

Introduzione alla misura della temperatura

Corso di Laboratorio di Fisica I, Termodinamica
A.A. 2007-2008

Edoardo Milotti

1. Introduzione

I concetti di calore e di temperatura – a noi così familiari – si sono sviluppati abbastanza tardi rispetto altri concetti scientifici, e sono stati resi precisi soltanto durante il 1800, con il lavoro di alcuni grandi scienziati ed ingegneri come Carnot, Joule, Clausius, Kelvin e Maxwell, per citarne solo alcuni. La scienza del calore è stata chiamata termodinamica, ed è ricca di risultati estremamente importanti per la tecnologia moderna, ed è proprio per questo che nel suo sviluppo compaiono molto spesso i nomi di alcuni grandi ingegneri. Non bisogna inoltre dimenticare che la termodinamica ha un ruolo importante nelle analisi fatte dai chimici, e quindi la termodinamica moderna si sviluppa in tre direzioni principali, quella dei principi e delle idee fondamentali associate alla ricerca in fisica, quella delle applicazioni alle trasformazioni chimiche e biochimiche, ed infine quella associata alle applicazioni ingegneristiche.

In questo breve corso consideriamo alcune applicazioni delle idee della termodinamica sotto forma di calcoli dettagliati e di esperimenti.

2. Introduzione alla termometria

Nelle esperienze di laboratorio utilizziamo dei termometri, strumenti per la misura della temperatura. Nei termometri si parte da un fenomeno fisico in cui una quantità x dipende unicamente (o quasi unicamente) dalla temperatura, e che è ben conosciuto, come per esempio la dilatazione termica dei metalli: dalla misura della quantità fisica x si risale allora alla temperatura.



Un termometro a mercurio per uso clinico

L'invenzione del termometro

1596 – *Galileo Galilei e il primo termoscopio*. Galileo è spesso considerato l'inventore del termometro, ma in realtà ha inventato un termoscopio, uno strumento per indicare le differenze di temperatura, non dotato di una scala. Ovviamente passare da un termoscopio ad un termometro è un passo abbastanza breve. Il termoscopio di Galileo era sostanzialmente un termometro a gas.

1612 – *Santorio Santorio e il primo termometro*. Santorio Santorio (1561-1636) sembra sia stato il primo ad applicare una scala ad un termoscopio ad aria ed è quindi considerato l'inventore del termometro. Lo strumento di Santorio era un termometro ad aria, piuttosto poco accurato, visto che all'epoca non si conosceva l'influenza della pressione su un termometro di questo tipo

1654 – *Il primo termometro sigillato del tipo liquido in vetro*. Il termometro sigillato del tipo liquido in vetro che è quello più comune oggi, fu prodotto per la prima volta dal granduca di Toscana, Ferdinando II (1610-1670), ed era riempito con alcool. Benché questo fosse uno sviluppo significativo, il suo termometro era poco accurato e privo di una scala standardizzata. All'epoca era molto difficile produrre un tubo di vetro con un foro di diametro costante, e questo influenzava l'accuratezza della misura.

1714 – *il primo termometro a mercurio*. Gabriel Fahrenheit (1686-1736) fu il primo a costruire un termometro a mercurio. La maggiore regolarità dell'espansione del mercurio e il miglioramento della tecnica di lavorazione del vetro permisero la costruzione di un termometro molto più accurato.

In generale i termometri sono basati su diversi effetti fisici ed esistono quindi molti tipi di termometri. Nel seguito di queste note considereremo altri effetti fisici che possono venire utilizzati per costruire termometri.



Il "più alto" termometro del mondo a Baker, California (non è altro che un termometro elettronico con una scala piuttosto grande)

Le scale di temperatura

Quando il termometro fu inventato si sapeva poco dei punti fissi. Inoltre tutto era molto più confuso a causa delle difficoltà costruttive: era molto difficile realizzare un termometro con un diametro costante in tutta la sua lunghezza, e questo voleva dire che non esistevano due termometri uguali. Solo quando alcune persone viaggiarono portando con sé lo stesso termometro fu possibile confermare che i punti di congelamento e di ebollizione dell'acqua erano gli stessi indipendentemente dalla località e si individuarono gli effetti dell'altezza e della pressione dell'aria. I punti di congelamento e di ebollizione dell'acqua vennero scelti per la loro facile realizzabilità.

Dopo l'individuazione dei punti fissi e il miglioramento della tecnologia si poté introdurre una scala di temperatura standardizzata. Ne furono proposte molte e le principali sono le seguenti:

Scala Fahrenheit

Fu la prima ad essere introdotta, ed è ancora in uso, benché in misura sempre più ridotta. I punti fissi sono il punto di congelamento dell'acqua (32) e il punto di ebollizione dell'acqua (212). Fahrenheit scelse 32 per la temperatura del punto di congelamento dell'acqua perché in questo modo anche le temperature più basse che riusciva a produrre in laboratorio restavano positive.

Scala Réamur

Questa scala non è più in uso, ma il suo sviluppo fu significativo perché fu la prima scala ad utilizzare lo 0 per il punto di congelamento dell'acqua (la temperatura di ebollizione dell'acqua è fissata a 80)

Scala Celsius

È la scala più usata. I punti fissi sono sempre il punto di congelamento dell'acqua e quello di ebollizione dell'acqua. Venne introdotta dall'astronomo svedese Anders Celsius nel 1742. Celsius scelse lo 0 per la temperatura di ebollizione e 100 per la temperatura di congelamento. Un anno dopo il francese Jean Pierre Cristin invertì la scala Celsius per produrre la scala centigrada usata oggi (congelamento a 0, ebollizione a 100). In seguito ad un accordo internazionale nel 1948, la scala adattata da Cristin fu denominata Celsius ed è quella in uso oggi.

Scala Kelvin

La scala Kelvin è lo standard del Sistema Internazionale. I punti fissi sono il punto triplo dell'acqua (0) e il punto di ebollizione dell'acqua (100), e fu proposta nel 1848 da William Thomson (Lord Kelvin).

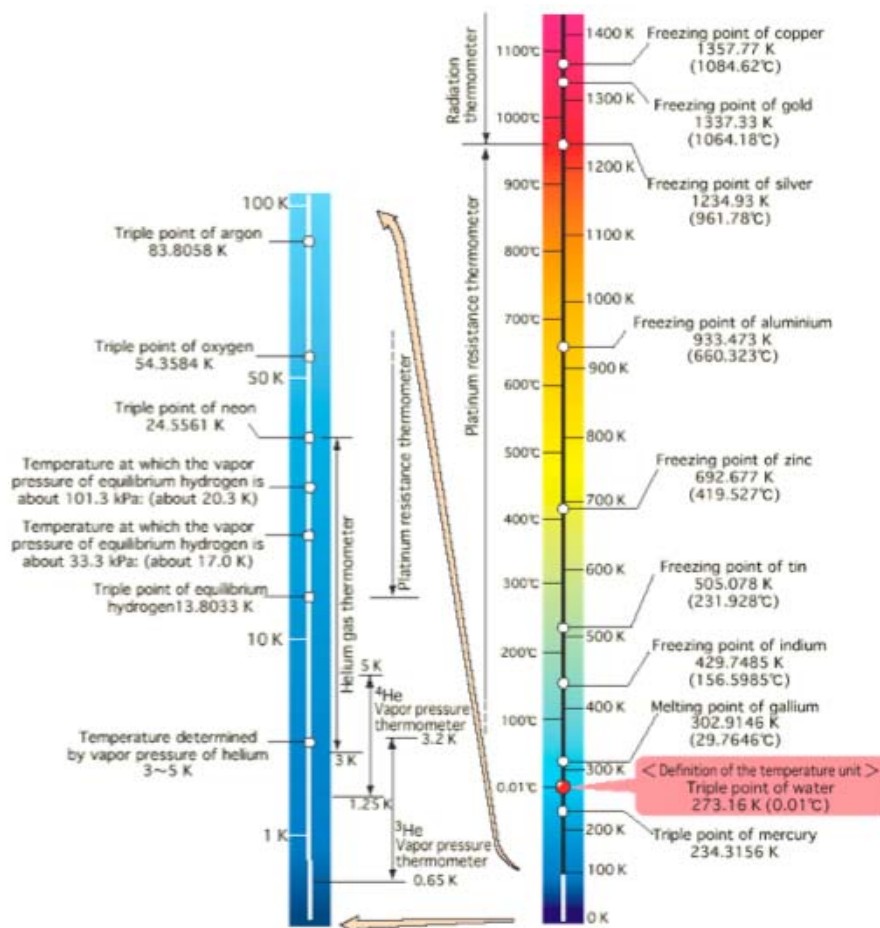
Punti fissi in uso oggi

La scala di temperature in uso oggi viene mantenuta dalla Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (Parigi). La scala di temperature più recente è stata definita nel 1990 ed è nota con il nome di International Temperature Scale (ITS-90).

ITS-90 è riferita a 16 punti fissi, che sono i punti di fusione, congelamento o punti tripli di varie sostanze: acqua, mercurio, gallio, indio, stagno, zinco, alluminio, argento, idrogeno, neon, ossigeno, argon, rame e oro. A parte l'acqua gli altri sono tutti elementi. Questi punti fissi definiscono una gamma di temperature entro la quale un termometro può venire calibrato, ad esempio dal punto triplo dell'idrogeno a $-259.3467\text{ }^{\circ}\text{C}$ (13.8033 K) al punto di congelamento dell'oro a $1064.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1337.33 K).

Punti tripli

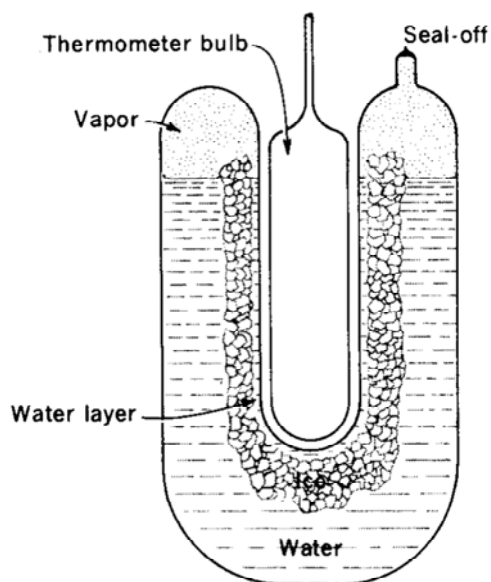
Una sostanza si trova al suo punto triplo quando lo stato gassoso, liquido e solido coesistono. Il punto triplo dell'acqua è il punto fisso più importante di ITS-90, perché è il solo punto fisso comune a ITS-90 e alla scala Kelvin.



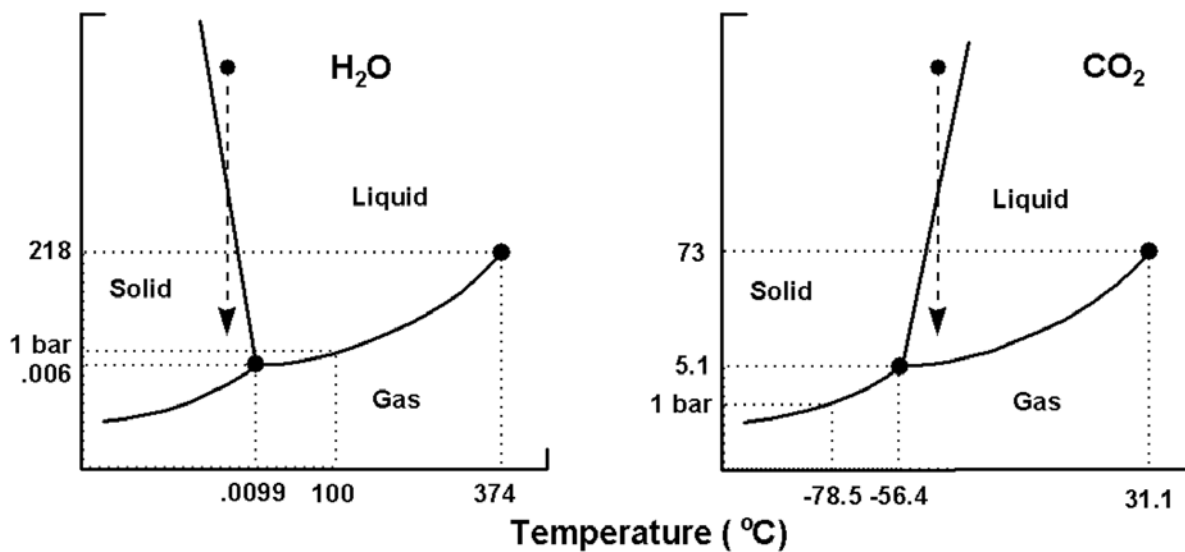
Rappresentazione grafica della scala termometrica ITS-90 con indicazione dei termometri utilizzati per l'interpolazione tra i punti fissi.

Tabella dei punti fissi della scala ITS-90

Sostanza e stato	Punto di definizione in gradi Kelvin (intervallo)	Punto di definizione in gradi Celsius (intervallo)
Relazione pressione di vapore-temperatura per l'elio-3 (relazione analitica)	(0.65 to 3.2)	(-272.50 to -269.95)
Relazione pressione di vapore-temperatura per l'elio-4 sotto il suo punto lambda (relazione analitica)	(1.25 to 2.1768)	(-271.90 to -270.9732)
Relazione pressione di vapore-temperatura per l'elio-4 sopra il suo punto lambda (relazione analitica)	(2.1768 to 5.0)	(-270.9732 to -268.15)
Punto triplo dell'idrogeno	13.8033	-259.3467
Punto triplo del neon	24.5561	-248.5939
Punto triplo dell'ossigeno	54.3584	-218.7916
Punto triplo dell'argon	83.8058	-218.7916
Punto triplo del mercurio	234.3156	-38.8344
Punto triplo dell'acqua	273.16	0.01
Punto di fusione del gallio	302.9146	29.7646
Punto di congelamento dell'indio	429.7485	156.5985
Punto di congelamento dello stagno	505.078	231.928
Punto di congelamento dello zinco	692.677	419.527
Punto di congelamento dell'alluminio	933.473	660.323
Punto di congelamento dell'argento	1234.93	961.78
Punto di congelamento dell'oro	1337.33	1064.18
Punto di congelamento del rame	1357.77	1084.62



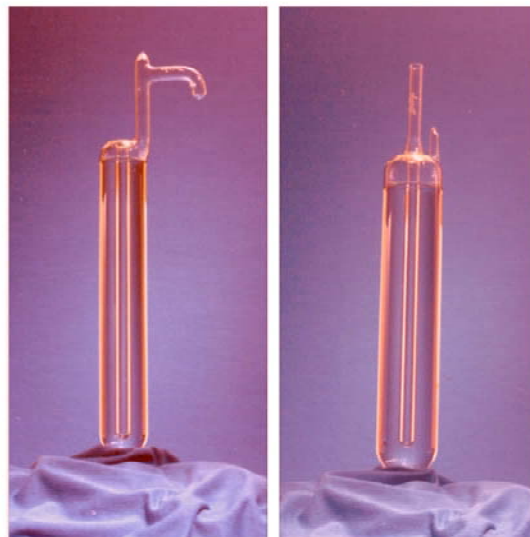
A sinistra, schema di una cella per il punto triplo dell'acqua, a destra, foto di una cella in laboratorio.



La figura mostra i diagrammi di fase di acqua (a sinistra) e anidride carbonica (a destra). Il diagramma di fase dell'acqua è anomalo rispetto a quello di molte sostanze: una diminuzione di pressione come quella mostrata nella figura produce formazione di ghiaccio nel caso dell'acqua, mentre nel caso dell'anidride carbonica produce la liquefazione del ghiaccio secco.



Triple Point of Water Cells



Data l'importanza della calibrazione dei termometri, esistono ditte specializzate nella costruzione di celle per il punto triplo dell'acqua (e per gli altri punti fissi di ITS-90), come la ditta Isotech.

3. Tipi di termometri

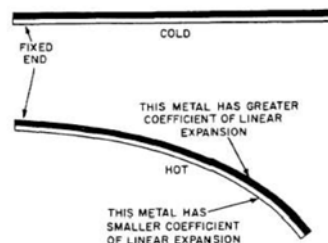
Abbiamo già visto sopra che ci sono diversi tipi di termometri. In linea di principio ogni effetto fisico che dipende dalla temperatura può essere utilizzato per costruire dei termometri. In pratica si utilizzano solo alcuni fenomeni dipendenti dalla temperatura, e qui consideriamo alcuni tra i più comuni tipi di termometri:

1. *termometro a mercurio (e in generale termometro a liquido in vetro)*: si visualizza l'espansione volumetrica di un liquido in un contenitore di vetro. Il contenitore è costruito in modo da massimizzare la visibilità dell'effetto (un'ampolla che fa da serbatoio ed un sottile tubo senz'aria dove il liquido si può espandere liberamente). A causa della pericolosità del mercurio una recente proposta di direttiva europea (<http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0069:FIN:IT:HTML>) prevede la graduale eliminazione dei termometri a mercurio e la loro sostituzione con termometri contenenti altri liquidi.



Termometro a mercurio di fine '700 costruito a Londra da J. Troughton (IMSS, Firenze)

2. *termometro bimetallico*: si utilizza una molla realizzata con due lamine di metalli con diverso coefficiente di espansione termica. A causa del diverso coefficiente di espansione la lamina si piega in modo diverso in funzione della temperatura. Un indicatore fissato sulla molla permette di leggere la temperatura su una scala calibrata.



Se le due lamine hanno lunghezza ℓ a temperatura T_0 , allora a temperatura $T_1 = T_0 + \delta T$ le nuove lunghezze di ciascuna lamina sono $\ell + \delta\ell_1 = \ell + \alpha_1\ell\delta T$ e $\ell + \delta\ell_2 = \ell + \alpha_2\ell\delta T$, e il corrispondente arco di cerchio che si forma in conseguenza della dilatazione differenziale, ha raggio r e angolo $\delta\theta$. Se le due lamine sono separate dalla distanza Δr , allora valgono le condizioni

$$\begin{aligned}\ell + \alpha_1\ell\delta T &= r\delta\theta \\ \ell + \alpha_2\ell\delta T &= (r + \Delta r)\delta\theta\end{aligned}$$

(qui si suppone che il raggio di curvatura corrispondente alla prima lamina – che si allunga meno – sia proprio r), e dunque, sottraendo la prima equazione dalla seconda, si trova

$$(\alpha_2 - \alpha_1)\ell\delta T = \Delta r\delta\theta$$

e quindi

$$\delta T = \frac{\Delta r\delta\theta}{(\alpha_2 - \alpha_1)\ell}$$

Da quest'ultima equazione si vede che per una fissata differenza di temperatura δT , l'angolo di deviazione è tanto più grande quanto più sottili sono le lamine (Δr piccolo), e che l'errore di misura sulla temperatura è tanto più piccolo quanto più piccolo è Δr .

3. *termometro a gas*: questo tipo di termometro utilizza la legge dei gas ideali. Una variazione di volume a pressione costante è proporzionale alla variazione di temperatura assoluta. I moderni termometri a gas mantengono il volume del gas costante e ne misurano la pressione con un manometro. Dalla misura di pressione si risale allora alla temperatura:

$$T = \frac{PV}{nR}$$

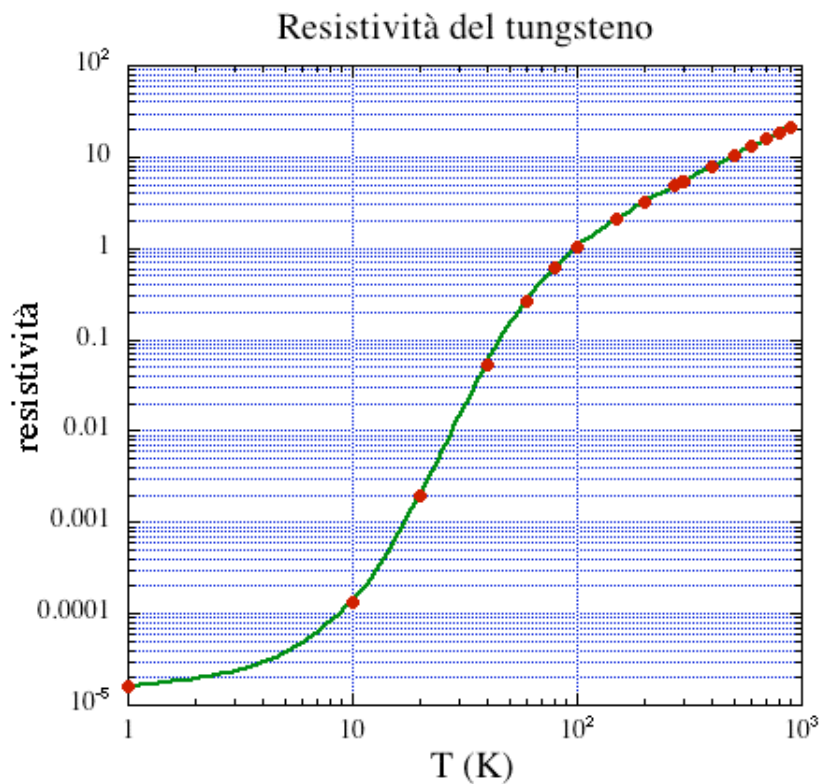
4. *termometro resistivo*: il termometro resistivo è una resistenza elettrica il cui valore cambia in funzione della temperatura. Questo è un comportamento normale dei materiali conduttori. La resistività è una caratteristica dei materiali che spesso – in prossimità della temperatura ambiente – viene parametrizzata nel modo seguente:

$$\rho(T) = \rho_{T=20^\circ\text{C}}(1 + \alpha T)$$

La tabella seguente contiene i valori di resistività di tre metalli tecnologicamente importanti, alluminio, rame e tungsteno in unità di $10^{-8} \Omega \text{ m}$:

T (K)	Alluminio	Rame	Tungsteno
1	0.000100	0.00200	0.000016
10	0.000193	0.00202	0.000137
20	0.000755	0.00280	0.00196
40	0.0181	0.0239	0.0544
60	0.0959	0.0971	0.266
80	0.245	0.215	0.606
100	0.442	0.348	1.02
150	1.006	0.699	2.09
200	1.587	1.046	3.18
273	2.417	1.543	4.82
293	2.650	1.678	5.28
298	2.709	1.712	5.39
300	2.733	1.725	5.44
400	3.87	2.402	7.83
500	4.99	3.090	10.3
600	6.13	3.792	13.0
700	7.35	4.514	15.7
800	8.70	5.262	18.6
900	10.18	6.041	21.5

La figura seguente mostra l'andamento della resistività del tungsteno in funzione della temperatura, ottenuta dai dati in tabella (la curva continua non rappresenta un risultato analitico e serve solo come guida).



Esercizio: si ricavino i valori di α a temperatura ambiente (20°C) per i tre metalli in tabella.



Resistenze di platino per la misura di temperature da 30 K a 873 K prodotte dalla LakeShore

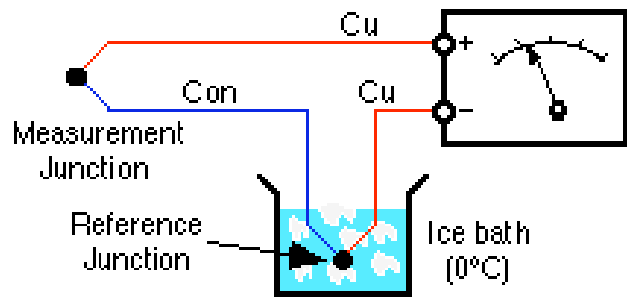
5. *termistore*: i termistori sono resistenze con un elevato coefficiente termico (la resistenza cambia molto in funzione della temperatura, di solito con coefficiente negativo). Vengono usati per compensare variazioni di temperatura nei circuiti, e in circuiti termometrici.



Termistori prodotti dalla Dongguan Longkey Electronic Co.

6. *termocoppia*: una termocoppia è costituita da due fili conduttori di due diversi metalli o leghe metalliche. Si trova che quando le due giunzioni vengono messe a temperature diverse, viene prodotta una tensione che è funzione della temperatura (effetto Seebeck). Misurando la tensione si può quindi trovare la temperatura. Sensori di questo tipo sono molto robusti e possono misurare la temperatura in un intervallo molto esteso.

La figura che segue mostra la configurazione circuitale tradizionale, che però è scomoda e non viene utilizzata nei moderni strumenti di misura, che utilizzano invece un termometro ausiliare per misurare la temperatura della giunzione di riferimento.



Traditional Thermocouple Measurement

I materiali per termocoppie sono stati standardizzati dall'ANSI, e sono elencati nella tabella seguente:

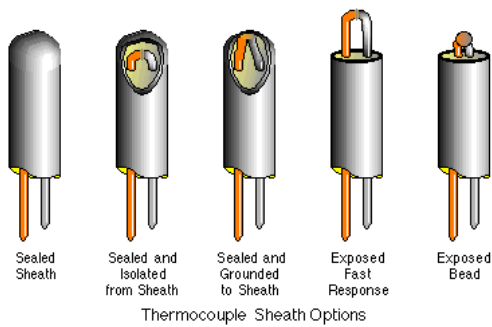
Tipo di termocoppia (secondo lo standard ANSI)	Materiali	Intervallo di temperatura
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	1370-1700°C
C	W5Re Tungsteno 5% Renio (+) W26Re Tungsteno 26% Renio (-)	1650-2315°C
E	Chromel (+) Costantana (-)	95-900°C
J	Ferro (+) Costantana (-)	95-760°C
K	Chromel (+) Alumel (-)	95-1260°C
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	650-1260°C
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	870-1450°C
S	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	980-1450°C
T	Rame (+) Costantana (-)	-200-350°C

Chromel: 90% Ni, 10% Cr

Alumel: 95% Ni, 2% Mn, 2% Al, 1% Si

Nicrosil e Nisil: classe di leghe contenenti Ni, Cr, Si e altri elementi (Mn, Al, Co, Mg, Cu, Fe)

Costantana: 55% Cu, 45% Ni



Tipi di montaggio della giunzione di misura.



Termometro della Sper Scientific, Ltd. che ha la possibilità di utilizzare diverse sonde, tra cui la termocoppia in basso a destra

7. *diodi o transistor semiconduttori*: la legge di conduzione dei diodi semiconduttori è

$$I = I_0 (\exp(qV/kT) - 1)$$

e quindi quando $qV \gg kT$ (cosa che a temperatura ambiente succede quando $V \gg 25mV$)

$$I \approx I_0 \exp(qV/kT)$$

e in questo caso

$$T \approx \frac{q}{k \ln(I/I_0)} V$$

perciò se alimenta il diodo con una corrente I costante, la temperatura è semplicemente proporzionale alla tensione ai capi del diodo. Il termometro LM35 descritto sopra utilizza questo effetto, anche se in un modo più sofisticato di quello appena descritto.



Un modello di diodo a silicio per la misura di temperature da 1.4 K a 500 K della LakeShore

8. *pirometro ottico*: in questo strumento si confronta l'emissione di un filamento interno con quella di una superficie incandescente; si cambia la corrente che rende incandescente il filamento fino a quando l'immagine del filamento – che è sovrapposta a quella della superficie – non è più distinguibile da quella della superficie calda. L'emissione luminosa dipende solo dalla temperatura del corpo incandescente, perciò quando l'emissione luminosa del filamento è uguale (ha lo stesso colore) di quella della superficie le due temperature (del filamento e della superficie) sono uguali. Conoscendo la temperatura del filamento si conosce automaticamente anche la temperatura della superficie.



Queste figure mostrano schematicamente quello che si vede in un pirometro: a sinistra il filamento è troppo freddo, al centro troppo caldo, e a destra ha la stessa temperatura della superficie incandescente.



Pirometro ottico della Spectrodyne, Inc.

9. *termometro a raggi infrarossi*: anche in questo caso si utilizza la radiazione emessa da un oggetto, e si trova la temperatura utilizzando la cosiddetta *legge del corpo nero*, che studieremo più avanti.

Shown with HH-DM Option Installed



Un termometro ad infrarossi Omegascope della ditta Omega Engineering

Il termometro elettronico LM35

I termometri elettronici, sono caratterizzati da una bassissima capacità termica e da una precisione molto superiore a quella dei termometri a mercurio. In particolare il nostro laboratorio dispone di sensori termometrici LM35 prodotti dalla National Semiconductors, la cui scheda tecnica è riportata in appendice.

Il circuito LM35 è un circuito integrato che fornisce in uscita una tensione proporzionale alla temperatura in gradi Celsius, ed è confezionato con un impacchettamento standard TO-92. Questo significa che il circuito ha tre terminali, e che, visto dal basso, cioè dal lato dei terminali, appare come in figura:



La tensione di alimentazione (che deve essere inferiore a 35 V) va applicata tra il terminale $+V_S$ e il terminale comune, mentre la tensione d'uscita va misurata tra il terminale V_{OUT} e il terminale comune. La tensione in uscita è proporzionale alla temperatura misurata in gradi Celsius e la costante di proporzionalità è $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

LM35

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

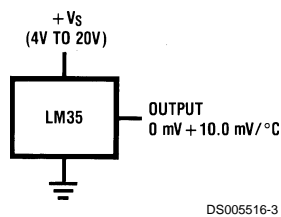
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

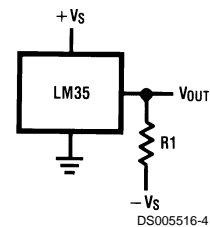
- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55° to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



DS005516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



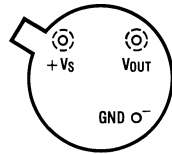
DS005516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Connection Diagrams

**TO-46
Metal Can Package***

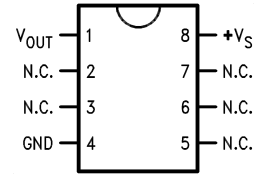


BOTTOM VIEW
DS005516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

**SO-8
Small Outline Molded Package**

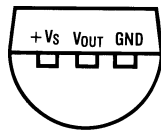


DS005516-21

N.C. = No Connection

Top View
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

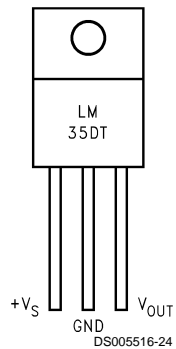
**TO-92
Plastic Package**



BOTTOM VIEW
DS005516-2

Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

**TO-220
Plastic Package***



DS005516-24

*Tab is connected to the negative pin (GND).

Note: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP.

Order Number LM35DT
See NS Package Number TA03F

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp.;	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-220 Package,	-65°C to +150°C
Lead Temp.:	
TO-46 Package,	
(Soldering, 10 seconds)	300°C

TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
SO Package (Note 12)	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V
Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)	
LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	°C
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		°C
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	μA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+10.0	+9.8, +10.2		+10.0		+9.8, +10.2	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0		± 0.4	± 2.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5.0	± 0.5		± 5.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of *Figure 2*. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of *Figure 1*. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is $400^\circ\text{C}/\text{W}$, junction to ambient, and $24^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is $180^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is $220^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is $90^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of *Figure 1*.

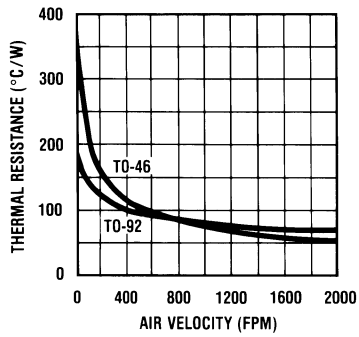
Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

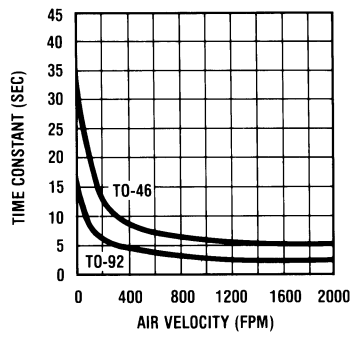
Typical Performance Characteristics

Thermal Resistance Junction to Air



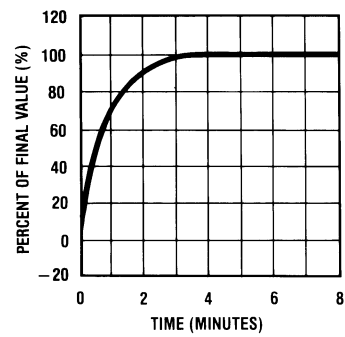
DS005516-25

Thermal Time Constant



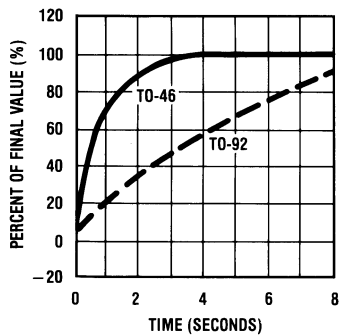
DS005516-26

Thermal Response in Still Air



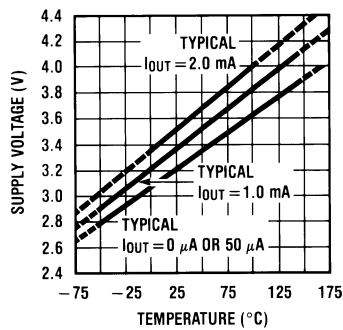
DS005516-27

Thermal Response in Stirred Oil Bath



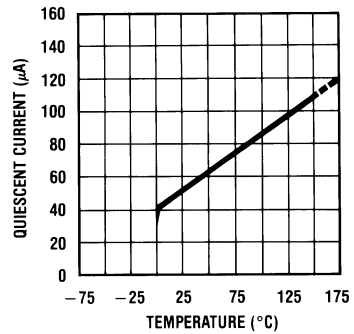
DS005516-28

Minimum Supply Voltage vs. Temperature



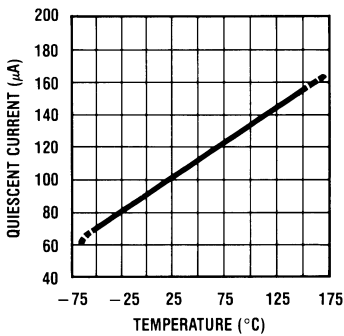
DS005516-29

Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 1.)



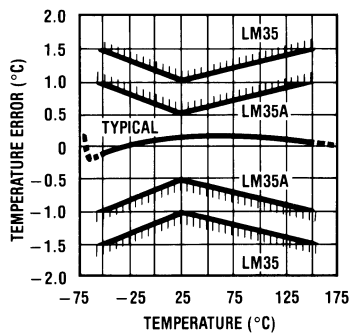
DS005516-30

Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 2.)



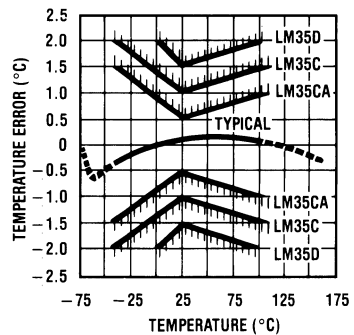
DS005516-31

Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



DS005516-32

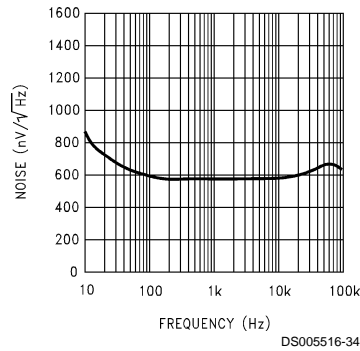
Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



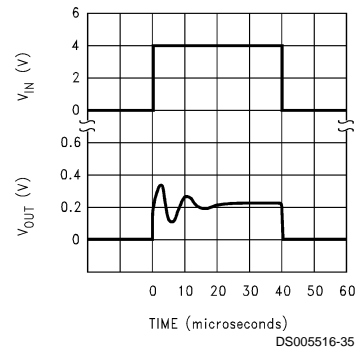
DS005516-33

Typical Performance Characteristics (Continued)

Noise Voltage



Start-Up Response



Applications

The LM35 can be applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. It can be glued or cemented to a surface and its temperature will be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature; if the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature. This is especially true for the TO-92 plastic package, where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, be sure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the LM35 die's temperature will not be affected by the air temperature.

The TO-46 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, the LM35 can be mounted inside a sealed-end metal tube, and can then be dipped into a bath or screwed into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin, to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

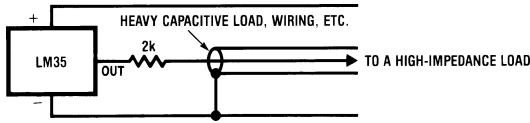
Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO-46, no heat sink	TO-46*, small heat fin	TO-92, no heat sink	TO-92**, small heat fin	SO-8 no heat sink	SO-8** small heat fin	TO-220 no heat sink
Still air	400°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	26°C/W
Still oil	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	30°C/W	45°C/W	40°C/W			
(Clamped to metal, Infinite heat sink)		(24°C/W)				(55°C/W)	

*Wakefield type 201, or 1" disc of 0.020" sheet brass, soldered to case, or similar.

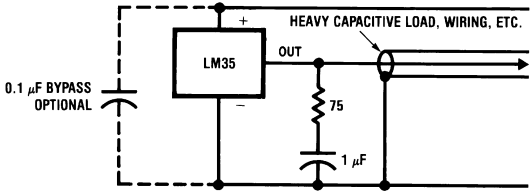
**TO-92 and SO-8 packages glued and leads soldered to 1" square of 1/16" printed circuit board with 2 oz. foil or similar.

Typical Applications



DS005516-19

FIGURE 3. LM35 with Decoupling from Capacitive Load



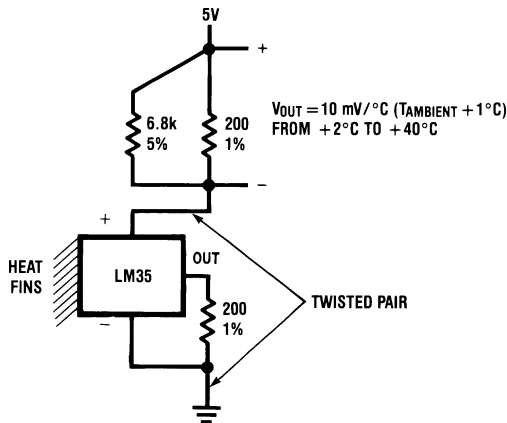
DS005516-20

FIGURE 4. LM35 with R-C Damper

CAPACITIVE LOADS

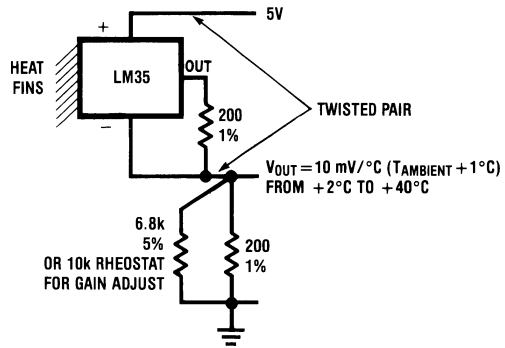
Like most micropower circuits, the LM35 has a limited ability to drive heavy capacitive loads. The LM35 by itself is able to drive 50 pF without special precautions. If heavier loads are anticipated, it is easy to isolate or decouple the load with a resistor; see Figure 3. Or you can improve the tolerance of capacitance with a series R-C damper from output to ground; see Figure 4.

When the LM35 is applied with a 200Ω load resistor as shown in Figure 5, Figure 6 or Figure 8 it is relatively immune to wiring capacitance because the capacitance forms a bypass from ground to input, not on the output. However, as with any linear circuit connected to wires in a hostile environment, its performance can be affected adversely by intense electromagnetic sources such as relays, radio transmitters, motors with arcing brushes, SCR transients, etc, as its wiring can act as a receiving antenna and its internal junctions can act as rectifiers. For best results in such cases, a bypass capacitor from V_{IN} to ground and a series R-C damper such as 75Ω in series with 0.2 or 1 μF from output to ground are often useful. These are shown in Figure 13, Figure 14, and Figure 16.



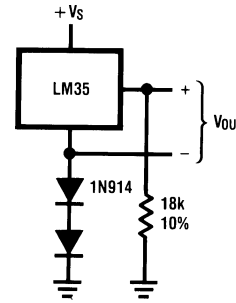
DS005516-5

FIGURE 5. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Grounded Sensor)



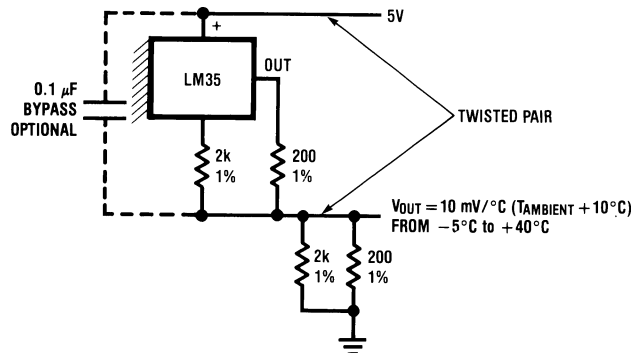
DS005516-6

FIGURE 6. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)



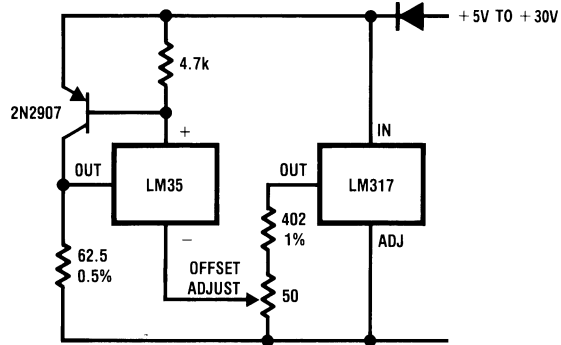
DS005516-7

FIGURE 7. Temperature Sensor, Single Supply, -55° to +150°C



DS005516-8

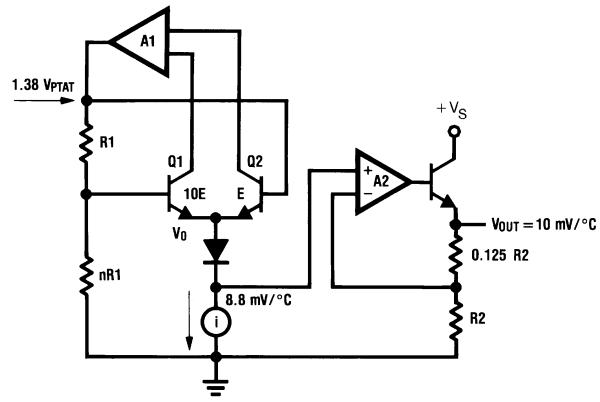
FIGURE 8. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)



DS005516-9

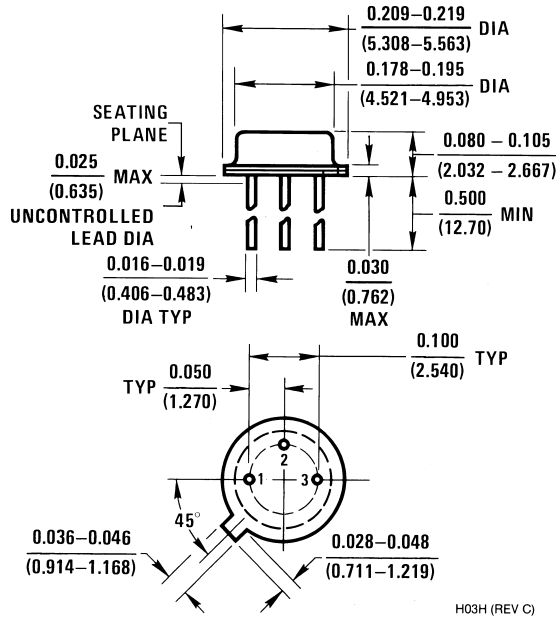
FIGURE 9. 4-To-20 mA Current Source (0°C to +100°C)

Block Diagram



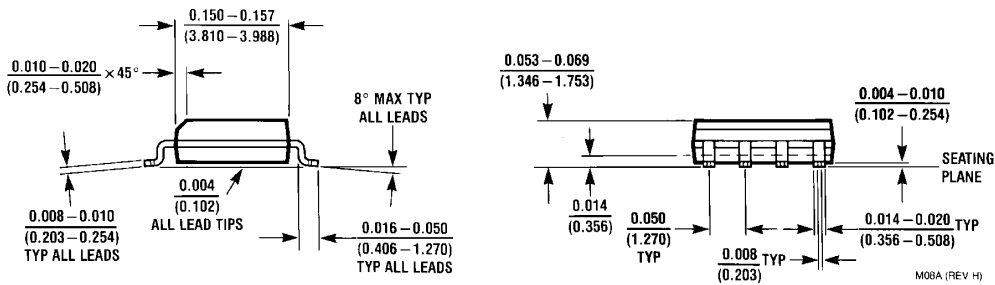
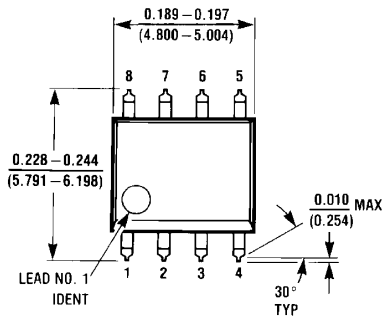
DS005516-23

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



H03H (REV C)

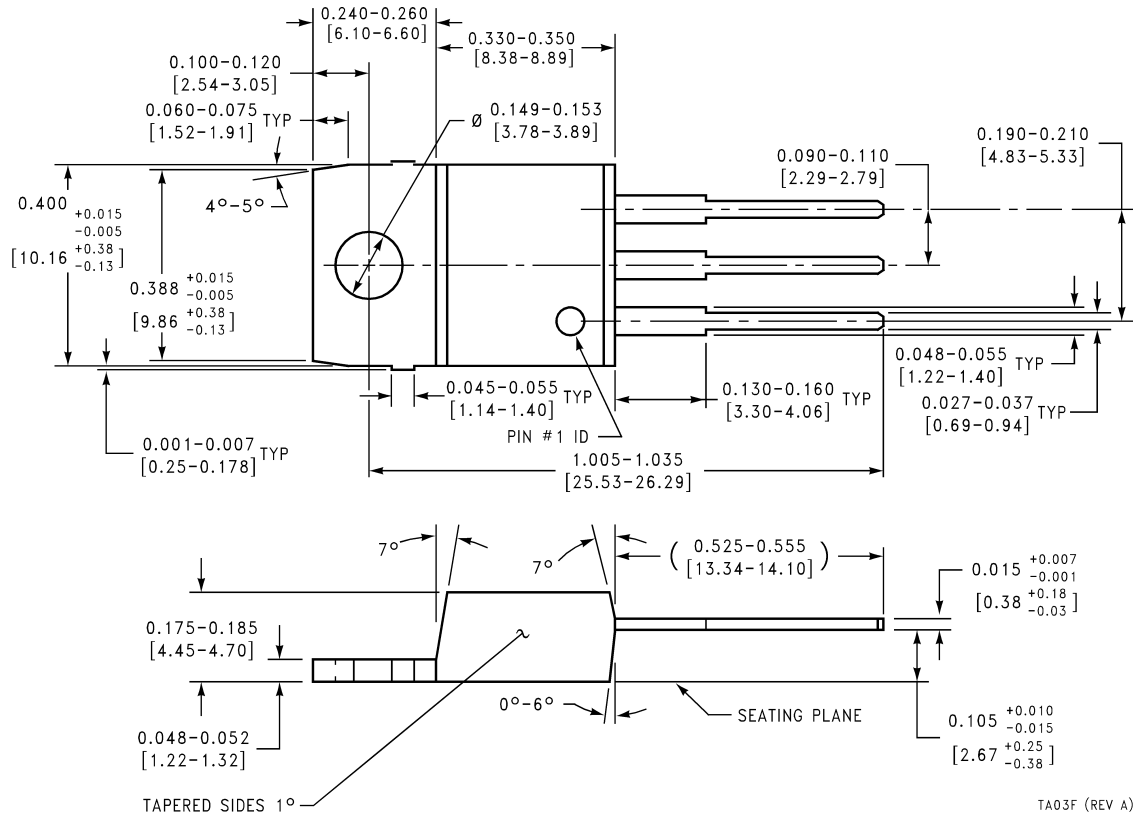
TO-46 Metal Can Package (H)
Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH,
LM35CAH, or LM35DH
NS Package Number H03H



M08A (REV H)

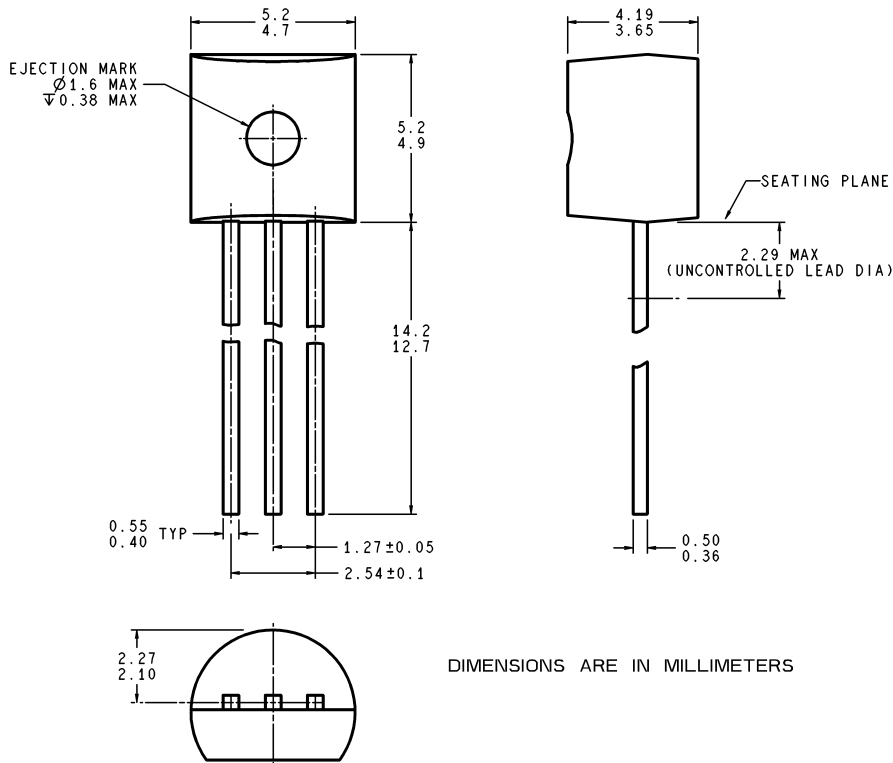
SO-8 Molded Small Outline Package (M)
Order Number LM35DM
NS Package Number M08A

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Power Package TO-220 (T)
Order Number LM35DT
NS Package Number TA03F

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Z03A (Rev G)

TO-92 Plastic Package (Z)
Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
NS Package Number Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
Americas
Tel: 1-800-272-9959
Fax: 1-800-737-7018
Email: support@nsc.com
www.national.com

National Semiconductor Europe
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group
Tel: 65-2544466
Fax: 65-2504466
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-3-5639-7560
Fax: 81-3-5639-7507