



Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Eletrônica

**Laboratório de Controle e Automação I**

## Instrumentação

# Medição de Nível de Água com Sensor Piezoresistivo Amplificado

Prof. José Carlos Rodrigues de Oliveira

Belo Horizonte, maio de 2007.

# Medição de Nível de Água com Sensor Piezoresistivo Amplificado

Prof. José Carlos R. de Oliveira, Dr.  
Departamento de Engenharia Eletrônica – EE/UFMG

## PREPARAÇÃO

1. **Ler o Tutorial** sobre Sensores Piezoresistivos de Pressão (Apêndice A).
2. **Discutir o fenômeno** em que se baseia o funcionamento desse sensor.
3. **Ler os “data sheet” do sensor 186PC03DT e do Amplificador Operacional** quádruplo TL074 (Apêndice B).
4. **Sensor de Nível**

É constituído pelo elemento piezoresistivo de pressão Honeywell 186PC03DT, com faixa de trabalho (“range”) de +/- 2,5 psi (libra-força por polegada ao quadrado), contendo uma Ponte de Wheatstone, amplificação e off-set internos pré-ajustados. O datasheet do componente informa, ainda, que o sensor pode operar com uma de suas portas em ambiente úmido.

A Figura 1 apresenta o lay-out da montagem experimental, contendo um tubo de PVC e conexões hidráulicas, o sensor de pressão e o circuito de conformação. A alimentação de água se faz pelo funil superior, e o esgotamento pelo registro de descarga na extremidade inferior do tubo.

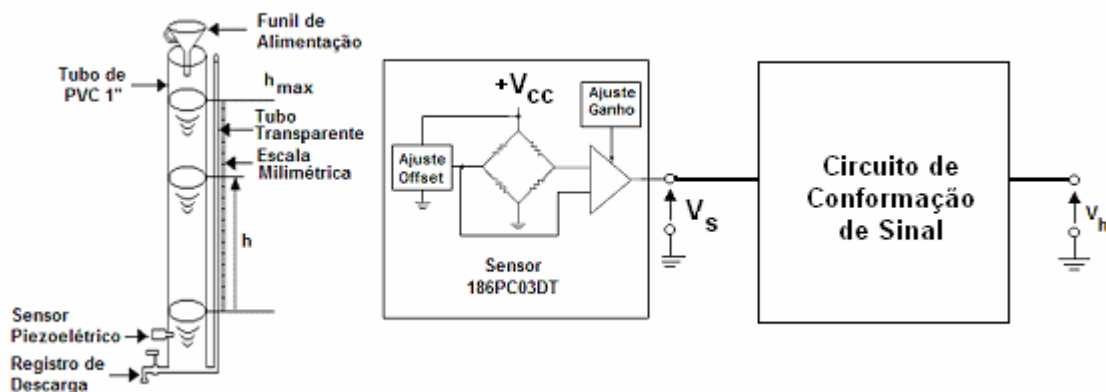


Figura 1: Lay-out da montagem experimental da coluna d'água.

Sabe-se que:

$$1,000 \text{ MCA} \equiv 1,4223 \text{ psi}$$

onde **MCA** é uma unidade de pressão e significa "metro de coluna d'água". No caso da montagem usada no Laboratório,  $h_{MAX} = 1,500m$ . Como uma das portas do sensor está conectada à atmosfera, determinar a maior pressão que será aplicada ao

sensor, situado na parte inferior do tubo. Ela corresponde a qual percentual da variação total do sensor (“span”)? Calcular também a altura máxima de água capaz de ser medida com o sensor utilizado.

Como o tubo de PVC é opaco, foi colocada uma mangueira transparente junto a ele, ao lado de uma fita com escala milimétrica. Esse arranjo, além de mostrar claramente o nível da água, tem por objetivo proporcionar a calibração estática do transdutor.

## 5. Conformação do sinal do Sensor de Pressão.

A Figura 2 apresenta o circuito para a conformação do sinal  $V_S$  proveniente do sensor.

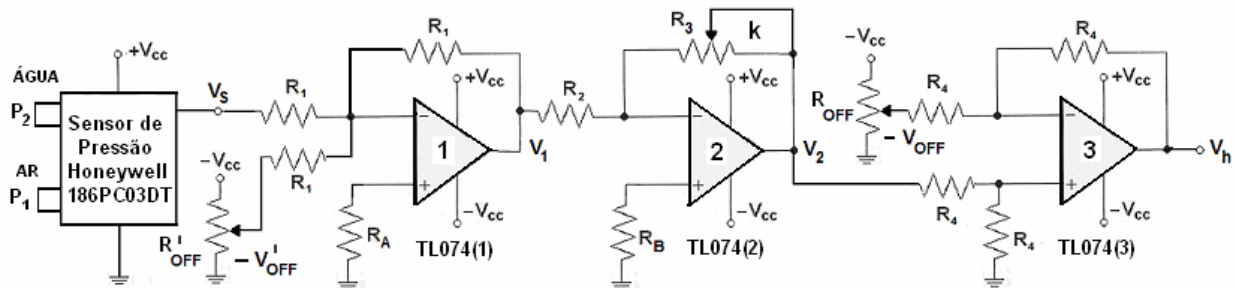


Figura 2: Circuito de conformação do transdutor de nível.

Colocando-se o ajuste do ganho  $k$  (Amp. Op. 2) antes do ajuste de off-set  $V_{OFF}$  (Amp. Op. 3, para deslocamento da curva do transdutor), tem-se:

$$V_h = V_2 + V_{OFF} = -k.V_1 + V_{OFF} = k.V_S + V_{OFF}$$

A expressão acima só tem sentido se o pré-ajuste de off-set em  $V'_{OFF}$  tiver sido feito logo após a saída do sensor, destinando-se apenas a trazer a tensão  $V_1$  para zero quando o nível for considerado nulo. Isto não acontece automaticamente, porque o sensor já tem embutidos seus ajustes de pressão zero e de pressão máxima (dependentes da tensão de alimentação  $V_{CC}$  do sensor), sem que neles se possa atuar, e porque o nível  $h = 0,000\text{m}$  foi definido arbitrariamente.

**Desafio:** supor a troca de posição dos Amp. Ops. 2 e 3 e seus respectivos resistores e mostrar analiticamente que o ajuste de ganho afeta o de off-set .

## PARTE EXPERIMENTAL

### Calibração Estática do Transdutor de Nível.

1. Para fazer o **pré-ajuste de “zero”**, colocar um pouco de água no tubo, até que o nível  $h$  coincida com o início (zero) da escala milimétrica. Em seguida, atuar no trimpot  $R''_{OFF}$ , de forma que a tensão  $V_1$  à saída do amplificador operacional 1 seja de 0,00 Volt.

- Encher o tubo com água até o final da escala milimétrica ( $h = 1,500$  m). Caso necessário, inserir um fio de cobre flexível através da mangueira transparente, movimentando-o para retirar bolhas de ar, as quais interferem na leitura da escala milimétrica. Proceder ao **ajuste de “fundo de escala”**, atuando no trimpot de ganho  $R_3$  para obter  $V_2$  igual a 4,00 Volts:

$$k = \frac{R_3}{R_2}$$

- Trazer novamente o nível  $h$  para o início da escala, esgotando a água pelo registro inferior, e proceder ao **ajuste de “zero vivo”**, introduzindo a tensão  $V_{OFF}$  do trimpot  $R_{OFF}$ , para que a tensão  $V_h$  de saída do transdutor corresponda a 1,00 Volt. Por fim, enchendo o tubo até  $h = 1,500$  m, checar o valor de fundo de escala, que deverá indicar 5,00 V. Dessa forma, a variação de 0,000 a 1,500 m no nível de água do tubo passará a corresponder à variação de 1,00 a 5,00 Volt na saída do transdutor, sendo esta uma das faixas usadas para instrumentação industrial. Anotar as características do multímetro digital utilizado.
- Com o tubo inicialmente cheio**, levantar os pontos ( $V_h \times h$ ) da **Característica Estática de Descida do Transdutor**. Trabalhar com intervalos de 5,0 cm, esgotando aos poucos a água até o nível  $h = 0$ . Com auxílio do Matlab, plotar  $V_h$  versus  $h$  (nível em metros) obtendo, assim, a característica de transferência do transdutor. Não ligar esses pontos, plotando-os com “\*” (asterisco).
- Fazer uma **regressão linear** nesses pontos experimentais. Obtida a reta correspondente, o ganho do transdutor será dado por:

$$k_N = \frac{\text{Variação.na..Tensão..}V_h}{\text{Variação.na..Altura..}h}$$

Ter-se-á, então, para o transdutor:

$$V_h = k_N \cdot h + V_{OFF}$$

- Calcular o erro de linearidade do transdutor, plotando-o em função da altura. Para cada  $h$ , esse erro (em percentual) é igual à diferença entre o valor medido e o valor calculado pelo modelo, dividida pela variação total projetada para o sensor (“span”), vezes 100. Determinar seu valor absoluto máximo.

Obs.: a equação anterior difere daquela deduzida a partir da Figura 2 porque agora aparece  $k_N$  no lugar de  $k$ , e  $h$  no lugar de  $V_s$ . Se o erro calculado e plotado for pequeno, tanto o sensor de pressão quanto o circuito conformador (a menos do off-set) possuirão boa linearidade.

- Para obter a **Característica Estática de Subida do Transdutor**, repetir os procedimentos dos itens 4, 5 e 6, mas agora enchendo o tubo por cima, de  $h = 0,000$  m até  $h = 1,500$  m, a cada 5,0 cm, mantendo o registro inferior fechado.

8. Determinar uma eventual histerese no sensor de nível, plotando no mesmo gráfico (com caracteres e cores diferentes) os pontos experimentais de descida e de subida, assim como suas respectivas retas de regressão. Dar “zooms” em torno de  $h = 0$ , no meio e no final da faixa. Ela é significativa? Compará-la com o erro de linearização e tirar conclusões.
9. Existe ruído na saída  $V_h$  do transdutor? Observar isso com um osciloscópio. Caso afirmativo, medir sua amplitude e frequência e projetar um filtro passa-baixa tipo Butterworth, de segunda ordem para atenuar o ruído 100 vezes. Sugestão: aproveitar o amplificador operacional TL074(4) do chip usado no transdutor e desenhar o filtro no circuito da Figura 2.

## Comportamento Dinâmico.

### 1. Primeiro método de modelagem:

- Inicialmente, com o ponto de operação definido pelo nível  $h_1 = 1,000m$ , abrir e fechar rapidamente o registro de descarga, para que o nível atinja a marca de aproximadamente 90,0 cm. Anotar o valor final do nível  $h$ . Observar, com o auxílio de um osciloscópio digital, o comportamento dinâmico do transdutor. Esse procedimento corresponde a qual tipo de entrada?
- Repetir esse procedimento de descarga, agora a partir de um novo ponto de operação, dado por  $h_2 = 0,500m$ , e nível final de aproximadamente 40,0 cm.
- Para cada uma das duas curvas de resposta obtidas, **modelar o transdutor de nível** utilizando um método quantitativo conhecido. Foi registrado algum comportamento intempestivo na saída do transdutor? Caso afirmativo, explicar fisicamente o(s) fenômeno(s) ocorrido(s) durante o transitório de variação de pressão.
- **Validar o(s) modelo(o)**, simulando no MATLAB, para as mesmas condições de teste, superpondo cada curva teórica com aquela obtida experimentalmente. Se necessário, ajustar o(s) modelo(s) por “tentativa e erro”, variando seu(s) parâmetro(s).

### 2. Outro método para a modelagem dinâmica.

- Definir o ponto de operação pelo nível  $h_1 = 1,000m$ . Deixar esse nível constante e introduzir pressão na outra porta do sensor, através de um balão de borracha cheio de ar. Esta porta mantinha antes o sensor piezoresistivo em contato com a atmosfera.
- Disparar a aquisição de dados com osciloscópio digital e furar o balão com agulha ou caneta provocando, assim, uma diferença de pressão no sensor. Qual tipo de entrada foi aplicado nele?
- A partir da curva de resposta obtida, **modelar o sensor de pressão**.
- **Validar o modelo**, simulando no MATLAB para as mesmas condições de teste, superpondo a curva teórica com aquela obtida experimentalmente. Se necessário, ajustar o modelo por “tentativa e erro”, para a obtenção dos melhores valores para seus parâmetros.

## CONCLUSÕES

- Discutir sobre a linearidade do transdutor de nível. Há histerese significativa entre as curvas estáticas de descida e de subida?
- Analisar as respostas dinâmicas dos procedimentos 1 e 2 de modelagem e comparar os modelos obtidos. Há diferença? Por quê?
  - Para cada procedimento, apontar possíveis causas de atraso na resposta.
  - Qual dos procedimentos de modelagem dinâmica seria mais indicado para representar o transdutor de nível? E para o sensor de pressão? Por que?
- A partir de dados de catálogo, dizer se o sensor piezoresistivo está bem dimensionado para se ter máxima resolução na faixa de trabalho do transdutor de nível.

## DESAFIO

O sensor piezoresistivo pode também ser inserido na extremidade superior da mangueira transparente colocada do lado de fora do tubo de PVC.

- Explicar fisicamente como a tensão de saída do transdutor pode representar o nível de água.
- Nessa segunda configuração, a mesma escala milimétrica **não** pode ser utilizada para calibrar o transdutor. Por que, e como resolver esse problema?
- Apontar nova fonte de erro, em relação à primeira configuração (Figura 1).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Electrical Engineering Department – Univ. of California, Los Angeles  
Curso: EE M250B: "MEMS Physics and Design", Week 8, Chapter 18  
Tutorial: Piezoresistive Pressure Sensor  
[www.ee.ucla.edu/~wu/ee250b/course\\_outline1.htm](http://www.ee.ucla.edu/~wu/ee250b/course_outline1.htm)
2. CWRU – Case Western Reserve University  
Tutorial: Short Course on Piezoresistive Sensors – Part 1: Historical Background  
[http://mems.cwr.edu/shortcourse/part1\\_1.html](http://mems.cwr.edu/shortcourse/part1_1.html)
3. [http://stevenengineering.com/Tech\\_Support/PDFs/31press.pdf](http://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/31press.pdf)  
Honeywell Micro Switch Sensing and Control, 180PC Series, acesso em 13/04/2007.
4. <http://www.ti.com>  
TL074 Low-Noise JFET-Input Operational Amplifier  
Texas Instruments, USA, April 2004. Acesso em 2005.

### **Apêndice A**

**Data Sheet: Sensor 186PC03DT da Honeyweell.**

### **Apêndice B**

**Data Sheet: Amplificador Operacional TL074.**

# Apêndice A

## Data Sheet: Sensor 186PC03DT da Honeyweell.

### Pressure Sensors

180PC Series

Miniature Absolute, Differential, Gage/Amplified



- FEATURES**
- Miniature plastic package
  - Terminal and housing mount styles
  - PCB termination
  - Fully signal conditioned

**180PC SERIES PERFORMANCE CHARACTERISTICS at 8.0 ±0.01 VDC Excitation, 25°C**

	Min.	Typ.	Max.	Units
Excitation	7.00	8.00	16	VDC
Supply Current	---	---	6	mA
Current Sourcing Output	---	---	10	mA
Null Offset (184/185PC)	0.95	1.00	1.05	V
Null Offset (186PC)	3.45	3.50	3.55	V
Null Offset				
185PC15AT @ 2 psia	1.62	1.67	1.72	V
185PC30AT @ 2 psia	1.28	1.33	1.38	V
Output at Full Pressure (184/185PC, G,D)	5.90	6.00	6.15	V
Output at Full Pressure (185PC, A only)	5.85	6.00	6.15	V
Output at Full Pressure (186PC)	5.90	6.00	6.10	V
Span (184/185PC, G,D)	4.95	5.00	5.05	V
Span (185PC, A only)	4.90	5.00	5.10	V
Span (186PC)	---	5.00	---	V
Span (185PC15AT)	4.28	4.33	4.38	V
Span (185PC30AT)	4.62	4.67	4.72	V
Ratiometricity Error				
7 to 8V or 8 to 9V	---	±0.50	---	% Span
9 to 12V	---	±2.00	---	% Span
Temperature Error (Combined null and span)	-2%	0	+2%	% Span
Stability over One Year	---	±0.50	---	% Span
Response Time	---	---	1.00	msec
Weight	---	12	---	grams
Short Circuit Protection	Output may be shorted indefinitely to ground			
Output Ripple	None, DC device			
Ground Reference	Supply and output are common			

Amplified

**ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS**

Operating Temperature	-40° to +85°C (-40° to +185°F)
Storage Temperature	-55° to +125°C (-67° to +257°F)
Compensated Temperature	0° to +50°C (32° to +122°F)
Shock	MIL-STD-202, Method 213 (50 g, half sine, 6 msec)
Vibration	MIL-STD-202, Method 204 (10 to 2000 Hz at 10 g)
Media	P2 port Wetted materials; polyester housing, epoxy adhesive, silicon, borosilicate glass, and silicon-to-glass bond*
	P2 port Absolute only: Factory sealed vacuum reference, no connection
	P1 port Dry gases only

\*Liquid media containing some highly ionic solutions could potentially neutralize the chip-to-glass tube bond.

## Pressure Sensors

180PC Series

### Miniature Absolute, Differential, Gage/Amplified

#### 184PC SERIES ORDER GUIDE, VACUUM GAGE TYPE

Catalog Listing	Pressure Range psi	Overpressure psi Max.	Linearity, % Span	
			P2 > P1 Max.	P2 < P1 Max.
184PC05GT	0--5	20	--	±1.00
184PC15GT	0--15	45	--	±1.00

#### 185PC SERIES ORDER GUIDE, DIFFERENTIAL TYPE, P2 > P1

Catalog Listing	Pressure Range psi	Overpressure psi Max.	Linearity, % Span	
			P2 > P1 Max.	P2 < P1 Max.
185PC05DT	0-5	20	±2.00	±1.00
185PC15DT	0-15	45	±2.00	±1.00
185PC30DT	0-30	60	±1.50	±0.75

#### 186PC SERIES ORDER GUIDE, BI-DIRECTIONAL TYPE, P2-P1

Catalog Listing	Pressure Range psi	Overpressure psi Max.	Linearity, % Span	
			P2 > P1 Max.	P2 < P1 Max.
186PC03DT	±2.5	20	±2.00	±1.00
186PC05DT	±5.0	20	±2.00	±1.00
186PC15DT	±15	45	±2.00	±1.00

#### 185PC SERIES ORDER GUIDE, ABSOLUTE TYPE

Catalog Listing	Pressure Range psi	Overpressure psi Max.	Linearity, % Span	
			P2 > P1 Max.	P2 < P1 Max.
185PC15AT	0-15	45	--	±1.00
185PC30AT	0-30	60	--	±0.75

#### HOW TO ORDER

Catalog listings in the order guide are shown with mounting version T (terminal mount). H (housing mount) also available. Contact 800 number.



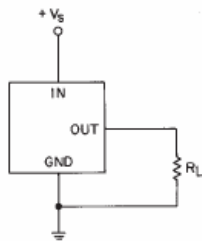
# Pressure Sensors

180PC Series

## Miniature Absolute, Differential, Gage/Amplified

### ELECTRICAL CONNECTIONS

#### Voltage Excitation



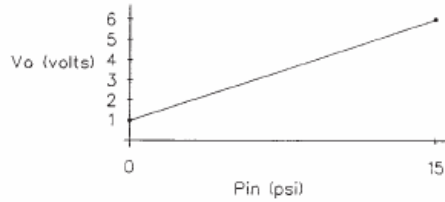
#### NOTES

1. Terminals are labeled on the sensor.
2. Input and output share a common ground.
3.  $R_L$  must be greater than or equal to 3000 ohms.

### IDEAL OUTPUT AT $V_s = 8.00 \pm 0.01$ VDC

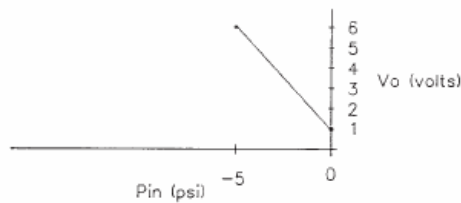
#### Differential

Example: 185PC15DT when  $P_N = P_2 - P_1$



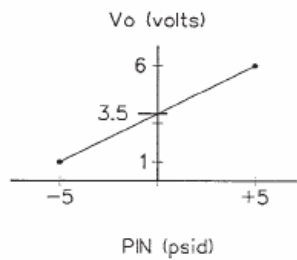
#### Vacuum Gage

Example: 184PC05GT where  $P_2 = P_N$ ,  $P_1 = \text{Ambient}$



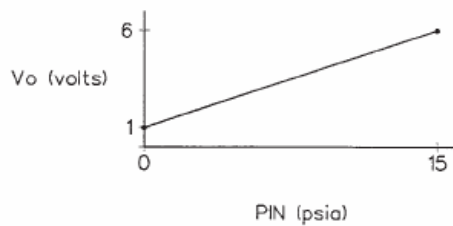
#### Bi-directional

Example: 186PC05DH where  $P_N = P_2 - P_1$



#### Absolute

Example: 185PC15AP where  $P_1 = P_N$ ,  $P_2 = \text{Factory sealed vacuum}$



Amplified

## Apêndice B

### Amplificador Operacional TL074.

#### TL071, TL071A, TL071B, TL072 TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS080I – SEPTEMBER 1978 – REVISED APRIL 2004

- Low Power Consumption
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion . . . 0.003% Typ
- Low Noise  
 $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  Typ at  $f = 1 \text{ kHz}$
- High Input Impedance . . . JFET Input Stage
- Internal Frequency Compensation
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate . . . 13 V/ $\mu\text{s}$  Typ
- Common-Mode Input Voltage Range Includes  $V_{CC+}$

#### description/ordering information

The JFET-input operational amplifiers in the TL07x series are similar to the TL08x series, with low input bias and offset currents and fast slew rate. The low harmonic distortion and low noise make the TL07x series ideally suited for high-fidelity and audio preamplifier applications. Each amplifier features JFET inputs (for high input impedance) coupled with bipolar output stages integrated on a single monolithic chip.

The C-suffix devices are characterized for operation from 0°C to 70°C. The I-suffix devices are characterized for operation from -40°C to 85°C. The M-suffix devices are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

**PRODUCTION DATA** Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

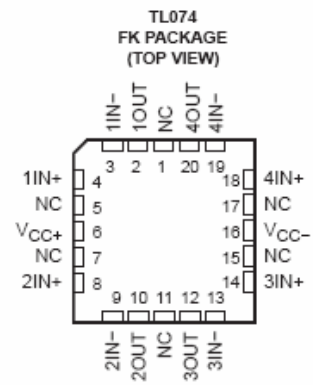
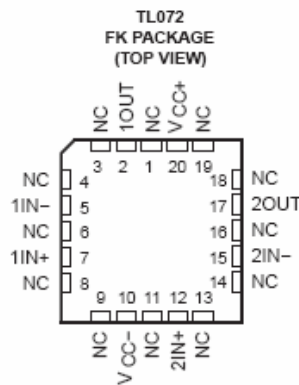
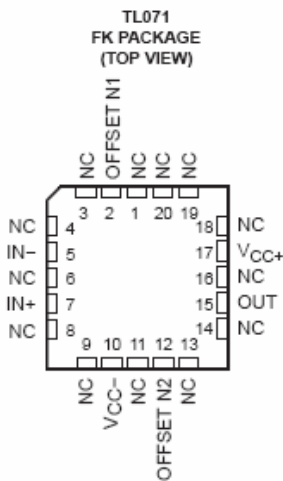
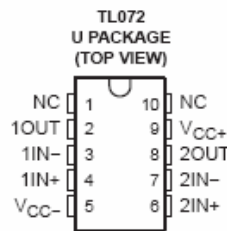
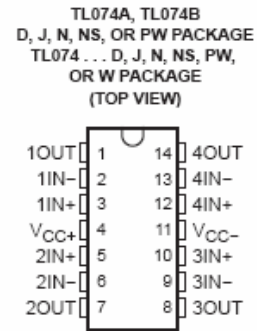
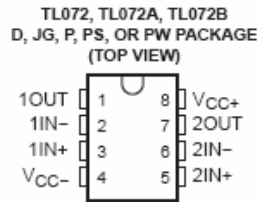
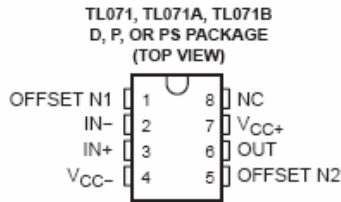
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated  
On products compliant to MIL-PRF-38536, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

1

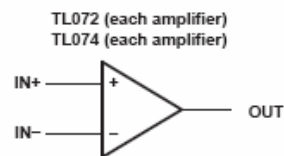
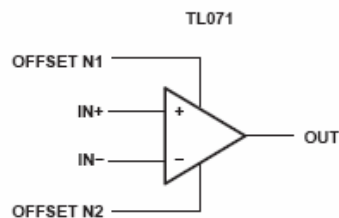
**TL071, TL071A, TL071B, TL072**  
**TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B**  
**LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS080I - SEPTEMBER 1978 - REVISED APRIL 2004



NC - No internal connection

**symbols**



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265