, nos dias atuais, alcançado 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.

No mercado existem atualmente milhares de modelos abrangendo faixas de aplicação muito extensas em baixas e altas frequências. Originalmente fabricados em tecnologias bipolares convencionais e disponíveis apenas para aplicações em *DC* e frequências de áudio, esses circuitos integrados evoluíram para tecnologias mais modernas como: *Bi-FET*, *CMOS*, *Bi-CMOS* e bipolares complementares de alta velocidade. Arquiteturas internas, originalmente *VFA* e *Norton*, com aplicações em *DC* e baixas frequências, também evoluíram para arquiteturas mais eficazes, tanto em consumo, quanto em aplicações em altas frequências. As arquiteturas *CMOS*, *OTA* e *folded cascode*, de baixa tensão e baixo consumo, e as arquiteturas bipolares *CFA*, de altíssima velocidade, e a arquitetura *totalmente diferencial*, de alta velocidade, baixo ruído e baixa distorção, são exemplos de aplicações modernas.

Levando-se em conta a importância desses dispositivos em Eletrônica Analógica e a incidência de aplicações que eles propiciam, mesmo nas primeiras disciplinas do curso de Engenharia Elétrica, e, levando-se em conta também que um dos objetivos da disciplina *SEL315-Circuitos Eletrônicos III* é estudar e projetar arquiteturas internas integradas e discretas, o desenvolvimento deste texto introdutório tornou-se necessário. Fazem parte deste texto: a apresentação do componente e de seus diversos tipos, a definição de seus principais parâmetros elétricos, os principais exemplos de aplicação, as principais arquiteturas internas e suas propriedades de universalidade, idealização e transparência. Esses conhecimentos básicos são necessários, também, para o desenvolvimento do projeto proposto para a disciplina *SEL315-Circuitos Eletrônicos III*.

Posteriormente, durante os cursos *SEL345-Aplicação de Circuitos Integrados Lineares* e *SEL393-Lab. de Aplicação de Circuitos Integrados Lineares*, o leitor terá a oportunidade de complementar seus conhecimentos e de se aprofundar em projetos envolvendo esses dispositivos.

O autor.

Índice

Prefácio.....	i
1. Amplificadores Operacionais VFA.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Simbologia e Circuito Equivalente.....	1
1.3. Parâmetros Elétricos.....	1
1.3.1. Ganho em Malha Aberta.....	2
1.3.2. Resistência de Entrada Diferencial.....	2
1.3.3. Resistência de Saída.....	2
1.4. Parâmetros Dinâmicos.....	2
1.4.1. Velocidade de Resposta e Resposta em Frequências.....	2
1.4.2. Margem de Fase.....	4
1.4.3. Tempo de Acomodação.....	4
1.4.4. Taxa de Variação da Tensão de Saída.....	5
1.4.5. Resposta em Frequências para Grandes Sinais.....	6
1.4.6. Ruídos.....	6
1.5. Parâmetros Estáticos.....	9
1.5.1. Falta de Balanceamento <i>DC</i>	9
1.5.2. Alimentação.....	10
1.5.3. Razão de Rejeição a Modo Comum.....	11
1.5.4. Razão de Rejeição à Fonte de Alimentação.....	11
1.5.5. Faixa de Tensão de Entrada em Modo Comum.....	12
1.5.6. Excursão de Saída.....	12
1.5.7. Carga Máxima.....	12
2. Circuitos Básicos de Aplicação.....	13
2.1. Amplificador Realimentado.....	13
2.2. Amplificador Não-Inversor.....	14
2.2.1. Parâmetros Idealizados.....	14
2.2.2. Parâmetros Não-Idealizados.....	15
2.3. Amplificador Inversor.....	16
2.3.1. Parâmetros Não-Idealizados.....	16
2.3.2. Parâmetros Idealizados.....	18
2.4. Somador Inversor.....	18
2.5. Somador-Subtrator.....	19
2.6. Isolador.....	20
2.7. Integrador.....	20
2.8. Derivador ou Diferenciador.....	22
2.9. Amplificador com Entrada Totalmente Diferencial.....	23
3. Circuitos de Aplicações em AC.....	25
3.1. Amplificador Não-Inversor.....	25
3.2. Amplificador Inversor.....	25
3.3. Misturador de Áudio.....	26
3.4. Isolador de Áudio.....	27
3.5. Filtros Passa-Baixos.....	27
3.5.1. Filtro Passa-Baixos de Sallen-Key.....	27

3.5.2.	Filtro Passa-Baixos MFB.....	30
3.6.	Filtros Passa-Altos.....	33
3.6.1.	Filtro Passa-Altos de Sallen-Key.....	33
3.6.2.	Filtro Passa-Altos MFB.....	35
3.7.	Filtros Passa-Faixa.....	38
3.7.1.	Filtro de Fliege Não-Inversor.....	38
3.7.2.	Filtro Multirrealimentado Inversor.....	42
3.8.	Filtro Rejeita-Faixa.....	42
3.9.	Filtro Passa-Tudo.....	45
3.9.1.	Passa-Tudo com Atraso de Fase.....	45
3.9.2.	Passa-Tudo com Adiantamento de Fase.....	46
4.	Circuitos Para Aplicações Especiais	48
4.1.	Multiplicador de Capacitância.....	48
4.1.1.	Capacitância Equivalente.....	48
4.1.2.	Resistência de Perdas Equivalente.....	48
4.1.3.	Fator de Qualidade.....	48
4.2.	Simulador de Indutância ou Girador.....	49
4.2.1.	Indutância Equivalente.....	49
4.2.2.	Resistência de Perdas Equivalente.....	49
4.2.3.	Fator de Qualidade.....	49
4.3.	Retificador de Onda Completa.....	50
4.4.	Circuito Quadrador.....	51
4.4.1.	Princípio de Funcionamento.....	52
4.4.2.	Circuito Quadrador.....	54
4.4.3.	Circuito Extrator do Valor Médio do Quadrado da Tensão.....	54
4.4.4.	Transistores Bipolares.....	55
4.5.	Circuito Extrator de Raiz Quadrada.....	55
4.5.1.	Princípio de Funcionamento.....	55
4.5.2.	Circuito.....	57
4.6.	Circuito Extrator de Valor Eficaz.....	57
4.6.1.	Isolador.....	58
4.6.2.	Retificador de Onda Completa.....	58
4.6.3.	Circuito Quadrador.....	59
4.6.4.	Circuito Extrator de Raiz Quadrada.....	59
4.6.5.	Circuito Prático de um Conversor RMS-DC.....	59
4.6.6.	Conclusão.....	62
4.7.	Detector de Pico.....	62
5.	Comparadores	65
5.1.	Amplificadores Operacionais Usados Como Comparadores.....	65
5.2.	Comparadores Com Histerese.....	66
5.2.1.	Inversor.....	66
5.2.2.	Não-Inversor.....	67
5.3.	Exemplo de Aplicação.....	68
6.	Estabilizadores de Tensão e de Corrente	70
6.1.	Regulador <i>Shunt</i>	70
6.2.	Regulador Série.....	70
6.3.	Tensões de Referência.....	72

6.3.1.	Tensão de Referência Ajustável.....	72
6.3.2.	Tensão de Referência Integrada.....	73
6.4.	Estabilizadores de Tensão.....	74
6.4.1.	Estabilizador Misto Série/Paralelo.....	74
6.4.2.	Estabilizador Série Com Amplificadores Operacionais.....	76
6.5.	Estabilizadores de Corrente.....	80
6.5.1.	Fonte de Corrente Constante.....	81
6.5.2.	Sorvedouro de Corrente Constante.....	82
7.	Multivibradores e Osciladores.....	83
7.1.	Multivibradores Astáveis.....	83
7.1.1.	Gerador de Onda Quadrada.....	83
7.1.2.	Gerador de Trem de Pulsos.....	84
7.1.3.	Oscilador Controlado por Tensão (VCO).....	85
7.2.	Multivibrador Monoestável.....	89
7.2.1.	Estado Estável.....	89
7.2.2.	Estado Instável.....	90
7.3.	Osciladores Senoidais.....	91
7.3.1.	Oscilador Por Deslocamento de Fase.....	91
7.3.2.	Oscilador Com Ponte de Wien.....	94
8.	Conversores e Moduladores.....	96
8.1.	Conversor A/D Por Aproximações Sucessivas.....	96
8.2.	Conversor D/A.....	98
8.3.	Modulador de Largura de Pulso (PWM).....	101
9.	Amplificadores de Áudio.....	104
9.1.	Controle de Tonalidade.....	105
9.1.1.	Controle de Graves.....	106
9.1.2.	Controle de Agudos.....	109
9.1.3.	Conclusão.....	112
9.2.	Expansor/Compressor de Áudio.....	112
9.3.	Filtro Passa-Faixa Paramétrico.....	115
9.3.1.	Girador.....	115
9.3.2.	Filtro.....	117
9.4.	Amplificador de Potência.....	119
10.	Tipos Alternativos de Amplificadores Operacionais.....	122
10.1	Amplificadores Operacionais Norton.....	122
10.1.1.	Amplificador Inversor.....	123
10.1.2.	Amplificador Não-Inversor.....	125
10.1.3.	Amplificador Para Foto-Diodo.....	125
10.1.4.	Gerador de Ondas Dente-de-Serra.....	126
10.2	Amplificadores Operacionais CFA.....	127
10.2.1	Amplificador Não-Inversor.....	128
10.2.2	Amplificador Inversor.....	131
10.2.3	Conclusões.....	132
10.3	Amplificadores Operacionais Totalmente Diferenciais.....	132
10.4	Amplificadores Operacionais de Transcondutância.....	134
10.4.1	Amplificador Inversor.....	135
10.4.2	Amplificador Não-Inversor.....	135

11. Invólucros	136
11.1 Amplificadores Operacionais Singelos.....	136
11.2 Amplificadores Operacionais Duplos.....	137
11.3 Amplificadores Operacionais Quádruplos.....	137
11.4 Comparadores.....	138
12. Arquiteturas Internas de Amplificadores Operacionais	140
12.1 Amplificadores Operacionais Norton.....	140
12.2 Amplificadores Operacionais OTA CMOS.....	142
12.3 Amplificadores Operacionais CFA.....	148
12.3.1 Análise em Malha Aberta.....	149
12.3.2 Análise em Malha Fechada.....	151
12.4 Amplificadores Operacionais VFA.....	152
12.4.1 Arquitetura Bipolar Básica.....	152
12.4.2 Arquitetura Bipolar Discretizada.....	155
12.4.3 Arquitetura Bi-FET Discretizada.....	160
12.4.4 Arquitetura Para Fonte Simples.....	162
12.4.5 Comparador.....	164
12.4.6 Arquitetura de Alta Velocidade.....	166
12.4.7 Arquitetura Totalmente Diferencial.....	169
12.5 Circuitos de Proteção.....	170
12.5.1 Proteção de Entradas.....	170
12.5.2 Proteção de Saídas.....	172
13. Bibliografia	175
13.1 Livros.....	175
13.2 Referências.....	175
13.3 Manuais.....	176