

# Sensores Integrados em Silício IE012

## Sensores Térmicos I

Professor Fabiano Fruett

UNICAMP – FEEC - DSIF  
Sala 207

[www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano](http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano)

## Temperatura é a variável mais medida



Energia térmica: Energia de vibração das moléculas

## Escalas de temperatura

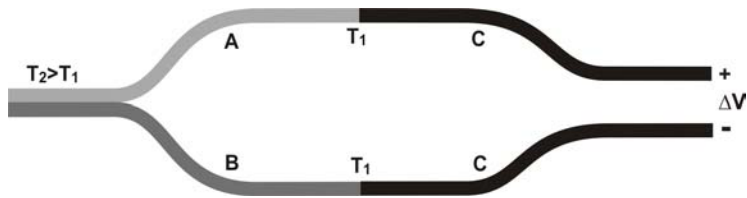
$$\frac{T(\text{K}) - 273,15}{5} = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{9} = \frac{T(^{\circ}\text{C})}{5}$$

Pontos de calibração	Temperatura		
	K	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$
Energia térmica zero	0	-459,6	-273,15
Água sólido/líquido	273,15	32	0
Água líquido/gás	373,15	212	100

De um modo geral os sensores de temperatura podem ser divididos em:

- Passivos (Auto-suficientes)
  - Termopares (efeito termoelétrico)
  
- Ativos (Modulantes)
  - “Termo”resistores,
  - “Termo”diodos e
  - “Termo”transistores

## Termopares – Efeito Seebeck



$$\Delta V = \alpha_{AB} \Delta T$$

sendo que  $\alpha_{AB}$  o coeficiente de Seebeck relativo entre os materiais A e B, expresso em V/K.

Alguns efeitos relacionados ao gradiente de temperatura em uma barra de metal ou material semiconductor

- Mudança no bandgap
- Mudança na concentração dos portadores de carga
- Mudança no nível de Fermi
- Mudança no coeficiente de difusão (mobilidade)
- Termo difusão
- Acúmulo de cargas

# Magnitude do efeito Seebeck

$\Delta V$  de alguns materiais combinados com platina,  
 $T_1=0\text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_2=100\text{ }^\circ\text{C}$

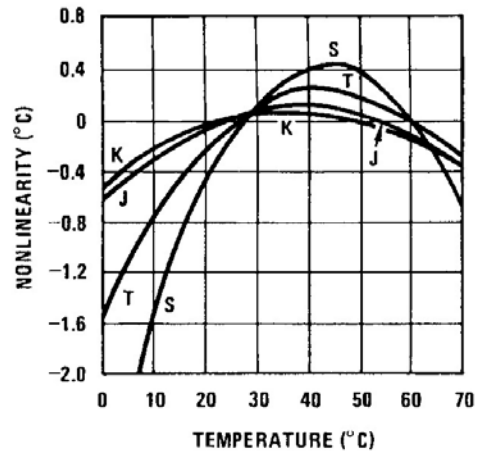
Material	EMF in mV	Material	EMF in mV
Bismuth	-7.34	Indium	+0.69
Nickel	-1.48	Carbon	+0.70
Cobalt	-1.33	Rhodium	+0.70
Mercury	-0.60	Silver	+0.74
Palladium	-0.57	Copper	+0.76
Calcium	-0.51	Zinc	+0.76
Thorium	-0.13	Gold	+0.78
Platinum	0.00	Cadmium	+0.90
Tantalum	+0.33	Tungsten	+1.12
Aluminium	+0.42	Cerium	+1.14
Tin	+0.42	Molybdenum	+1.45
Lead	+0.44	Lithium	+1.82
Magnesium	+0.44	Iron	+1.89
Thalium	+0.58	Antimony	+4.89
Iridium	+0.65		

Fonte: D.E. Gray (ed.), American Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill, New York, 1982, 4.7-4.9

# Termopares padrão

Tipo	Material positivo	Material negativo
E	Cromel	Cosntantan
J	Ferro	Cosntantan
K	Cromel	Alumel
S	Platina 10% Ródio	Platina
T	Cobre	Cosntantan

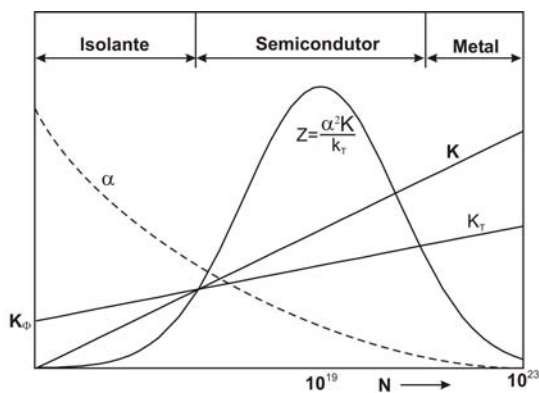
## Não linearidade



$$\Delta T = a_0 + a_1 \Delta V + a_2 \Delta V^2 + \dots + a_n \Delta V^n$$

Fonte: National semiconductors

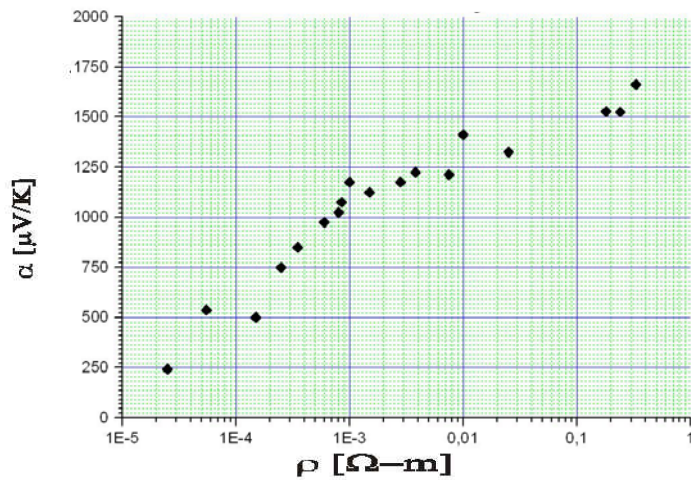
## Efeito Seebeck em materiais diferentes



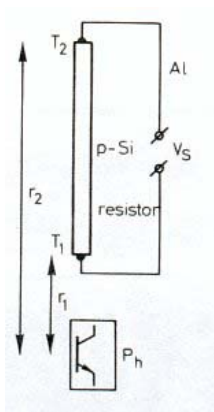
$\alpha$  é o coeficiente de Seebeck  
 $k$  é a condutividade elétrica  
 $k_r$  é a condutividade térmica  
 $N$  é a densidade de portadores

Fonte: W.R. Beam, Electronics of solids, Kogakusha Co Ltd, Tokyo, 1965

## Coeficiente de Seebeck no Si a temperatura ambiente

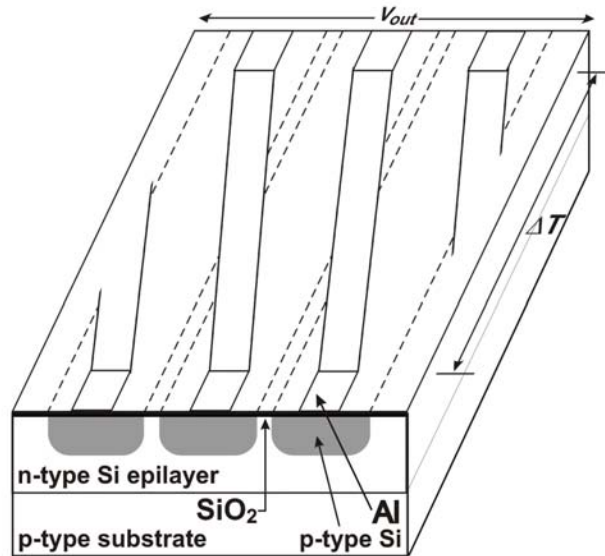


## Efeito Seebeck em circuitos integrados



A tensão termodinâmica devido as junções Si-Al, depende do nível de dopagem do silício, podendo chegar a 1.4 mV/K.

## Termopilhas



## Sensores modulantes resistivos

- RTD (Detector de Temperatura Resistivo)
  - Fabricados em platina, níquel ou níquel-cobre
  - Tecnologia de deposição de filmes em substrato de alumina ou cerâmico
- Termistor (Resistor Térmicamente Sensível)
  - Material semiconductor

## RTD (Resistance-temperature detector)

O exemplo mais comum é o tipo PT 100, que tem uma resistência de  $100 \Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ .

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100) t^3]$$

Sendo que  $R_0 = 100 \Omega$  (para  $t_0 = 100^\circ\text{C}$ )

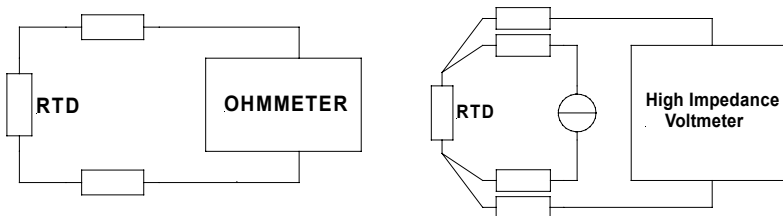
$$A = 3.9083 \text{ E-}3$$

$$B = -5.775 \text{ E-}7$$

$$C = \begin{cases} \text{abaixo de } 0^\circ\text{C} & -4.183 \text{ E-}12 \\ \text{Acima de } 0^\circ\text{C} & \text{zero} \end{cases}$$

## RTD (Resistance-temperature detector)

Efeito dos fios de ligação:





## Sensores modulantes integrados

- Variação da resistência em semicondutores (termistor)
- Variação da tensão de polarização direta em diodos
- Variação da tensão base-emissor em transistores bipolares

## Efeito térmico no semicondutor

Para um semicondutor **intrínseco**, a resistividade pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{1}{\rho} = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

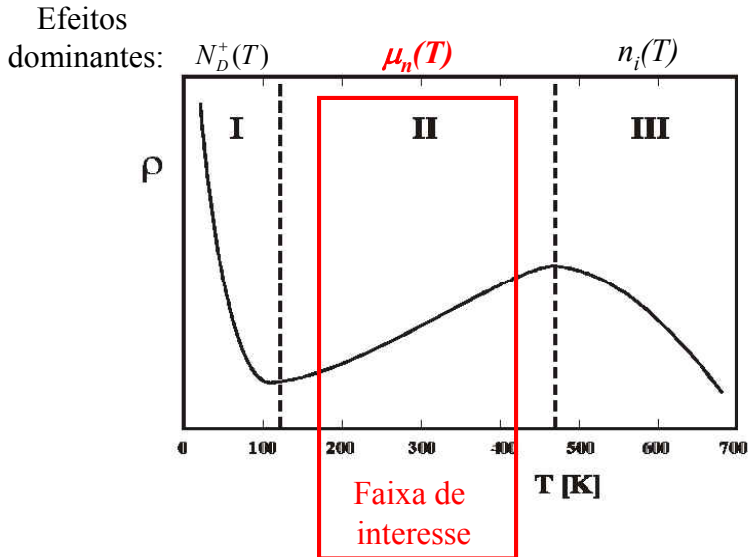
sendo que:

**$n_i$  é a concentração de portadores intrínsecos**

$\mu_n$  e  $\mu_p$  são as mobilidades dos elétrons e lacunas respectivamente.

$$n_i(T), \mu_n(T) \text{ e } \mu_p(T)$$

# Silício extrínseco tipo n



# Resistor integrado

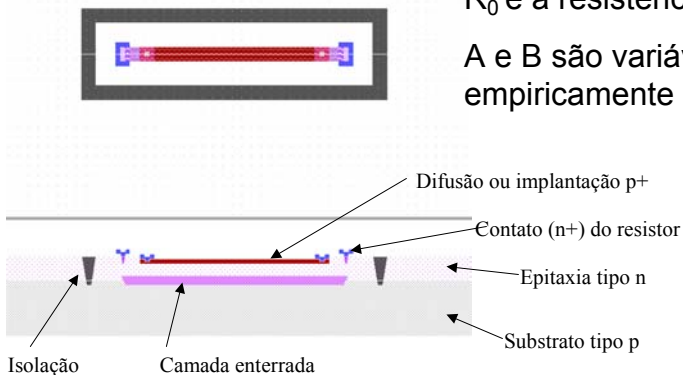
Processo Bipolar

$$R_t = R_0[1 + A(t-t_0) + B(t-t_0)^2]$$

Sendo que:

$R_0$  é a resistência a  $0^\circ\text{C}$

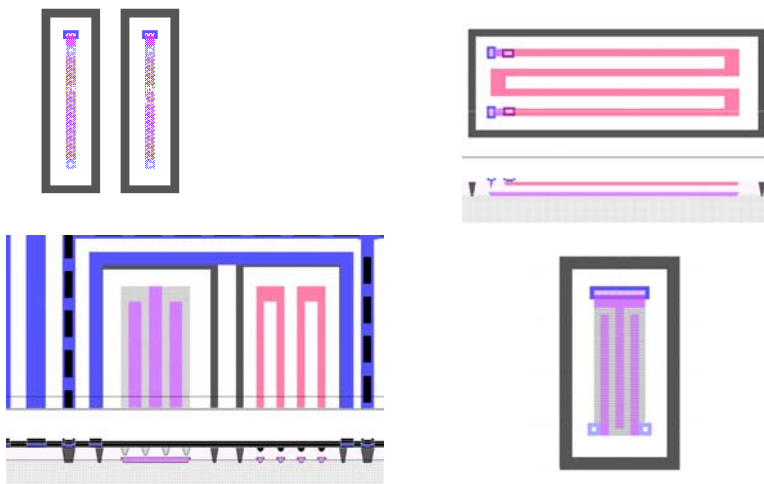
A e B são variáveis medidas empiricamente



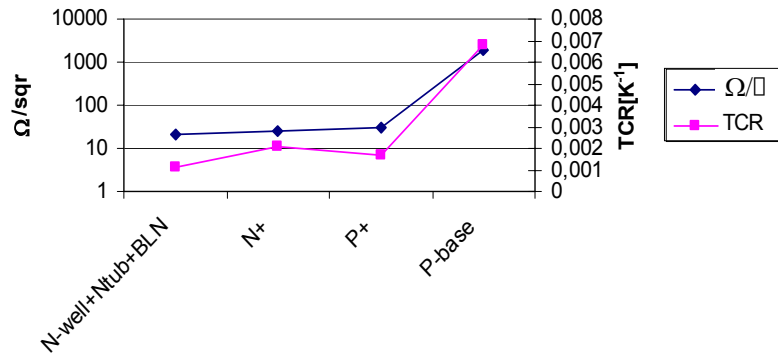
## Limitações tecnológicas

- Valores absolutos apresentam precisão de  $\pm 20\%$ , mas a razão de casamento entre duas resistências é  $\pm 0.1\%$ . Dessa forma os resistores são empregados em forma de ponte.
- Devem ser polarizados convenientemente, mantendo as junções p-n reversamente polarizadas.
- A variação térmica de um resistor semiconductor é fortemente dependente da queda de tensão, e do estresse mecânico

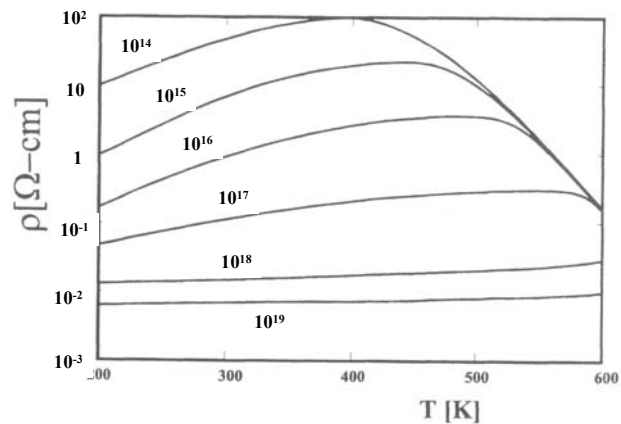
## Alguns exemplos de resistores integrados



## TCR versus resistividade de um processo bipolar



## Resistividade em função da temperatura para níveis de dopagens diferentes



## Outras opções de resistores integrados

- Polissilício
- Filmes finos

Possuem melhor isolamento devido a ausência da junção p-n.

Necessitam de uma camada extra de deposição.

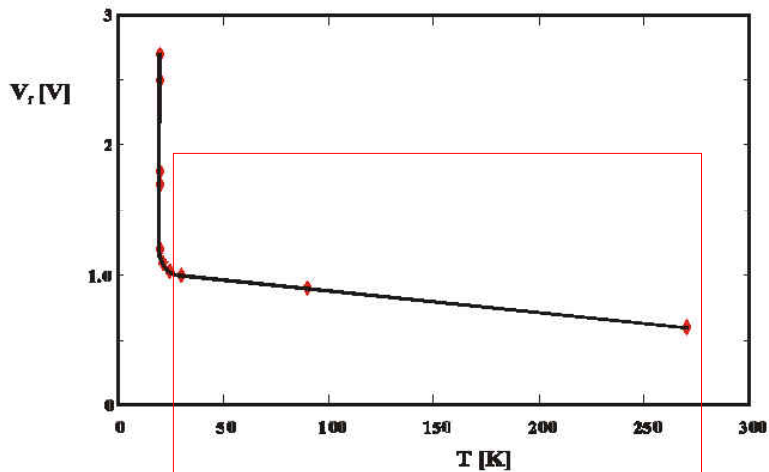
## Polissilício

- Estrutura formada por pequenos cristais com distribuição aleatória, podendo ter um certo número de orientações dominantes.
- Suas características (resistividade, TCR e piezo constantes) são fortemente dependentes do processo de deposição e dopagem.

## Parâmetros de um processo industrial CMOS 1.2 um

	Difusão n+	Difusão p+	Poly	High res. Poly	Metal
Resistência [ $\Omega/\text{sqr}$ ]	25	44	27	2700	0.070
TCR [ $\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ]	1.9	1.9	0.7	-3.3	2.8

## Diodos



Comportamento quase linear a partir de 20 K

## Componentes da corrente para um diodo em polarização direta:

- Corrente de difusão
- Corrente de *leakage* de superfície causada pela recombinação de portadores na superfície
- Componente devido a recombinação na região de depleção, (corrente de geração-recombinação)

As duas últimas, dependem fortemente do processo de fabricação e da geometria do diodo.

## Transistores

A corrente de emissor de um transistor também é composta pelas componentes de difusão, *leakage* de superfície e recombinação.

A corrente de coletor é principalmente constituída pela componente de difusão. Devido a base estreita, as duas outras componentes da corrente de emissor são drenadas para fora pela corrente de base.

Dessa forma, o uso do transistor como sensor de temperatura é normalmente baseado na sua bem definida característica  $I_C$  vs.  $V_{BE}$ .

## Característica $I_C$ vs. $V_{BE}$ de um transistor bipolar

$$I_C = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \cong I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$I_C$  é a corrente de coletor

$V_T$  a tensão termodinâmica =  $k_B T / q$

$k_B$  é a constante de Boltzmann,  $k_B = 1,38062 \times 10^{-23}$  [J/K]

$T$  a temperatura em Kelvin

$q$  a carga do elétron  $1.60 \times 10^{-19}$  [C]

portanto  $V_T$  @ temperatura ambiente = 25 mV

$I_S$  corrente de saturação reversa

Fonte; Sedra & Smith, Microelectronics

## Corrente de saturação reversa $I_S$

$$I_S = \frac{q^2 n_i^2 A_E^2 D_B}{Q_B}$$

$$D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n$$

$$Q_B = q A_E \int_{X_E}^{X_C} p(x) dx$$

Simplificando:

$$Q_{B0} \cong q A_E \int_0^{W_B} N_A(x) dx$$

$$\int_0^{W_B} N_A(x) dx = N_A W_B$$

$$I_S = \frac{q A_E n_i^2 D_n}{N_A W_B}$$

Fonte; Sedra & Smith, Microelectronics



## Efeito da temperatura em $I_S$

$$n_i^2 \propto T^3 \exp(-qV_g / k_B T) \quad D_n = (k_B T / q) \mu_n$$

$$V_g = V_{g0} - \alpha T \quad \mu_n \propto T^{-n}$$

O problema situa-se em modelar a dependência de  $I_S$  com a temperatura

Método sugerido por Meijer:  
Dependência da temperatura em  $I_C(V_{BE})$

$$I_C = CT^\eta \exp \frac{q(V_{BE} - V_{g0})}{k_B T}$$

sendo que:

$V_{g0}$  é a tensão de bandgap extrapolada a 0 K

$C$  é uma constante dependente do processo

$\eta$  é uma constante relacionada a dependência da mobilidade dos portadores minoritários com a temperatura na região de base

Valores empíricos obtidos por Meijer são:

$$V_{g0} = 1166 \text{ mV e } \eta = 3.72$$

Aplicando o resultado anterior e considerando uma temperatura arbitrária  $T$  e uma temperatura de referência específica  $T_r$ , tem-se:

$$V_{BE}(T) = V_{g0} \left( 1 - \frac{T}{T_r} \right) + \frac{T}{T_r} V_{BE}(T_r) - \eta \frac{k_B T}{q} \ln \frac{T}{T_r} + \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_C(T)}{I_C(T_r)} \right)$$

Normalmente  $I_C$  é proporcional a temperatura.:

$$I_C \propto T^m$$

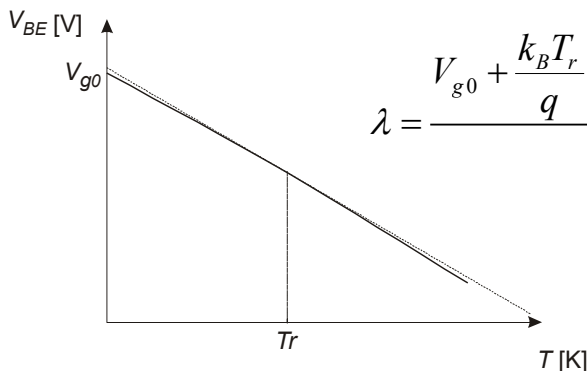
Fazendo  $m=1$  (diretamente proporcional), tem-se:

$$V_{BE}(T) = V_{g0} \left( 1 - \frac{T}{T_r} \right) + \frac{T}{T_r} V_{BE}(T_r) - (\eta - m) \frac{k_B T}{q} \ln \frac{T}{T_r}$$

Ref: G.C.M.Meijer and K. Vingerling, IEEE JSSC, vol. Sc15, n2, April 1980

## $V_{BE}$ versus temperatura

$$V_{BE}(T) = \left[ V_{g0} + (\eta - m) \frac{k_B T_r}{q} \right] - \lambda T + (\eta - m) \frac{k_B}{q} \left( T - T_r - T \ln \frac{T}{T_r} \right)$$



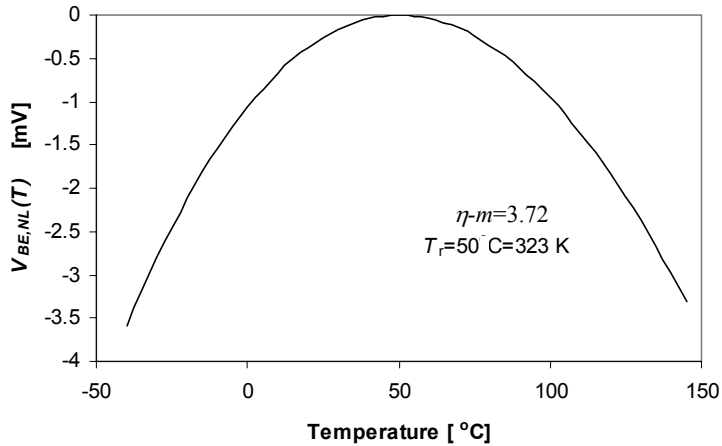
$$\lambda = \frac{V_{g0} + \frac{k_B T_r}{q} (\eta - m) - V_{BE}(T_r)}{T_r}$$

Ref: G.C.M.Meijer and K. Vingerling, IEEE JSSC, vol. Sc15, n2, April 1980

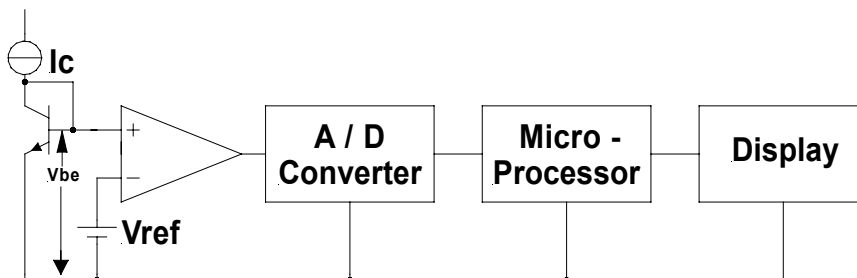
## Exemplo considerando:

$$V_{g0} = 1166 \text{ mV} \quad \eta = 3.72 \quad T_r = 323 \text{ K} \quad V_{BE}(T_r) = 630 \text{ mV} \quad m = 0$$

### Termo não linear



## Sistema sensor de temperatura usando um único transistor como elemento sensor



# Comparação

<b>Propriedade</b>	<b>Resistor PT</b>	<b>Termistor</b>	<b>Termopar</b>	<b>Transistor</b>
<b>Formato da Saída</b>	Resistência	Resistência	Tensão	Tensão
<b>Faixa de Operação (°C)</b>	Grande -260 a +1000	Média -80 a +180	Muito grande -270 a +3500	Média -50 a +180
<b>Sensibilidade</b>	Média 0,4% / K	Alta 5% / K	Baixa 0,05 a 1mV / K	Alta ~2mV / K
<b>Linearidade</b>	Muito Boa < ±0,1K	Muito Não-Linear	Boa ±1K	Boa ± 1K
<b>Exatidão: - Absoluta</b>	Alta em ampla faixa	Alta em estreita faixa	Não é possível	Média
<b>- Diferencial</b>	Média	Média	Alta	Média
<b>Custo para Adequação em CI</b>	Médio - Não é um processo padrão	Baixo - Não é um processo padrão	Média Sim	Muito Baixo Sim, muito facilmente