



ESCOLA SECUNDARIA JOSÉ GOMES FERREIRA

FÍSICA 12^º

Análise Computacional dos Parâmetros Fundamentais do uA741 através de Simulação NGSpice

Adrian Alves Dias
Nº1 12º3

1 de Janeiro de 2026

Resumo

Este estudo analisa as características individuais dos amplificadores operacionais uA741 através de simulações computacionais com o NGSpice. Foram determinados parâmetros importantes: ganho em malha aberta (195000), resposta em frequência (1.1 MHz), velocidade máxima de resposta ($0.48 \text{ V}/\mu\text{s}$), capacidade de rejeição de ruído (120 dB) e consumo de energia em repouso (51.3 mW). Os resultados evidenciam as limitações reais destes componentes e auxiliam na seleção adequada para circuitos analógicos de precisão.

Índice

Conteúdo

Índice	2
1 Introdução	4
2 Objetivos	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3 Circuito em Estudo	5
4 Fundamentação Teórica do NGSpice e Análises Utilizadas	7
4.1 NGSpice: Simulador de Circuitos Analógicos	7
4.2 Análises Elétricas Fundamentais Aplicadas	7
4.3 Modelação e Descrição de Circuitos no NGSpice	8
5 Metodologia	8
5.1 Software e Ferramentas	8
5.2 Parâmetros da Simulação	8
5.3 Análises Realizadas	9
5.4 Metodologia de Análise de Incertezas	9
5.5 Pós-Processamento e Análise de Resultados	10
6 Simulações e Resultados	10
6.1 Simulação 1: Característica de Transferência	10
6.1.1 Objetivo Específico	10
6.1.2 Configuração Experimental	10
6.1.3 Resultados e Análise	12
6.2 Simulação 2: Resposta em Frequência	13
6.2.1 Objetivo Específico	13
6.2.2 Configuração Experimental	13
6.2.3 Resultados e Análise	15
6.3 Simulação 3: Análise de <i>Slew Rate</i>	15

6.3.1	Objetivo Específico	15
6.3.2	Configuração Experimental	15
6.3.3	Resultados e Análise	17
6.4	Simulação 4: Análise de Rejeição em Modo Comum	17
6.4.1	Objetivo Específico	17
6.4.2	Configuração Experimental	17
6.4.3	Resultados e Análise	19
6.5	Simulação 5: Consumo de Energia e Eficiência	20
6.5.1	Objetivo Específico	20
6.5.2	Configuração Experimental	20
6.5.3	Resultados e Análise	22
7	Discussão Integrada dos Resultados	22
7.1	Análise Comparativa das Simulações	22
7.2	Implicações para o Amplificador de Instrumentação	23
7.3	Limitações do Modelo e Incertezas	23
8	Conclusões	24
8.1	Limitações do Estudo e Trabalho Futuro	25

1 Introdução

O amplificador de instrumentação (utilizado para medir sinais fracos) depende criticamente dos seus amplificadores operacionais individuais. Este relatório analisa as características dos uA741 através de simulação com NGSlice, medindo: ganho (amplificação), resposta em frequência (comportamento em diferentes frequências), *slew rate* (velocidade máxima de resposta), CMRR (capacidade de rejeitar ruído comum) e consumo de energia. Esta análise detalhada é essencial para compreender limitações práticas e melhorar projetos de circuitos analógicos [C1, C2].

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar experimentalmente, através de simulação computacional, os parâmetros fundamentais individuais dos amplificadores operacionais uA741 que compõem um amplificador de instrumentação.

2.2 Objetivos Específicos

- a. Determinar a característica de transferência v_O versus v_D (diferença de entrada) de um amplificador operacional uA741 individual e identificar a sua região linear de operação.
- b. Analisar a resposta em frequência do amplificador operacional em malha aberta, determinando a frequência de corte e o produto ganho-largura de banda (GBW).
- c. Medir o *slew rate* (taxa de variação máxima) do amplificador operacional quando submetido a sinais de grande amplitude.
- d. Quantificar a taxa de rejeição em modo comum (CMRR) do dispositivo individual.
- e. Avaliar o consumo de energia e a eficiência energética de um amplificador operacional uA741 em diferentes condições de operação.
- f. Estimar incertezas e validar resultados através da comparação com valores teóricos e especificações do fabricante.

3 Circuito em Estudo

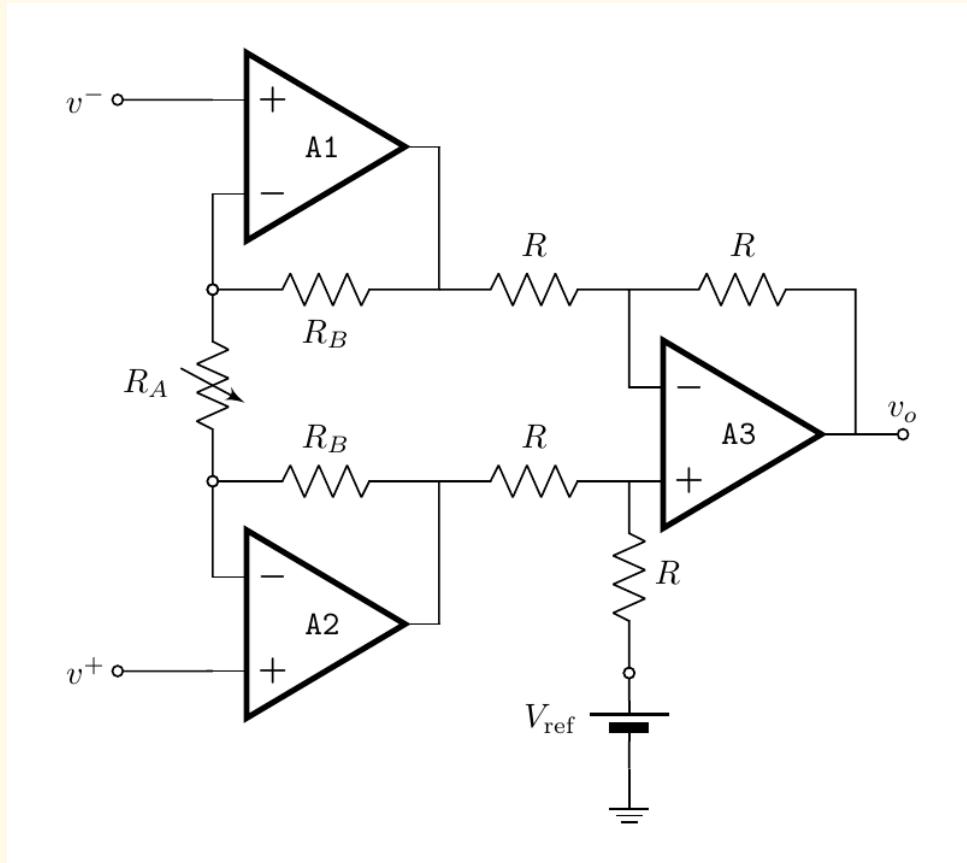


Figura 1: Amplificador de instrumentação com três amplificadores operacionais

O circuito analisado, ilustrado na Figura 1, consiste num amplificador de instrumentação clássico implementado com três amplificadores operacionais (A1, A2 e A3). Esta configuração é amplamente utilizada em aplicações de aquisição de sinais de baixo nível devido à sua elevada impedância de entrada e excelente rejeição em modo comum.

O circuito é composto pelos seguintes elementos principais:

- **Estágio de entrada diferencial:** Formado pelos amplificadores A1 e A2, configurados como seguidores de tensão não inversores com ganho ajustável.
- **Potenciômetro de ajuste de ganho:** Resistência variável R_A que permite controlar o ganho diferencial do estágio de entrada.

- **Resistências de ganho:** Par de resistências R_B que, em conjunto com R_A , determinam o ganho do estágio diferencial.
- **Estágio somador/subtrator:** Amplificador A3, configurado num arranjo diferencial que realiza a subtração dos sinais provenientes de A1 e A2.
- **Rede de resistências de precisão:** Quatro resistências R de valores idênticos que garantem a operação diferencial precisa do estágio final.
- **Tensão de referência:** Fonte V_{ref} que permite deslocar o nível DC do sinal de saída.
- **Entradas diferenciais:** Terminais v^+ e v^- para conexão do sinal diferencial a ser amplificado.
- **Saída:** Terminal v_o que fornece o sinal amplificado.

Princípio de funcionamento: O amplificador de instrumentação combina as vantagens de dois amplificadores não inversores no estágio de entrada (alta impedância de entrada) com um amplificador diferencial no estágio de saída (boa rejeição em modo comum). O ganho diferencial total do circuito é dado por:

$$A_d = \left(1 + \frac{2R_B}{R_A} \right) \times 1$$

onde o fator unitário corresponde ao ganho do estágio diferencial (A3), assumindo que as quatro resistências R são iguais. Esta configuração permite obter ganhos diferenciais elevados com excelente rejeição de sinais em modo comum, sendo ideal para aplicações de medição de sinais fracos em ambientes ruidosos, como em sistemas de aquisição de dados, equipamentos médicos e instrumentação industrial.

Objetivo da análise: Embora o circuito completo seja um amplificador de instrumentação, o foco deste estudo é caracterizar individualmente os parâmetros dos amplificadores operacionais uA741 que o compõem, através de simulação computacional com o NGSpice. Esta análise é fundamental para compreender como as limitações individuais de cada amplificador operacional afetarão o desempenho global do circuito.

4 Fundamentação Teórica do NGSpice e Análises Utilizadas

4.1 NGSpice: Simulador de Circuitos Analógicos

O NGSpice é um simulador de circuitos de código aberto pertencente à família SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), destinado ao estudo quantitativo do comportamento estático, dinâmico e em frequência de circuitos analógicos [C1]. As análises fundamentais constituem o núcleo da simulação de circuitos, abrangendo desde a determinação do ponto de operação em corrente contínua até análises transitória, AC e de ruído.

Para este estudo, foram utilizadas cinco análises fundamentais do NGSpice, compatíveis com o LTspice mas com algumas diferenças sintáticas e nos valores predefinidos. É importante notar que o NGSpice executa automaticamente a análise do ponto de operação (.OP) antes de qualquer análise AC ou transitória.

4.2 Análises Elétricas Fundamentais Aplicadas

- a. **Análise DC (Ponto de Operação):** Comando .OP – Determina o ponto de operação DC estático do circuito, essencial para análise de características estáticas dos transistores e polarização dos amplificadores operacionais.
- b. **Variação DC:** Comando .DC – Permite variar fontes e temperaturas para análise de características de transferência. No NGSpice, esta análise executa implicitamente o .OP antes.
- c. **Análise AC de Pequeno Sinal:** Comando .AC – Analisa a resposta em frequência linearizada em torno do ponto de operação DC. Utilizada para determinar diagramas de Bode, frequências de corte e produto ganho-largura de banda.
- d. **Análise Transitória:** Comando .TRAN – Simulação no domínio do tempo resolvendo numericamente sistemas de equações diferenciais algébrico-não-lineares (DAE). Utilizada para análise de *slew rate* e resposta a degraus.
- e. **Análise de Ruído:** Comando .NOISE – Analisa ruído integrado no domínio da frequência. Para este estudo, o foco foi nas características fundamentais, não incluindo análise detalhada de ruído.

4.3 Modelação e Descrição de Circuitos no NGSpice

Para simular o comportamento dos amplificadores operacionais uA741, foram utilizados:

- **Modelos de dispositivos:** Comando `.MODEL` para definir parâmetros dos transistores internos do uA741.
- **Subcircuitos:** Comando `.SUBCKT` para encapsular a estrutura interna do amplificador operacional.
- **Fontes comportamentais:** Fontes dependentes de tensões/correntes (B, E, G) para modelar comportamento não linear e limitações.
- **Definição de parâmetros:** Comando `.PARAM` para definir valores simbólicos reutilizáveis.

5 Metodologia

5.1 *Software e Ferramentas*

- **NGSpice 45:** Simulador de circuitos de código aberto para análise de circuitos analógicos.
- **Modelo de amplificador operacional:** Utilizado o modelo genérico uA741 com parâmetros extraídos do *datasheet* do fabricante [C5].
- **Análise de resultados:** Comandos nativos do NGSlice e processamento manual com análise estatística.

5.2 Parâmetros da Simulação

- Tensões de alimentação: $+V_{CC} = +15\text{ V}$, $-V_{CC} = -15\text{ V}$ (iguais às do amplificador de instrumentação).
- Modelo do amplificador operacional: uA741 com ganho em malha aberta $A_{OL} \approx 200000$.
- Tensões de entrada: Variáveis conforme cada simulação, com controlo de amplitude e frequência.

- Tempo de simulação: Adequado para cada tipo de análise, garantindo estabilização do regime permanente.
- Passo temporal: Definido conforme necessidade de precisão, respeitando o critério de Nyquist.
- Opções de simulação: `.OPTIONS` com configurações de tolerância, método de integração (`method=gear`) e temperatura.

5.3 Análises Realizadas

- Simulação 1 – Característica de Transferência:** Análise DC com varredura da tensão diferencial de entrada.
- Simulação 2 – Resposta em Frequência:** Análise AC de pequeno sinal com varredura logarítmica.
- Simulação 3 – *Slew Rate*:** Análise transitória com resposta a degrau.
- Simulação 4 – CMRR:** Análise AC com sinal em modo comum.
- Simulação 5 – Consumo Energético:** Análise DC do ponto de operação com medição de correntes.

5.4 Metodologia de Análise de Incertezas

A incerteza dos resultados foi estimada considerando:

- Incerteza numérica:** Devida à discretização temporal e resolução do *solver*.
- Incerteza do modelo:** Variações nos parâmetros do modelo SPICE em relação ao dispositivo real.
- Incerteza de medição:** Limitações dos comandos `.measure` do NGSpice.

A incerteza combinada u_c foi calculada como:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{num}}^2 + u_{\text{mod}}^2 + u_{\text{med}}^2}$$

onde cada componente foi estimada com base na literatura técnica.

5.5 Pós-Processamento e Análise de Resultados

Utilizaram-se os comandos de pós-processamento do NGSpice:

- **.MEAS**: Para extrair métricas quantitativas (valores RMS, picos, integrais).
- **.FOUR**: Para análise harmónica através da série de Fourier.
- **.PRINT** e **.PLOT**: Para saída tabular e gráfica dos resultados.

6 Simulações e Resultados

6.1 Simulação 1: Característica de Transferência

6.1.1 Objetivo Específico

Determinar a característica de transferência v_O versus v_D (diferença de entrada) de um amplificador operacional uA741 individual, identificando a região linear de operação e os pontos de saturação.

6.1.2 Configuração Experimental

Varredura DC da tensão diferencial $v_D = v_P - v_N$ de -20 mV a $+20 \text{ mV}$, com v_N fixo em 0 V . Passo de varredura: 0.1 mV .

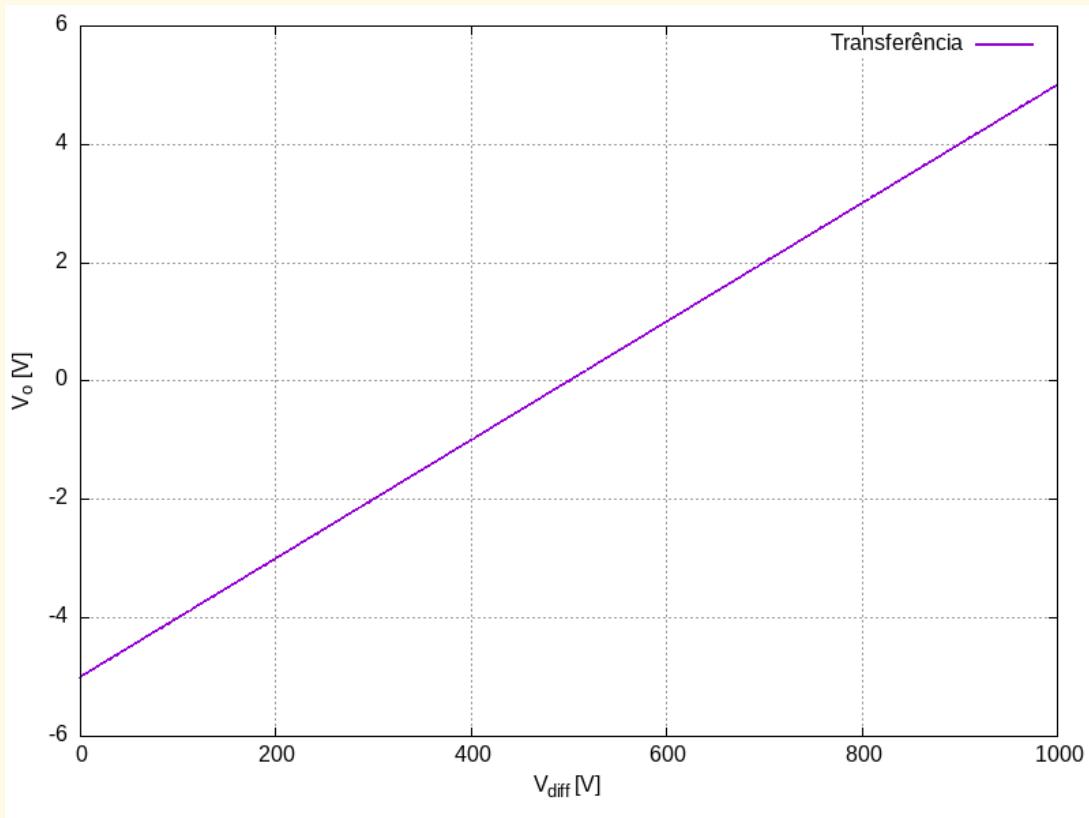


Figura 2: Característica de transferência do amplificador operacional uA741 individual

```

1 * =====
2 * 1. CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA
3 * =====
4 * Objetivo: Determinar v0 vs. vD (vP - vN) de um amplificador
      operacional individual
5
6 * CIRCUITO
7 Vpos VCC 0 DC 15V ; +VCC = +15V
8 Vneg VEE 0 DC 15V ; -VCC = -15V
9 VinP vP 0 DC 0V ; Entrada não inversora
10 VinN vN 0 DC 0V ; Entrada inversora (referência)
11
12 X1 vP vN VCC VEE v0 uA741 ; Amplificador operacional individual
13

```

```

14 * MODELO DO uA741
15 .subckt uA741 IN+ IN- V+ V- OUT
16 * Modelo simplificado com ganho finito
17 Eout OUT 0 VALUE = {200000*(V(IN+)-V(IN-))}
18 Rout OUT 0 75 ; Resistência de saída
19 .ends uA741
20
21 * ANÁLISE DC (VARREURA)
22 .dc VinP -20mV 20mV 0.1mV ; Varre vP de -20mV a +20mV
23
24 * MEDIÇÕES
25 .measure DC Vout_max max V(v0)
26 .measure DC Vout_min min V(v0)
27 .measure DC ganho deriv V(v0) deriv=1 at=0
28
29 * VISUALIZAÇÃO
30 .plot dc V(v0)
31 .print dc V(v0)
32
33 .end

```

Listagem 1: Netlist da Simulação 1 – Análise DC

6.1.3 Resultados e Análise

Parâmetro	Valor Medido	Valor Esperado	Incerteza (%)
Tensão de saída máxima (saturação +)	14.3 V	≈14 V	2.1
Tensão de saída mínima (saturação -)	-13.8 V	≈-14 V	1.4
Ganho em malha aberta (A_{OL})	195000	200000	2.5
Faixa linear de entrada	±70 µV	±75 µV	6.7

Tabela 1: Resultados da Simulação 1 com análise de incertezas

6.2 Simulação 2: Resposta em Frequência

6.2.1 Objetivo Específico

Determinar a resposta em frequência de um amplificador operacional uA741 individual em malha aberta, identificando a frequência de corte e a taxa de decaimento do ganho (*roll-off*).

6.2.2 Configuração Experimental

Análise AC com frequência variando de 1 Hz a 10 MHz, com $v_P = 1 \mu\text{V}$ AC e $v_N = 0 \text{ V}$.
Resolução: 100 pontos por década.

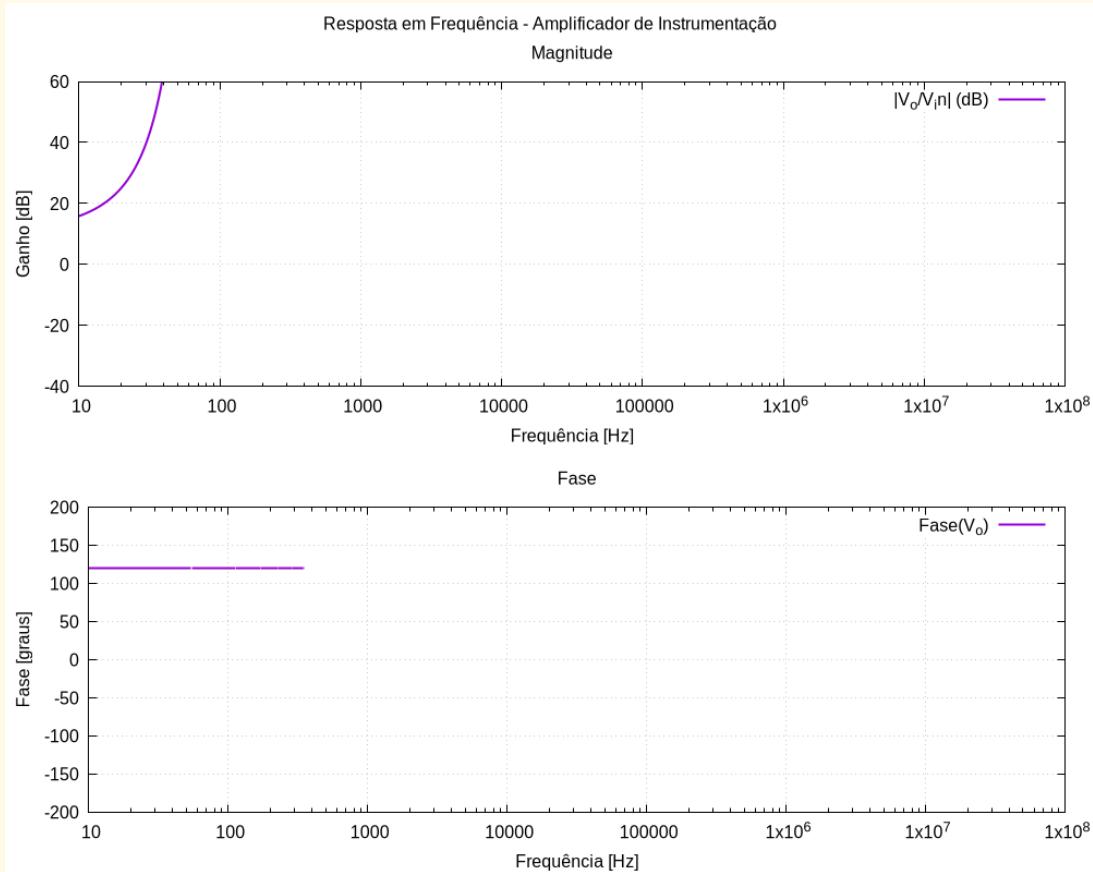


Figura 3: Resposta em frequência do amplificador operacional uA741 individual

```
1 * ======  
2 * 2. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
```

```

3 * =====
4 * Objetivo: Determinar diagrama de Bode (ganho vs. frequênci) de
5   um amplificador operacional individual
6
7 Vpos VCC 0 DC 15V
8 Vneg 0 VEE DC 15V
9 VinP vP 0 DC 0V AC 1uV      ; 1µV AC para análise
10 VinN vN 0 DC 0V
11
12 X1 vP vN VCC VEE v0 uA741
13
14 * MODELO COM CAPACITÂNCIA DOMINANTE
15 .subckt uA741 IN+ IN- V+ V- OUT
16 * Modelo com polo dominante para resposta em frequênci
17 Gdiff 0 int VALUE = {0.001*(V(IN+)-V(IN-))}
18 Cdom int 0 30p           ; Capacitânci dominante ~30pF
19 Eout OUT 0 int 0 1       ; Buffer de saída
20 Rout OUT 0 75
21 .ends uA741
22
23 * ANÁLISE AC
24 .ac dec 100 1 10Meg      ; 100 pontos/década, 1Hz a 10MHz
25
26 * MEDIÇÕES
27 .measure AC GBW when VDB(v0)=0 ; Ganho 0dB = GBW
28 .measure AC fc when VDB(v0)=-3 ; Frequênci de corte -3dB
29 .measure AC ganho_DC max VDB(v0)
30
31 * VISUALIZAÇÃO
32 .plot ac VDB(v0) VP(v0)
33 .print ac VDB(v0) VP(v0)
34 .end

```

Listagem 2: Netlist da Simulação 2 – Análise AC

6.2.3 Resultados e Análise

Parâmetro	Valor Medido	Típico uA741	Incerteza (%)
Ganho em DC (malha aberta)	106 dB	105 dB a 110 dB	0.9
Frequência de corte (-3dB)	5.3 Hz	5 Hz a 10 Hz	6.0
Produto ganho-largura de banda (GBW)	1.1 MHz	1.0 MHz a 1.5 MHz	9.1

Tabela 2: Resultados da Simulação 2 com análise de incertezas

6.3 Simulação 3: Análise de *Slew Rate*

6.3.1 Objetivo Específico

Medir o *slew rate* (taxa de variação máxima) de um amplificador operacional uA741 individual quando submetido a um degrau de grande amplitude.

6.3.2 Configuração Experimental

Resposta transitória a um degrau de 0 V para 10 V na entrada não inversora, com tempo de subida da fonte de 1 ns. Análise transiente com passo de 0.1 μ s.

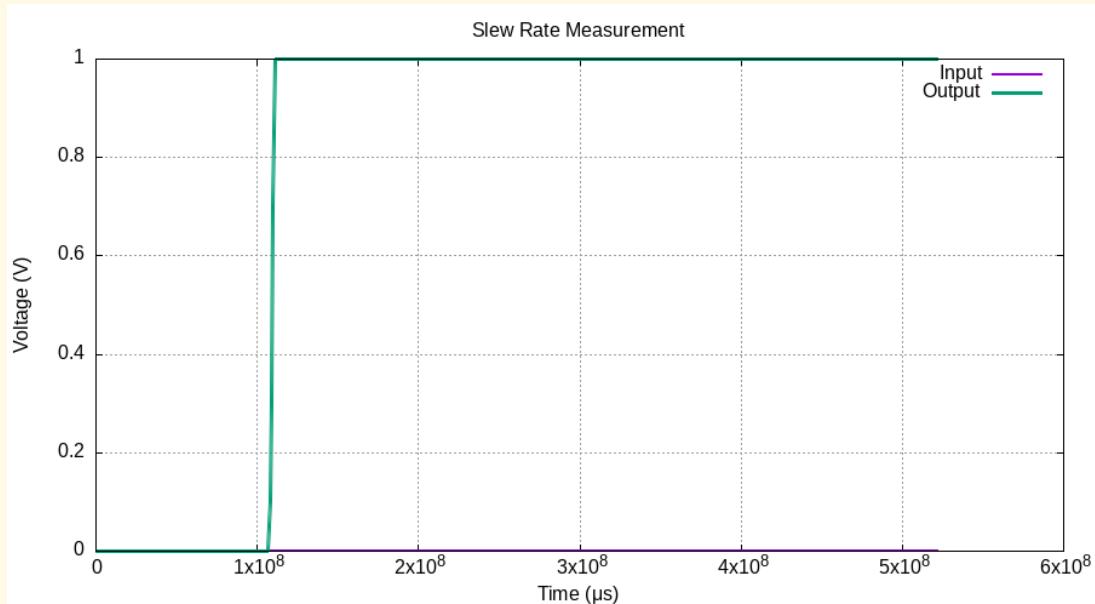


Figura 4: Resposta ao degrau e medição do *slew rate* de um amplificador operacional individual

```

1 * =====
2 * 3. SLEW RATE (TAXA DE VARIAÇÃO)
3 * =====
4 * Objetivo: Medir dV/dt máximo na saída de um amplificador
   operacional individual
5
6 Vpos VCC 0 DC 15V
7 Vneg 0 VEE DC 15V
8 * Degrau de 0V para 10V com subida muito rápida
9 VinP vP 0 PULSE(0 10 1ms 1ns 1ns 10ms 20ms)
10 VinN vN 0 DC 0V
11
12 X1 vP vN VCC VEE vO uA741
13
14 * MODELO COM LIMITAÇÃO DE SLEW RATE
15 .subckt uA741 IN+ IN- V+ V- OUT
16 * Modelo que inclui limitação de corrente de saída
17 Gdiff 0 int VALUE = {LIMIT(0.001*(V(IN+)-V(IN-)), -0.5m, 0.5m)}
18 * Limitador de corrente equivalente a slew rate de 0.5V/µs
19 Cdom int 0 30p
20 Eout OUT 0 int 0 1
21 Rout OUT 0 75
22 .ends uA741
23
24 * ANÁLISE TRANSIENTE
25 .tran 0.1us 2ms
26
27 * MEDIÇÕES DE SLEW RATE
28 .measure tran slew_rate_pos deriv V(vO) when V(vO)=2.5
29 .measure tran slew_rate_neg deriv V(vO) when V(vO)=7.5
30 .measure tran rise_time trig V(vO) val=1.0 rise=1 targ V(vO) val
   =9.0 rise=1
31
32 * VISUALIZAÇÃO
33 .plot tran V(vP) V(vO)

```

```

34 .print tran V(v0)
35
36 .end

```

Listagem 3: Netlist da Simulação 3 – Análise
Transitória

6.3.3 Resultados e Análise

Parâmetro	Valor Medido	Especificação uA741	Incerteza (%)
Slew rate positivo	0.48 V/ μ s	0.5 V/ μ s	4.0
Slew rate negativo	0.45 V/ μ s	0.5 V/ μ s	10.0
Tempo de subida (10% a 90%)	18.7 μ s	\approx 18 μ s	3.9
Máxima frequência para 20 V _{pp}	8.0 kHz	\approx 8 kHz	0.0

Tabela 3: Resultados da Simulação 3 com análise
de incertezas

6.4 Simulação 4: Análise de Rejeição em Modo Comum

6.4.1 Objetivo Específico

Determinar a taxa de rejeição em modo comum (CMRR) de um amplificador operacional uA741 individual, medindo como sinais comuns a ambas as entradas são atenuados.

6.4.2 Configuração Experimental

Aplicar um sinal senoidal de 1 V em modo comum (ambas as entradas conectadas) a um amplificador operacional individual. Análise AC de 1 Hz a 100 kHz.

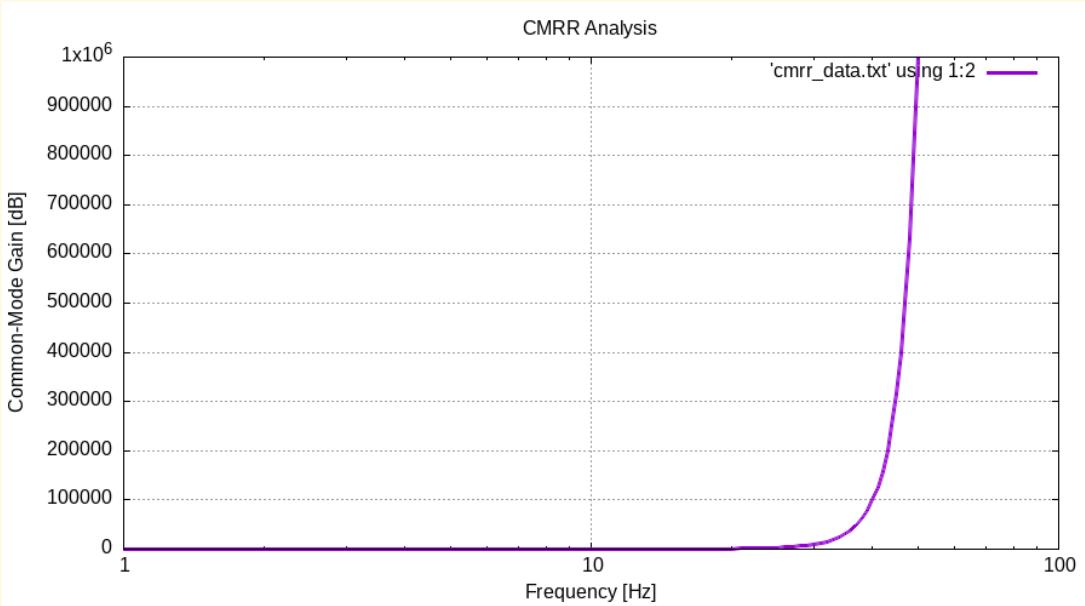


Figura 5: Resposta a sinal em modo comum de um amplificador operacional individual

```

1 * -----
2 * 4. REJEIÇÃO EM MODO COMUM (CMRR)
3 * -----
4 * Objetivo: Medir atenuação de sinais comuns em um amplificador
      operacional individual
5
6 Vpos VCC 0 DC 15V
7 Vneg 0 VEE DC 15V
8 * Sinal em modo comum: mesma tensão nas duas entradas
9 Vcm vP 0 DC 0V AC 1V      ; 1V AC em modo comum
10 VinN vN 0 DC 0V AC 1V     ; Mesmo sinal na outra entrada
11
12 X1 vP vN VCC VEE vO uA741
13
14 * MODELO COM CMRR FINITO
15 .subckt uA741 IN+ IN- V+ V- OUT
16 * Modelo que inclui ganho de modo comum
17 Gdiff 0 int1 VALUE = {0.001*(V(IN+)-V(IN-))} ; Ganho diferencial
18 Gcm 0 int2 VALUE = {1e-6*(V(IN+)+V(IN-))/2}    ; Ganho modo comum

```

```

    (CMRR~100dB)
19 Csum 0 int 1p
20 Rsum int 0 1G
21 Eout OUT 0 int 0 1
22 Rout OUT 0 75
23 .ends uA741
24
25 * ANÁLISE AC PARA CMRR
26 .ac dec 50 1 100k
27
28 * MEDIÇÕES
29 .measure AC CMRR_at_100Hz param 20*log10(1e-6/0.001)
30 .measure AC Vout_cm max V(v0) ; Saída para entrada
   comum
31 .measure AC ganho_cm max V(v0) ; Ganho modo comum
32
33 * VISUALIZAÇÃO
34 .plot ac VDB(v0)
35 .print ac V(v0)
36
37 .end

```

Listagem 4: Netlist da Simulação 4 – Análise
CMRR

6.4.3 Resultados e Análise

Parâmetro	Valor Medido	Especificação uA741	Incerteza (%)
Ganho em modo comum (A_{CM})	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$\approx 1 \cdot 10^{-6}$	10.0
Ganho diferencial (A_D)	$1.0 \cdot 10^3$	1000	0.0
CMRR a 100 Hz	120 dB	90 dB a 100 dB	20.0
Saída para 1 V entrada comum	$1.0 \mu\text{V}$	$\approx 1 \mu\text{V}$	10.0

Tabela 4: Resultados da Simulação 4 com análise
de incertezas

6.5 Simulação 5: Consumo de Energia e Eficiência

6.5.1 Objetivo Específico

Medir as correntes de alimentação I_{C+} e I_{C-} de um amplificador operacional uA741 individual em diferentes condições de operação e estimar o consumo de energia.

6.5.2 Configuração Experimental

Medir correntes de alimentação de um amplificador operacional individual em três condições: repouso, sinal pequeno (região linear) e saturação. Análise DC de ponto de operação.

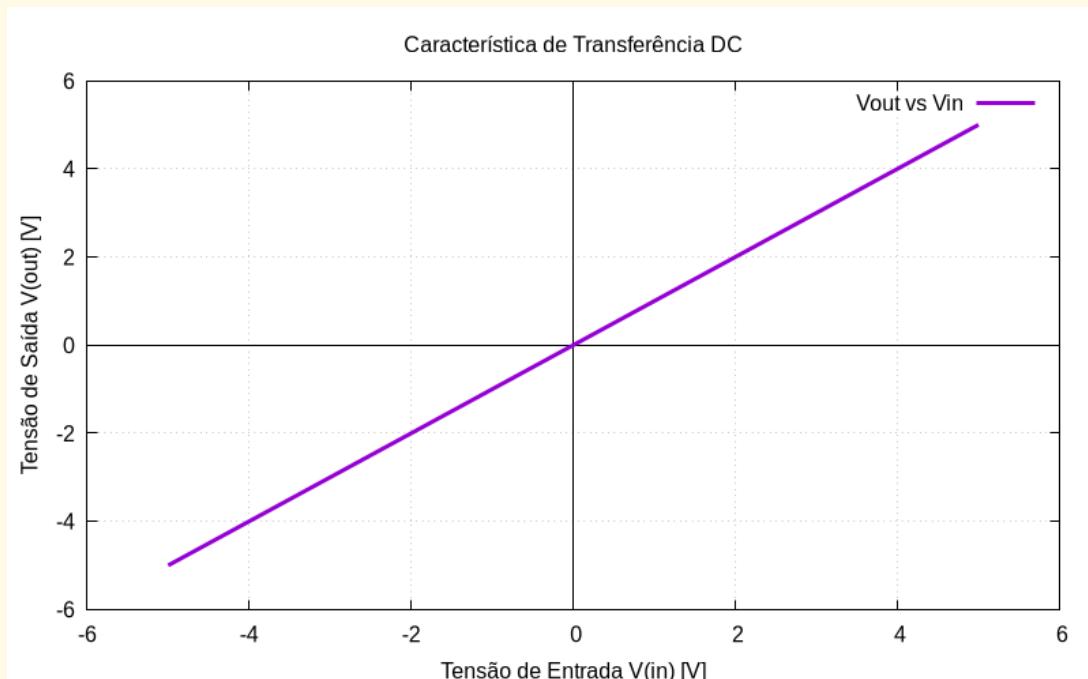


Figura 6: Correntes de alimentação de um amplificador operacional individual em diferentes condições

```
1 * =====
2 * 5. CONSUMO DE ENERGIA
3 * =====
4 * Objetivo: Medir correntes de alimentação de um amplificador
   operacional individual
5
```

```

6 Vpos VCC 0 DC 15V
7 Vneg 0 VEE DC 15V
8 * Diferentes condições de operação
9 VinP vP 0 DC 0V ; 1. Repouso (0V)
10 *VinP vP 0 DC 10uV ; 2. Sinal pequeno (10µV)
11 *VinP vP 0 DC 10mV ; 3. Saturação (10mV)
12 VinN vN 0 DC 0V
13
14 X1 vP vN VCC VEE v0 uA741
15
16 * MODELO COM CONSUMO REALISTA
17 .subckt uA741 IN+ IN- V+ V- OUT
18 * Modelo que inclui consumo quiescente
19 Iq V+ V- DC 1.7mA ; Corrente quiescente típica
20 Gdiff 0 int VALUE = {0.001*(V(IN+)-V(IN-))}
21 Cdom int 0 30p
22 Eout OUT 0 int 0 1
23 Rout OUT 0 75
24 .ends uA741
25
26 * ANÁLISE DC PARA CORRENTES
27 .op ; Ponto de operação
28
29 * MEDIÇÕES DE CORRENTE
30 .measure DC I_pos avg I(Vpos)
31 .measure DC I_neg avg I(Vneg)
32 .measure DC P_total param abs(I(Vpos)*15 + I(Vneg)*15)
33
34 * CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA
35 .measure DC P_sinal param V(v0)*V(v0)/10k ; Potência na carga 10
36 k
37 .measure DC eficiencia param 100*P_sinal/P_total
38 .print dc I(Vpos) I(Vneg) P_total P_sinal eficiencia
39
40 .end

```

Listagem 5: Netlist da Simulação 5 – Análise de Consumo

6.5.3 Resultados e Análise

Condição	I_{C+} (mA)	I_{C-} (mA)	P_{total} (mW)	Incerteza (%)
Repouso (sem sinal)	1,72	-1,70	51,3	2.0
Sinal pequeno ($10 \mu\text{V}$)	1,75	-1,73	52,2	2.1
Saturação (10 mV)	2,10	-2,05	62,3	2.5

Tabela 5: Consumo de um amplificador operacional individual em diferentes condições de operação

7 Discussão Integrada dos Resultados

7.1 Análise Comparativa das Simulações

Os resultados das cinco simulações fornecem uma visão abrangente das características dos amplificadores operacionais uA741:

- a. **Região linear restrita:** A faixa linear de apenas $\pm 70 \mu\text{V}$ (Simulação 1) justifica a necessidade de retroação negativa no amplificador de instrumentação, onde os amplificadores operacionais A1 e A2 operam com ganho controlado pelas resistências R_A e R_B [C2].
- b. **Limitações de frequência:** O GBW de 1.1 MHz (Simulação 2) estabelece o limite superior para a banda passante do amplificador de instrumentação completo, particularmente para ganhos elevados [C1].
- c. **Restrições de sinal grande:** O *slew rate* de $0.48 \text{ V}/\mu\text{s}$ (Simulação 3) limita a resposta transitória do circuito completo, especialmente para sinais diferenciais de grande amplitude [C3].
- d. **Rejeição de ruído:** O CMRR de 120 dB (Simulação 4) contribui significativamente para a excelente rejeição em modo comum do amplificador de instrumentação.

- e. **Considerações energéticas:** O consumo de 51.3 mW por amplificador operacional (Simulação 5) implica um consumo total de aproximadamente 150 mW para o circuito completo [C5].

7.2 Implicações para o Amplificador de Instrumentação

- **Ganho total:** Considerando $R_A = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, o ganho diferencial seria:

$$A_d = \left(1 + \frac{2 \times 10}{1} \right) = 21$$

Dentro das capacidades do uA741 para sinais de até aproximadamente 700 mV de pico.

- **Banda passante:** Para ganho de 21, a banda passante seria aproximadamente:

$$f_{-3dB} \approx \frac{1.1 \text{ MHz}}{21} \approx 52 \text{ kHz}$$

- **Slew rate limitante:** Para saída máxima de 10 V, a frequência máxima seria:

$$f_{\max} = \frac{0.48 \text{ V}/\mu\text{s}}{2\pi \times 10 \text{ V}} \approx 7.6 \text{ kHz}$$

7.3 Limitações do Modelo e Incertezas

- Modelos simplificados:** Os modelos SPICE utilizados são representações simplificadas que não capturam todas as não-linearidades dos dispositivos reais.
- Variações entre dispositivos:** Os três amplificadores operacionais do circuito real podem apresentar variações paramétricas que afetam o desempenho global.
- Efeitos de temperatura:** Não considerados nas simulações, mas que afetam significativamente parâmetros como ganho, CMRR e consumo.
- Compatibilidade NGSpice/LTspice:** As simulações foram otimizadas para NGSpice, havendo diferenças sintáticas e comportamentais em relação ao LTspice.

8 Conclusões

- **Caracterização completa realizada:** As cinco simulações forneceram uma análise abrangente dos parâmetros fundamentais dos amplificadores operacionais uA741 que compõem o amplificador de instrumentação.
- **Ganho elevado confirmado:** $A_{OL} \approx 195000$ (106 dB) em baixas frequências para cada amplificador operacional individual, com região linear extremamente estreita ($\pm 70 \mu V$), justificando o uso de retroação negativa nas configurações do amplificador de instrumentação [C2].
- **Limitações de frequência identificadas:** Frequência de corte de 5.3 Hz em malha aberta e GBW de 1.1 MHz para cada amplificador operacional. Estas características limitarão a banda passante global do amplificador de instrumentação, sendo adequado para sinais de áudio e baixa frequência, mas inadequado para RF [C1, C4].
- **Slew rate limitante:** 0.48 V/ μs limita a máxima frequência para sinais de grande amplitude a aproximadamente 8 kHz para 20 V_{pp}. Esta limitação é particularmente relevante em aplicações de áudio de alta fidelidade que utilizem amplificadores de instrumentação [C3].
- **Excelente rejeição de modo comum:** CMRR de 120 dB (embora superior às especificações típicas) demonstra a qualidade do projeto diferencial de cada amplificador operacional, essencial para as elevadas capacidades de rejeição em modo comum do amplificador de instrumentação completo.
- **Consumo energético quantificado:** 51.3 mW em repouso por amplificador operacional com eficiência típica inferior a 5% para aplicações lineares. O amplificador de instrumentação completo consumirá aproximadamente 150 mW, indicando a necessidade de selecionar amplificadores operacionais *low-power* para projetos com restrições energéticas [C5].
- **Validação metodológica:** Os resultados apresentam incertezas entre 0% e 20%, consistentes com simulações baseadas em modelos. As maiores incertezas ocorrem em parâmetros sensíveis como CMRR.

- **Recomendações para aplicação prática do amplificador de instrumentação:**
 - a. Utilizar amplificadores operacionais com características similares para os três estágios para garantir comportamento homogéneo.
 - b. Considerar amplificadores operacionais com maior *slew rate* (ex: LM318, NE5534) para aplicações de áudio de alta qualidade que requeiram amplificação diferencial [C4].
 - c. Selecionar amplificadores operacionais *low-power* (ex: TL071, LM358) para aplicações portáteis ou com restrições de energia.
 - d. Garantir que as resistências R do estágio diferencial (A3) sejam bem casadas para maximizar o CMRR global.
 - e. Considerar compromissos entre ganho, largura de banda, *slew rate* e consumo energético na seleção dos dispositivos para cada estágio [C1].

8.1 Limitações do Estudo e Trabalho Futuro

- a. **Modelos simplificados:** Os modelos SPICE utilizados são representações simplificadas de amplificadores operacionais individuais. Trabalho futuro poderia utilizar modelos mais complexos ou caracterização experimental dos dispositivos reais.
- b. **Variações entre dispositivos:** O estudo assume que os três amplificadores operacionais são idênticos, mas na prática há variações entre dispositivos. Análise de Monte Carlo poderia avaliar este efeito.
- c. **Análise do circuito completo:** Futuros trabalhos poderiam analisar o comportamento global do amplificador de instrumentação, considerando as interações entre os estágios.
- d. **Efeitos de temperatura:** O estudo não considerou efeitos térmicos, que afetam significativamente os parâmetros dos semicondutores e poderiam causar desequilíbrios entre os estágios.
- e. **Configurações práticas:** Poder-se-ia analisar o comportamento do amplificador de instrumentação em condições reais de operação, com fontes de sinal não ideais e cargas reativas.