# Instrumentación Electrónica

## Sensores de magnitud física

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

# Sensores de magnitud física
## Índice


- Lección 0. Objetivos del tema.
- Lección 1. Sensores de temperatura por contacto.
  - Introducción.
  - Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Termistores NTC.
  - Unión semiconductora.
  - Termopares.
- Lección 2. Medida de temperatura sin contacto.
  - Principios de radiación térmica.
  - Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Aplicaciones.
  - Sensores de radiación infrarroja.
- Lección 3. Sensores de fuerza.
  - Introducción.



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Analizar los principios físicos asociados a la medida de temperatura y fuerza.
- Estudiar el modo de funcionamiento de diferentes dispositivos utilizados en la medida de temperatura.
- Estudiar el modo de funcionamiento de las galgas extensométricas.
- Proponer y analizar diferentes circuitos de acondicionamiento empleados en los sensores estudiados.
- Introducir el cálculo de error en la medida mediante el análisis de los parámetros reales de los dispositivos.
- Capacitar para la síntesis de sistemas de medida de magnitudes físicas.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

# Índice


- Lección 0. Objetivos del tema.
- Lección 1. Sensores de temperatura por contacto.
  - Introducción.
  - Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Termistores NTC.
  - Unión semiconductora.
  - Termopares.
- Lección 2. Medida de temperatura sin contacto.
- Lección 3. Sensores de fuerza.
- Referencias y bibliografía.


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Introducción.
  - Temperatura: representa la capacidad de un cuerpo para comunicar calor a otros cuerpos y cuantifica el grado de agitación de sus moléculas (energía cinética). Unidades de medida y equivalencias:

$$^{o}C = \frac{5}{9}(^{o}F - 32) \qquad K = ^{o}C + 273.15$$

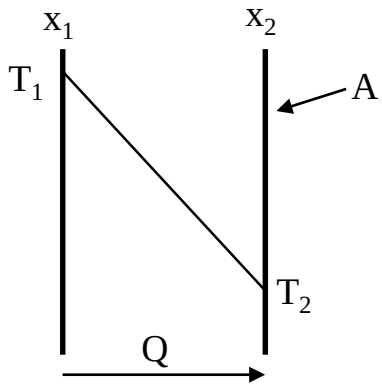
  - Capacidad calorífica o calor específico: cantidad de calor que debe suministrarse a un cuerpo de masa 1Kg, para elevar su temperatura 1 Kelvin. Unidades de medida J/(Kg·K).
  - Transferencia de calor: en un sistema en el que las moléculas de los diferentes cuerpos o fluidos se encuentren con distintos grados de agitación térmica, se producen flujos de energía calorífica hasta alcanzar el equilibrio térmico. Estos flujos o transferencias pueden ser de tres tipos:
    - *Conducción.*
    - *Convección.*

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Introducción.
  - Conducción térmica: Mecanismo de transferencia que consiste en la propagación de calor entre dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo a diferentes temperaturas, debido a la agitación térmica de las moléculas, no existiendo un desplazamiento real de estas. Está gobernada por la ley de Fourier.




Distribución de temperatura en régimen permanente.

$$Q = -kA\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}(W)$$

Q: potencia transferida
k: conductividad térmica (W/m·K)
A: superficie ($m^2$)

Diamante: k=1000W/m·K
Cobre: k=400W/m·K
Aluminio: k=230W/m·K
Acero inoxidable: k=12W/m·K
Cristal: k=1W/m·K
Plástico: k=0.15 a 0.5W/m·K
Madera: k=0.15W/m·K
Aislantes: k=0.03 a 0.04W/m·K
Aire: k=0.024W/m·K

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

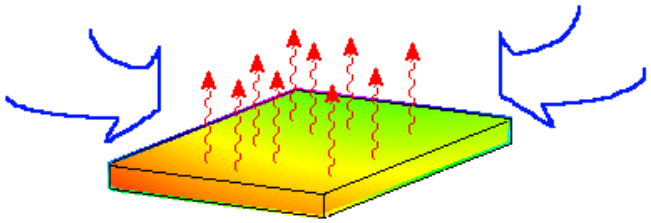
- Introducción.
  - Convección térmica: Transmisión de calor con movimiento real de las moléculas de una sustancia. Este fenómeno solo se da en fluidos como consecuencia de la mezcla entre sus masas. El movimiento en los fluidos provoca el desplazamiento de las partículas de forma que el calor se transporta sin interrumpir la continuidad física. Está gobernada por la ley de enfriamiento de Newton.
    - ***Convección natural:*** la velocidad del fluido viene marcada únicamente por la temperatura de la superficie.
    - ***Convección forzada:*** la velocidad del fluido es marcada por un mecanismo externo (ventiladores, bombas, etc.).

$$Q = hA(T_S - T_f)(W)$$

Q: potencia transferida

h: coef. Convección (W/m$^2$)

depende de muchos factores

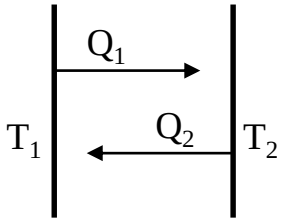


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Introducción.

- Radiación térmica. Transmisión de calor entre cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas mediante la radiación de ondas electromagnéticas. Se produce sin que exista contacto entre ellos. Está gobernada por la ley de Stefan-Boltzmann.

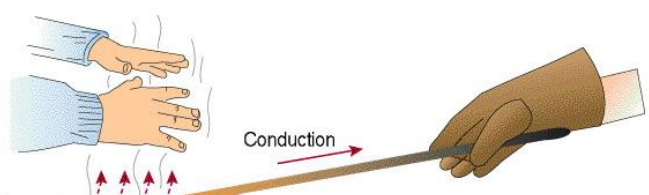



Intercambio de energía entre superficies por radiación.

Si ambas superficies son cuerpos negros (máxima emisión):

$$Q_1 - Q_2 = \sigma(T_1^4 - T_2^4)(W/m^2)$$

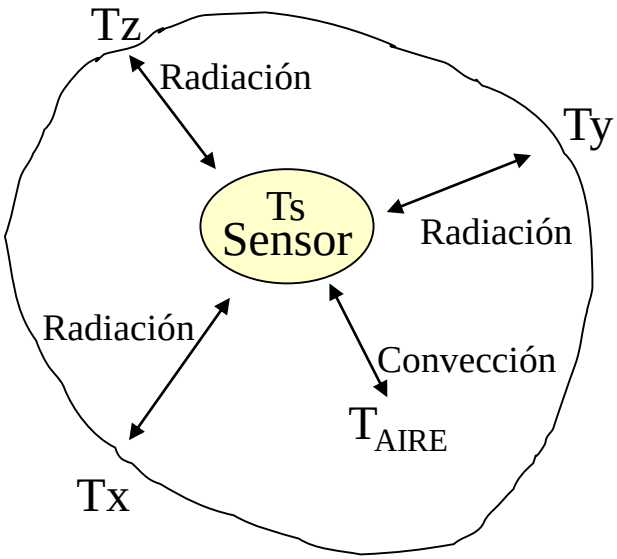
$Q_1$-$Q_2$: potencia neta transferida de superficie 1 a superficie 2.
$T_1$ y $T_2$: temperaturas de las superficies en Kelvin
$\sigma$: cte. Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8}$ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)



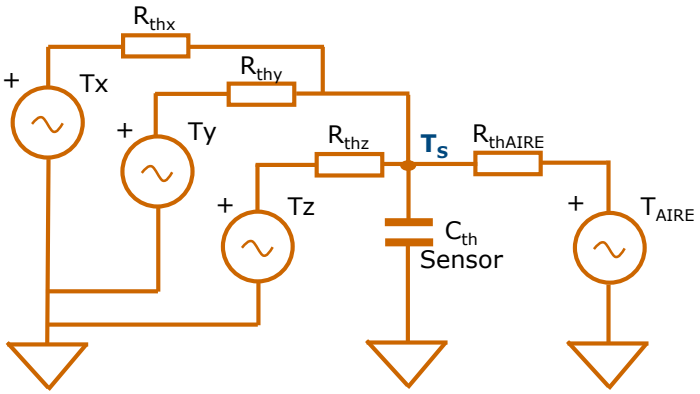

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Introducción.
  - Ejemplo: Medida de la temperatura de un fluido ($T_{AIRE}$).




Tx, Ty, Tz: temperaturas de las superficies del entorno.
Ts: temperatura del sensor (temperatura estimada).
Ts=f(Tx, Ty, Tz, $T_{AIRE}$)



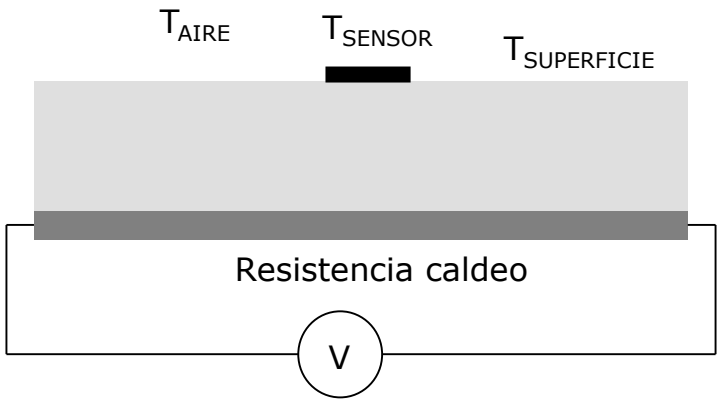

Para determinar con alta exactitud la temperatura del aire es necesario minimizar el intercambio energético por radiación y maximizar el de convección:

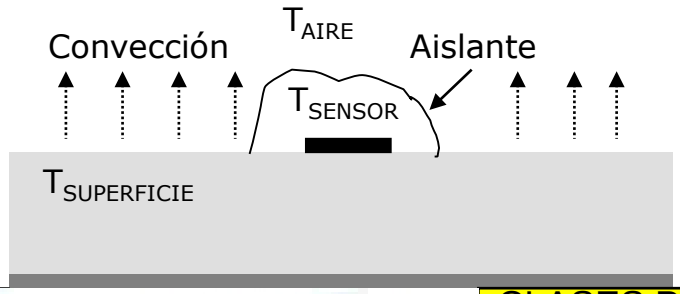
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Introducción.

- Ejemplo: Temperatura de una superficie.




- La temperatura del sensor está marcada por la temperatura de la superficie (conducción) y por la temperatura del aire (convección).
  La temperatura de la superficie a medir también.

- El aislante térmico reduce el mecanismo de convección, por lo que incrementa la temperatura de la superficie aislada respecto al resto.
  No debe usarse aislante térmico.

- Soluciones:
  - Sensor con baja resistencia térmica con la superficie y tamaño reducido (poco invasivo).
  - Medida sin contacto por infrarrojos (no

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

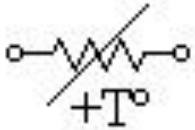
- Introducción.
  - Métodos transductores habituales para la medida de temperatura:
    - *Variación del volumen o del estado de los cuerpos:*
      - Dilatación de sólidos: bimetales.
      - Dilatación de líquidos: termómetros de mercurio.
      - Cambio de color: pinturas termosensibles.
    - *Variación de la resistencia eléctrica:*
      - Materiales conductores: RTD.
      - Materiales semiconductores: NTC.
    - *Variación de la tensión en una unión p-n.*
    - *Fuerza electromotriz generada en la unión de dos materiales:*
      - Conductores o semiconductores: termopares.
    - *Captación de la radiación Electromagnética.*
      - Cambio de temperatura del sensor: pirómetros térmicos.

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - RTD "*Resistance Temperature Detector*". La resistividad de un material conductor se incrementa al hacerlo la temperatura, siguiendo una variación aproximadamente lineal. La resistencia de un RTD se puede modelar con la siguiente expresión, donde: Ro, resistencia a 0ºC; T, temperatura en ºC y $\alpha$, coeficiente de temperatura (positivo) en ºC$^{-1}$.

$$R(T) = Ro(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \ldots) \cong Ro(1 + \alpha T)$$




  - Exactitud de la aproximación lineal. Depende de:
    - *Margen de temperatura utilizado.*
    - *Linealidad del material conductor*.

    Si es necesario, se utilizan aproximaciones no lineales a la función R(T).
  - Características deseadas de los materiales:
    - *Elevado coeficiente de temperatura* $\Rightarrow$ α↑: alta sensibilidad.
    - *Elevada resistividad* $\Rightarrow$ Ro↑: reducido tamaño y menor efecto de cables.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Materiales conductores utilizados. Principalmente:
    - *Níquel:* alta sensibilidad y bajo precio.
    - *Platino:* alta linealidad, alta estabilidad y elevado margen de temperatura. Es el mas utilizado, recibiendo la denominación comercial:
      - Pt100: RTD de platino con Ro=100Ω.
      - Pt1000: RTD de platino con Ro=1000Ω.
      - Otras con Ro típicamente entre 25 y 1000Ω.
      - También se denominan PRT, termorresistencias…
  - Características de los RTD de platino.
    - *Coeficiente de temperatura:* típicamente $\alpha$=0.00385ºC$^{-1}$. Otros valores, por ejemplo 0.003916ºC$^{-1}$, según normas y aplicación.
    - Margen de temperatura: -200ºC a 850ºC (existen elementos que lo superan).
    - *Tolerancia*: establecida por la clase según norma. Por ejemplo:
      - *DIN clase B (1 DIN): Error máximo ±0.3±0.005·T (ºC)*

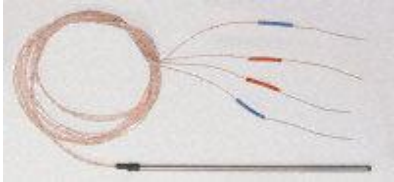
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

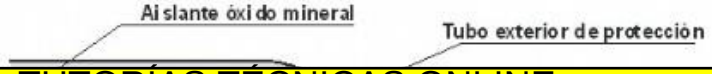
- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Métodos constructivos.
    - *Influyen en:*
      - Margen de temperatura de funcionamiento.
      - Velocidad de respuesta.
      - Estabilidad frente al medio.
      - Medida en superficies o en fluidos.
    - *Podemos encontrar:*
      - Aislados por mica.
      - Sellados en vidrio.
      - Sellados en cerámica.
      - Impresos en sustrato
      - ...

De contacto

Adhesivo de contacto



Sonda para inmersión



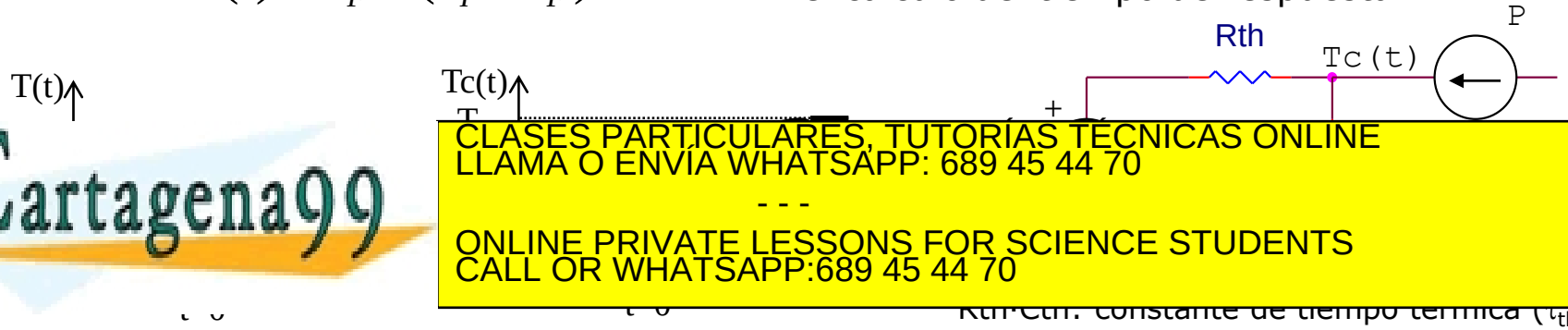

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Error por auto-calentamiento (selft-heating). Para medir la resistencia es necesario hacer circular una corriente por el dispositivo ⇒ disipación de calor ⇒ incremento de temperatura ⇒ error en la medida: Error=$\Delta$T= R(T)·$I^2$·Rth, con Rth: resistencia térmica del RTD (ºC/W).
  - Equivalente térmico y tiempo de respuesta. Es habitual aproximarlo a un sistema de primer orden, caracterizado por:
    - *Rth: resistencia térmica (ºC/W). Depende del entorno de funcionamiento (aire quieto o no, agua, aceite, etc.).*
    - *Cth: capacidad térmica (J/ºC). Condiciona el tiempo de respuesta.*
    - *P: potencia disipada por la polarización del RTD.*

$$Tc(t) = T_F + (T_I - T_F)e^{\frac{-t}{Rth \cdot Cth}}$$

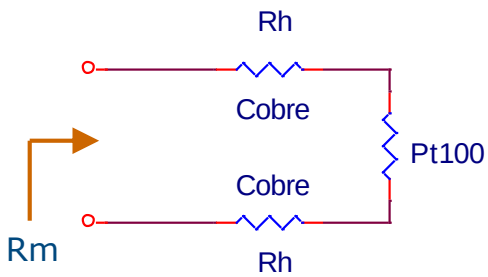
Puede aproximarse P constante para el cálculo del tiempo de respuesta.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Error por la resistencia de los cables. La resistencia medida por el sistema electrónico es la del RTD mas la de los cables que lo unen al circuito. Como la resistencia del RTD no es muy elevada, la de los cables puede introducir un error importante. La calibración del sistema elimina inicialmente su efecto, pero la sustitución de cables o la variación de la temperatura a la que estos están sometidos, introducirá un error.




$$Rm = 2 \cdot Rh + R(T)$$

$$Rm = 4.25\Omega + R(T)$$

**Datos**:
Cable: AWG28(Φ=0.32mm), L=10m
CT(cobre)=0.425%/ºC
CT(Pt100)=0.385%/ºC

**Ejemplo:**
Error inicial por Rh: 4.25Ω/(0.385Ω/ºC)=10.9ºC
Error por CT(cobre): (4.25Ω·0.425%/ºC)/(0.385Ω/ºC)=0.047ºC/ºC. Por cada ºC que cambia la temperatura de los cables se introduce un error en la medida de 0.047ºC

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Error por la tolerancia del RTD. Valores básicos y tolerancias límite, según norma, para platino y níquel.

| | Valores básicos | | | | Tolerancias límite | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Elementos RTD de platino según DIN IEC 751 | | Elementos RTD de níquel según DIN 43760 | | Elementos RTD de platino según DIN IEC 751 | | | | Elementos RTD de níquel según DIN 43760 | |
| | | | | | Clase A | | Clase B | | | |
| °C | Ohmios | Ohmios/K | Ohmios | Ohmios/K | Ohmios | Corresp. °C | Ohmios | Corresp. °C | Ohmios | Corresp. °C |
| –200 | 18,49 | 0,44 | ±0,24 | ±0,55 | ±0,56 | ±1,3 | | | | |
| –100 | 60,25 | 0,41 | ±0,14 | ±0,35 | ±0,32 | ±0,8 | | | | |
| –60 | | | 69,5 | 0,47 | – | | | | ±1,0 | ±2,1 |
| 0 | 100,0 | 0,39 | 100,0 | 0,55 | ±0,06 | ±0,15 | ±0,12 | ±0,3 | ±0,2 | ±0,4 |
| 100 | 138,5 | 0,38 | 161,8 | 0,69 | ±0,13 | ±0,35 | ±0,30 | ±0,8 | ±0,8 | ±1,1 |
| 200 | 175,84 | 0,37 | 240,7 | 0,90 | ±0,20 | ±0,55 | ±0,48 | ±1,3 | ±1,6 | ±1,8 |
| 250 | | | 289,2 | 1,04 | | | | | ±2,3 | ±2,1 |
| 300 | 212,02 | 0,35 | | | ±0,27 | ±0,75 | ±0,64 | ±1,8 | | |
| 400 | 247,04 | 0,34 | | | ±0,33 | ±0,95 | ±0,79 | ±2,3 | | |
| 500 | 280,90 | 0,33 | | | ±0,38 | ±1,15 | ±0,93 | ±2,8 | | |
| 600 | 313,59 | 0,33 | | | ±0,43 | ±1,35 | ±1,06 | ±3,3 | | |

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Error por linealidad. Para obtener el error de linealidad como consecuencia de interpretar linealmente la función de transferencia del RTD, podemos utilizar la siguiente aproximación, de Callendar-Van Dusen, a la respuesta real de un RTD de platino.

$$R(t) = Ro\left(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t-100) \cdot t^3\right)$$

| Standard | Temperature Coefficient (α) | A | B | C* |
|---|---|---|---|---|
| DIN 43760 | 0.003850 | $3.9080 \times 10^{-3}$ | $-5.8019 \times 10^{-7}$ | $-4.2735 \times 10^{-12}$ |
| American | 0.003911 | $3.9692 \times 10^{-3}$ | $-5.8495 \times 10^{-7}$ | $-4.2325 \times 10^{-12}$ |
| ITS-90 | 0.003926 | $3.9848 \times 10^{-3}$ | $-5.870 \times 10^{-7}$ | $-4.0000 \times 10^{-12}$ |

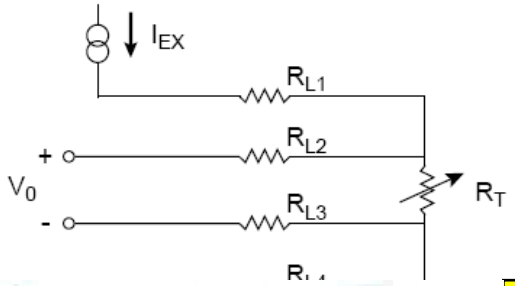
* For temperatures below 0° C only; C = 0.0 for temperatures above 0° C.

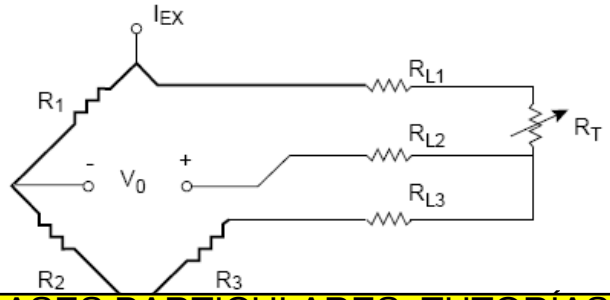
**Ejemplo:** Error de linealidad máximo de un Pt100 según norma DIN en el margen de 0 a 200ºC si tomamos α=0.385%/ºC.

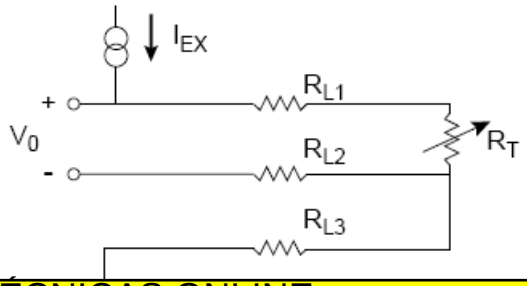
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Resistores dependientes de la temperatura RTD.
  - Error por derivas temporales. Dependen de la calidad del dispositivo, pero para el platino pueden estar en el entorno de ±0.05ºC/año si está sometido a amplios rangos de temperatura, y ±0.05ºC/5años para rangos menos exigentes.
  - Error por deformaciones mecánicas. Cuando un RTD es adherido a una superficie para medir su temperatura, las posibles deformaciones de la superficie se pueden transferir al RTD y producir una variación de resistencia y por lo tanto un error. La selección del encapsulado y del método de fijación, es fundamental para reducir estos efectos.
  - Conexión de un RTD para reducir el error por los cables.



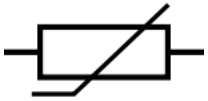

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termistores NTC.
  - NTC "*Negative Temperature Coefficient*". Un termistor NTC es un sensor de temperatura resistivo que presenta un coeficiente de temperatura negativo y que está construido con materiales semiconductores. Su función de transferencia es no lineal y se puede aproximar con un error inferior a ±0.02ºC en un margen de unos 200ºC mediante la ecuación de Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} \cong a + b \cdot \ln R_T + c \cdot (\ln R_T)^3$$

T: temperatura en Kelvin
$R_T$: resistencia del NTC en Ω
Los coeficientes a, b y c dependen del dispositivo



  - Función de transferencia simplificada. La ecuación de Steinhart-Hart se suele aproximar, para interpretar la temperatura del NTC, mediante la expresión indicada mas abajo, donde $R_{TO}$ es la resistencia del NTC a la temperatura $T_O$ (normalmente 298.15K, 25ºC), B es un coeficiente que depende del NTC y $\alpha_R$ es el coeficiente de temperatura del NTC deducido de la función de transferencia:

$$\frac{1}{T} \simeq \frac{1}{T_O} + \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{R_T}{R_{TO}} \qquad R_T = R_{TO} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_O}\right)} \qquad \alpha_R = \frac{1}{R_T}\frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}\,(^{o}C^{-1})$$

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

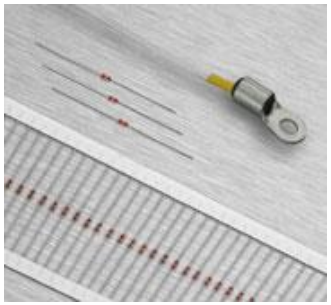
- Termistores NTC.
  - Características eléctricas.
    - *$\alpha_R$: entre el 1% y el 6% según la temperatura considerada.*
    - *$R_{25ºC}$: entre 100Ω y 10MΩ.*
    - *Margen de temperatura: entre –150ºC y 250ºC.*
    - *Tolerancia $T(R_{25ºC})$: entre 5% y 25%.*
    - *Tolerancia T(B): entre 0.5% y 5%.*
  - Intercambiabilidad. Algunas aplicaciones pueden requerir un NTC calibrado, de forma que las medidas sean mas exactas o que, si es necesario, el NTC pueda ser sustituido por otro dispositivo sin volver a calibrar el sistema de medida. La tabla muestra la oferta de un fabricante:

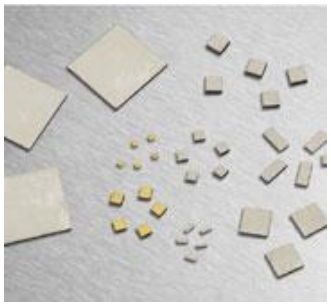
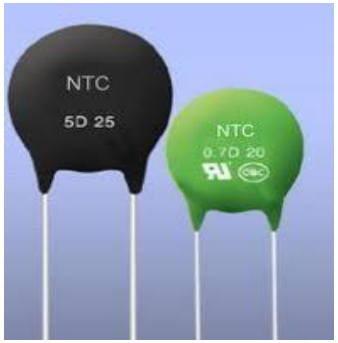
| TABLE IV Calibration Schedule | Resistance Accuracy | Temperature Accuracy (±ºC) for ranges shown | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | -140ºC -80ºC | -80ºC 0ºC | 0ºC +60ºC | +60ºC +125ºC | +125ºC +260ºC |
| 1 | 0.005% | - | - | 0.001ºC | - | - |
| 1A | 0.005% | - | 0.003ºC | 0.003ºC | 0.003ºC | - |

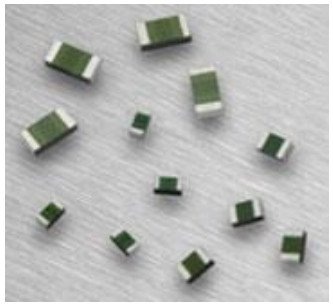
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termistores NTC.
  - Tipos NTC.



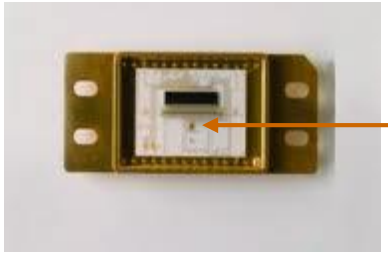





CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termistores NTC.
  - Comparación NTC vs RTD.
    - *Sensibilidad NTC mucho mas elevada (3-15 veces, según temperatura): esto permite detectar variaciones mas pequeñas de temperatura aun con una electrónica de acondicionamiento de menor calidad.*
    - *Resistencia NTC sensiblemente superior. No se producen errores importantes por la resistencia de los cables de conexión al circuito.*
    - *Menor tamaño. Reducido tiempo de respuesta, poco invasivo y posibilidad de integración en otros dispositivos.*




    - *Menor precio.*
    - *Menor exactitud. Aunque puede se bastante alta si se utiliza una aproximación adecuada a su ley de variación de resistencia y una calibración.*

Cartagena99

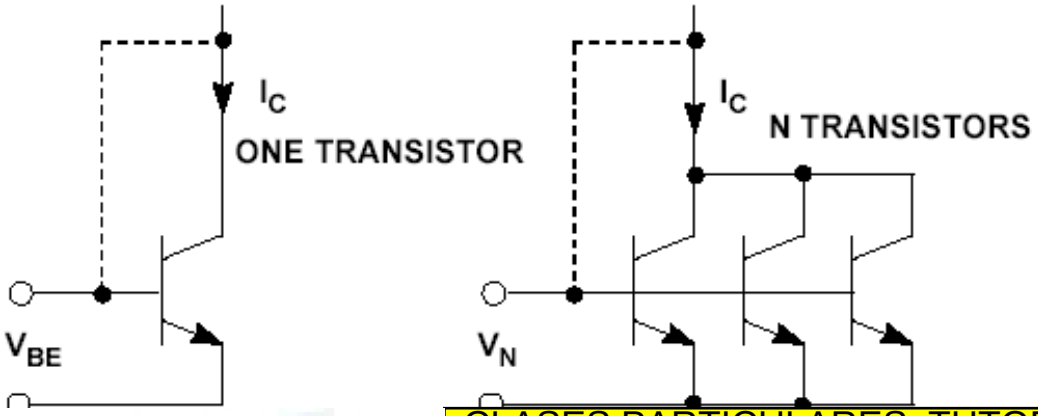
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Principio de funcionamiento. Basados en la variación con la temperatura de la tensión $V_{BE}$ de los transistores bipolares.

k: cte. de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
T: temperatura en Kelvin.
q: carga del electrón ($1.6 \times 10^{-19}$ C)
Ic: corriente de colector.
Is: corriente de saturación (f(T)).

**PROBLEMA:** *Is* depende fuertemente de la temperatura y se conoce con poca exactitud, resultando una expresión poco lineal y con alta incertidumbre.



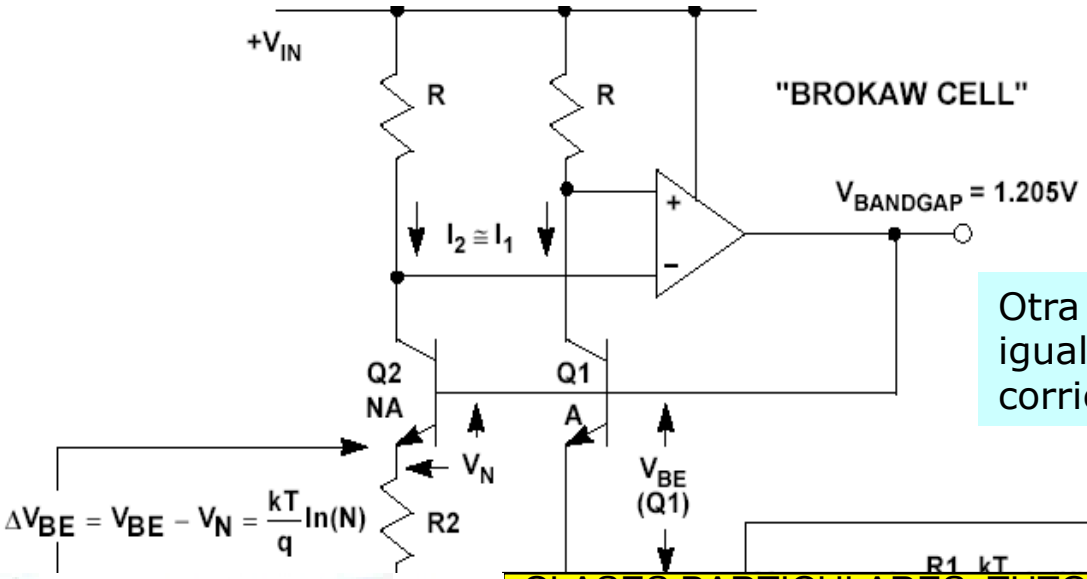

$$V_{BE} \cong \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{Ic}{Is}\right)$$

$$V_N \cong \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{Ic}{N \cdot Is}\right)$$

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Principio de funcionamiento. Una forma de solucionar los problemas anteriores es implementar un circuito que obtenga $V_{BE}$-$V_N$, tal y como se muestra en la figura. Ahora, la expresión es lineal y el valor de N se puede conocer con exactitud. El circuito proporciona además una tensión de referencia $V_{BANDGAP}$.

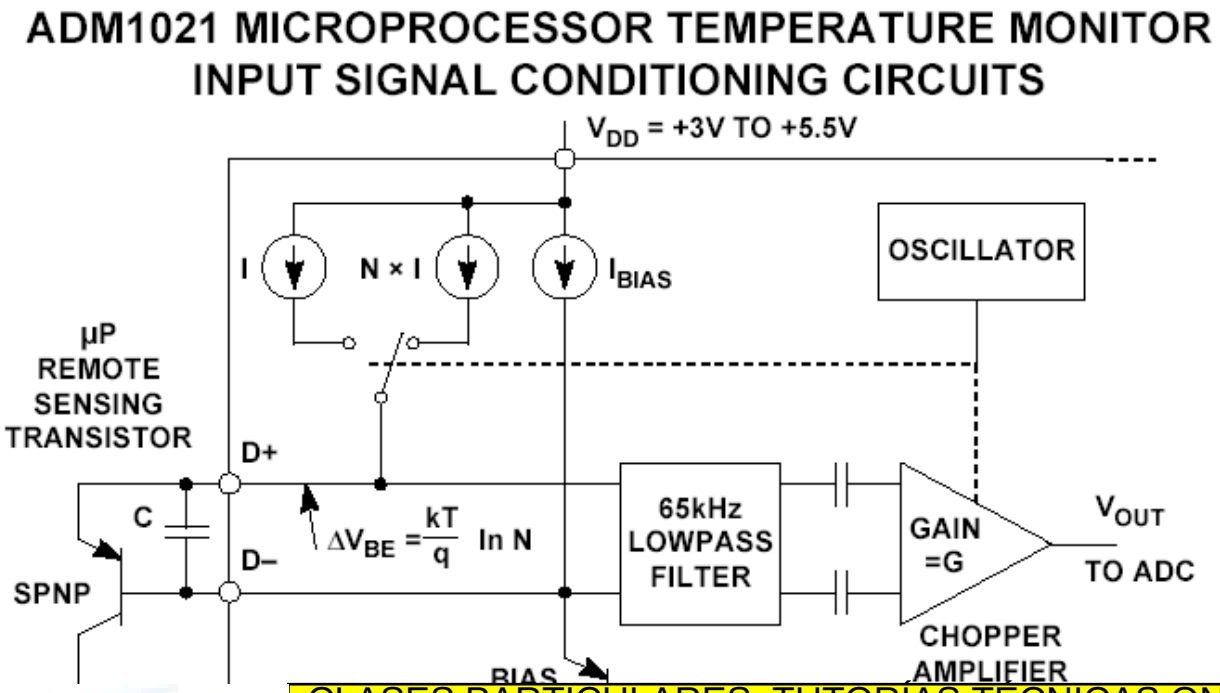



Otra solución es usar 2 transistores iguales y una relación "N" entre sus corrientes de colector.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

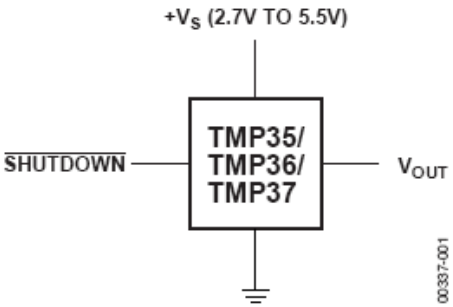
- Sensores de unión semiconductora.
  - Principio de funcionamiento. En la figura se indica otra posibilidad basada en un único transistor y un circuito de demodulación.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Circuitos comerciales analógicos.




$V_S$ = 2.7 V to 5.5 V, −40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C, unless otherwise noted.

Table 1.

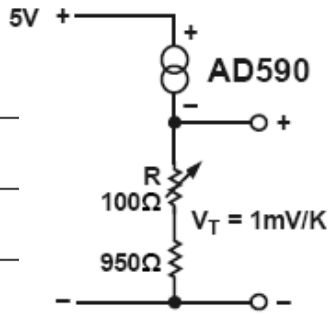
| Parameter[1] | Symbol | Test Conditions/Comments | Min | Typ | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ACCURACY | | | | | | |
| TMP35/TMP36/TMP37 (F Grade) | | $T_A$ = 25°C | | ±1 | ±2 | °C |
| TMP35/TMP36/TMP37 (G Grade) | | $T_A$ = 25°C | | ±1 | ±3 | °C |
| TMP35/TMP36/TMP37 (F Grade) | | Over rated temperature | | ±2 | ±3 | °C |
| TMP35/TMP36/TMP37 (G Grade) | | Over rated temperature | | ±2 | ±4 | °C |
| Scale Factor, TMP35 | | 10°C ≤ $T_A$ ≤ 125°C | | 10 | | mV/°C |
| Scale Factor, TMP36 | | −40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 10 | | mV/°C |
| Scale Factor, TMP37 | | 5°C ≤ $T_A$ ≤ 85°C | | 20 | | mV/°C |
| | | 5°C ≤ $T_A$ ≤ 100°C | | 20 | | mV/°C |
| | | 3.0 V ≤ $V_S$ ≤ 5.5 V | | | | |
| Load Regulation | | 0 µA ≤ $I_L$ ≤ 50 µA | | | | |
| | | −40°C ≤ $T_A$ ≤ +105°C | | 6 | 20 | m°C/µA |

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Circuitos comerciales analógicos.



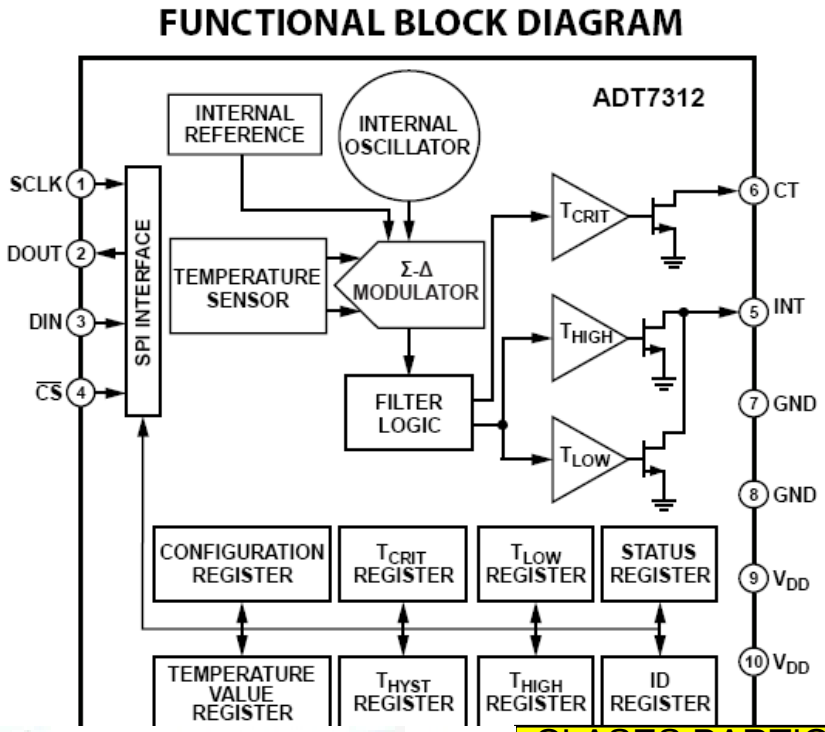

| Parameter | AD590J Min | AD590J Typ | AD590J Max | AD590K Min | AD590K Typ | AD590K Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| POWER SUPPLY | | | | | | | |
| Operating Voltage Range | 4 | | 30 | 4 | | 30 | V |
| OUTPUT | | | | | | | |
| Nominal Current Output @ 25°C (298.2K) | | 298.2 | | | 298.2 | | µA |
| Nominal Temperature Coefficient | | 1 | | | 1 | | µA/K |
| Calibration Error @ 25°C | | | ±5.0 | | | ±2.5 | °C |
| Absolute Error (Over Rated Performance Temperature Range) | | | | | | | |
| Without External Calibration Adjustment | | | ±10 | | | ±5.5 | °C |
| With 25°C Calibration Error Set to Zero | | | ±3.0 | | | ±2.0 | °C |
| Nonlinearity | | | | | | | |
| For TO-52 and FLATPACK Packages | | | ±1.5 | | | ±0.8 | °C |
| For 8-Lead SOIC Package | | | ±1.5 | | | ±1.0 | °C |
| Repeatability[2] | | | ±0.1 | | | ±0.1 | °C |
| Long-Term Drift[3] | | | ±0.1 | | | ±0.1 | °C |
| Current Noise | | 40 | | | 40 | | pA/√Hz |
| Power Supply Rejection | | | | | | | |
| 4 V ≤ $V_S$ ≤ 5 V | | 0.5 | | | 0.5 | | µA/V |
| 5 V ≤ $V_S$ ≤ 15 V | | 0.2 | | | 0.2 | | µV/V |

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Circuitos comerciales digitales.



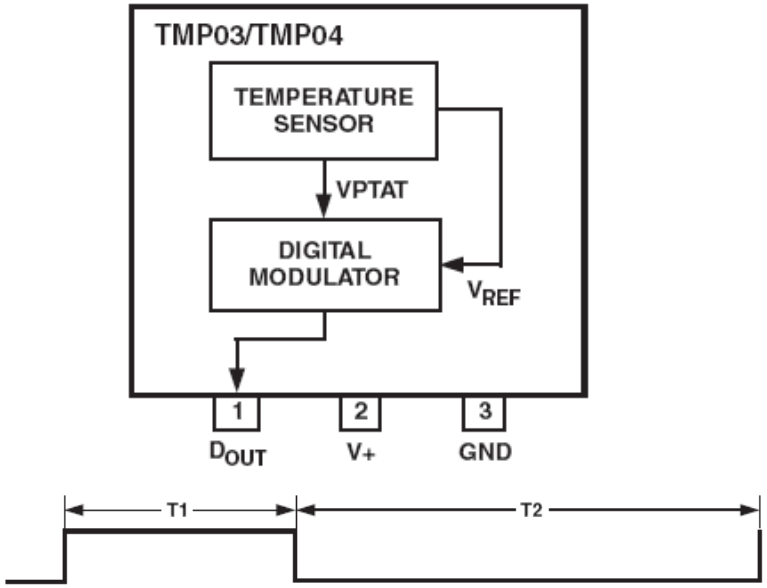
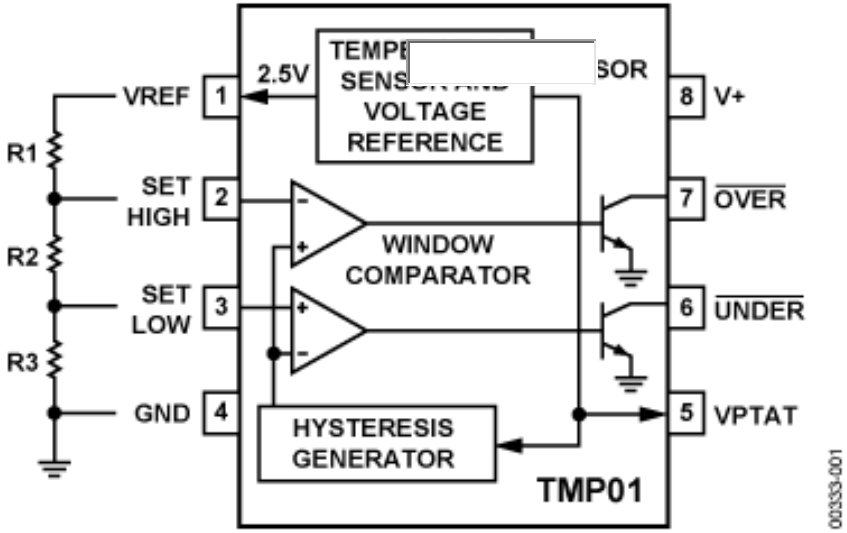



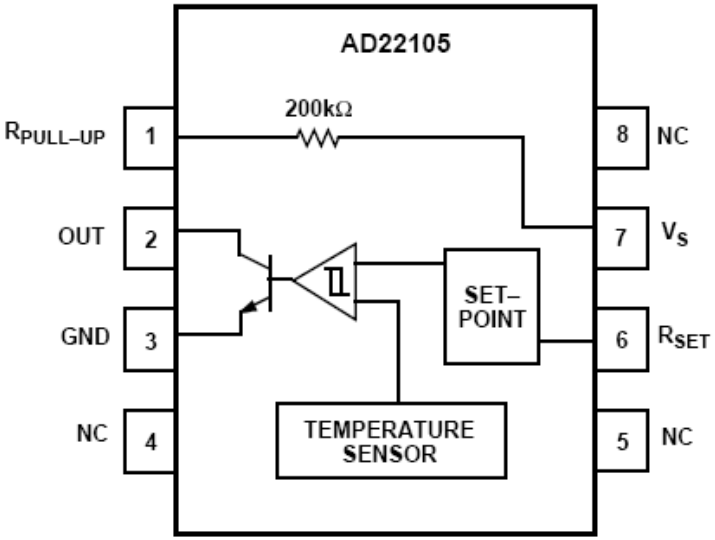

*Figure 2. TMP03 Output Format*

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de unión semiconductora.
  - Circuitos comerciales termostatos.



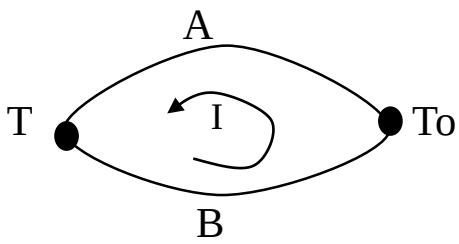




Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Efectos termoeléctricos:
    - *Efecto Seebeck.* Si en un circuito formado por la unión de dos metales, establecemos una diferencia de temperatura entre las uniones, se genera una corriente eléctrica. Esto es debido a la generación de un campo eléctrico, que es función de la temperatura, como consecuencia de la difusión de electrones. Si abrimos el circuito se mide una diferencia de potencial que depende de las características de los metales.




La relación entre la tensión medida y la diferencia de temperaturas es aproximadamente lineal y dada por $\alpha_{AB}$ *(coeficiente Seebeck)*.
<u>El efecto Seebeck es el principio de funcionamiento de un termopar.</u>

- *Efecto Peltier*. El efecto Seebeck es reversible, esto es, si en un circuito formado por la unión de dos metales establecemos una corriente eléctrica, una

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Efectos termoeléctricos.
    - *Efecto Thomson.* Si en un conductor se establece una diferencia de temperatura entre dos puntos, se genera un potencial eléctrico entre ellos que es función de la diferencia de temperatura y el tipo de material. Inversamente, si una corriente eléctrica circula por un conductor que presenta un gradiente térmico, se produce un flujo de calor que es función del sentido y magnitud de la corriente, y del tipo de material.
  - Relación entre efectos termoeléctricos.

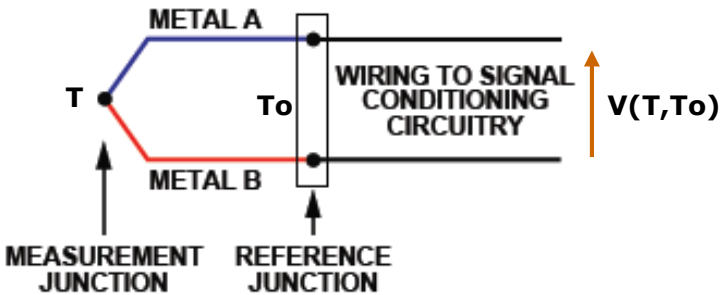
    Los efectos termoeléctricos se han enunciado en orden cronológico a su descubrimiento, pero por lo indicado, es el efecto Thomson el que permite justificar los dos anteriores. De la siguiente figura se deduce que con un único metal no es posible realizar la medida de temperatura, lo que argumenta el uso del efecto Seebeck para nombrar el fundamento de un termopar.

Las tensiones que se generan por efecto Thomson solo

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Tensión en un termopar.




$$V(T,To) = \alpha_1(T - To) + \alpha_2(T^2 - To^2) + \alpha_3(T^3 - To^3) + \ldots$$

$$V(T,To) \cong \alpha'_{AB}(T - To) + \beta_{AB}(T^2 - To^2)$$

$$V(T,To) = Vt \cong \alpha_{AB}(T - To)$$

$\alpha_{AB}$: coeficiente Seebeck

Proporciona una tensión función de 2 temperaturas.

Measurement Junction: también conocida como unión caliente.
Reference Junction: también conocida como unión fría.
Estos términos no implican que la temperatura de la unión caliente deba ser superior a la de la unión fría.

  - Tipos de termopares. Se utilizan diferentes metales y aleaciones para realizar termopares, en función de: Margen de temperatura, linealidad, sensibilidad, entorno de funcionamiento y precio. En cuanto a la unión de medida, encontramos varias posibilidades en el mercado: aislada, a tierra y expuesta.

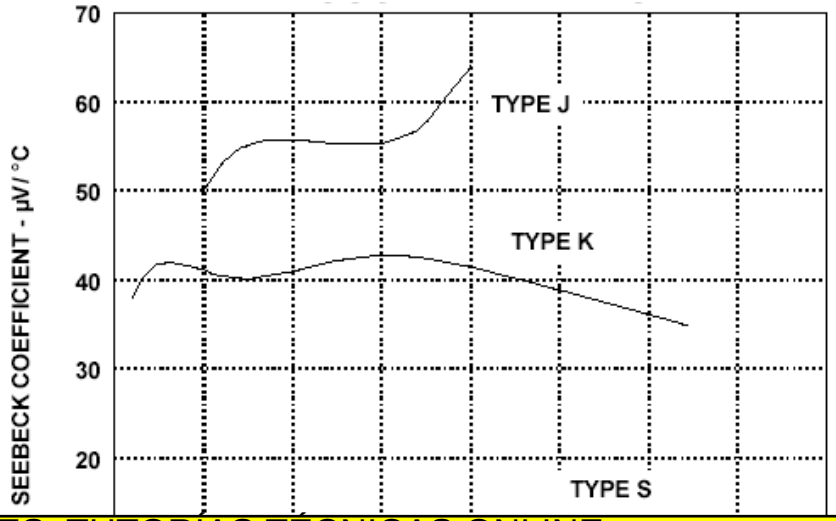
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

INSULATED GROUNDED

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Tipos de termopares. Su denominación está normalizada, tal y como se indica en la siguiente tabla. Se observa que la sensibilidad está en el entorno de decenas de μV/ºC, por lo que debe prestarse especial atención al diseño de la electrónica de acondicionamiento. Por otro lado, algunos termopares incluyen platino en su aleación, por lo que longitud máxima está comprometida por el precio.

| JUNCTION MATERIALS | TYPICAL USEFUL RANGE (ºC) | NOMINAL SENSITIVITY (μV/ºC) | ANSI DESIGNATION |
|---|---|---|---|
| Platinum (6%)/ Rhodium-Platinum (30%)/Rhodium | 38 to 1800 | 7.7 | B |
| Tungsten (5%)/Rhenium - Tungsten (26%)/Rhenium | 0 to 2300 | 16 | C |
| Chromel - Constantan | 0 to 982 | 76 | E |
| Iron - Constantan | 0 to 760 | 55 | J |
| Chromel - Alumel | –184 to 1260 | 39 | K |
| Platinum (13%)/Rhodium-Platinum | 0 to 1593 | 11.7 | R |




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Leyes fundamentales de un termopar.
    - *Ley del circuito homogéneo.* En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
    - *Ley de los metales intermedios.* Si en un circuito la temperatura es uniforme en todos los conductores intermedios entre dos uniones, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores intermedios y es la misma que si estos se eliminan.

**Esta ley es fundamental en el uso de un termopar.**

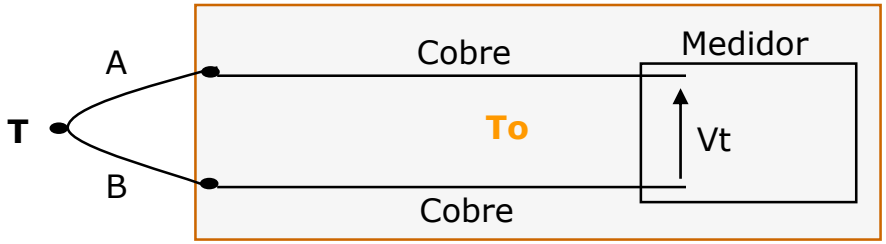
    - *Ley de las temperaturas intermedias.* Permite usar las tablas de referencia de un termopar y determinar la relación entre Vo y temperatura de las uniones.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

**V(80,20)=V(80,0)-V(20,0)**

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

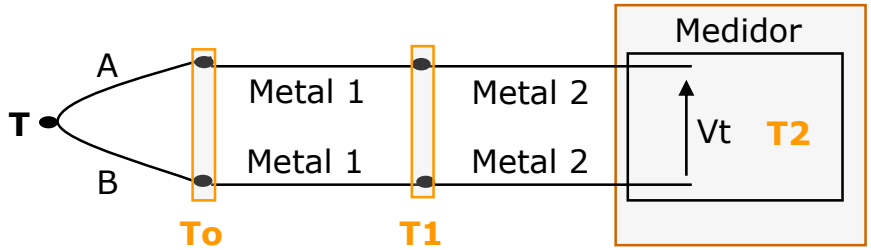
- Termopares.
  - Medida de la tensión de un termopar. Diferentes opciones según condiciones:




Temperatura constante desde unión fría hasta el medidor:

Vt=f(T,To,A,B)  Vt≠f(Cobre)

Problema: Puede no ser posible asegurar la condición de temperatura constante.




Igual temperatura diferentes uniones del circuito (*bloques isotermos*):

Vt=f(T,To,A,B)  Vt≠f(Metal 1, Metal 2, T1, T2)

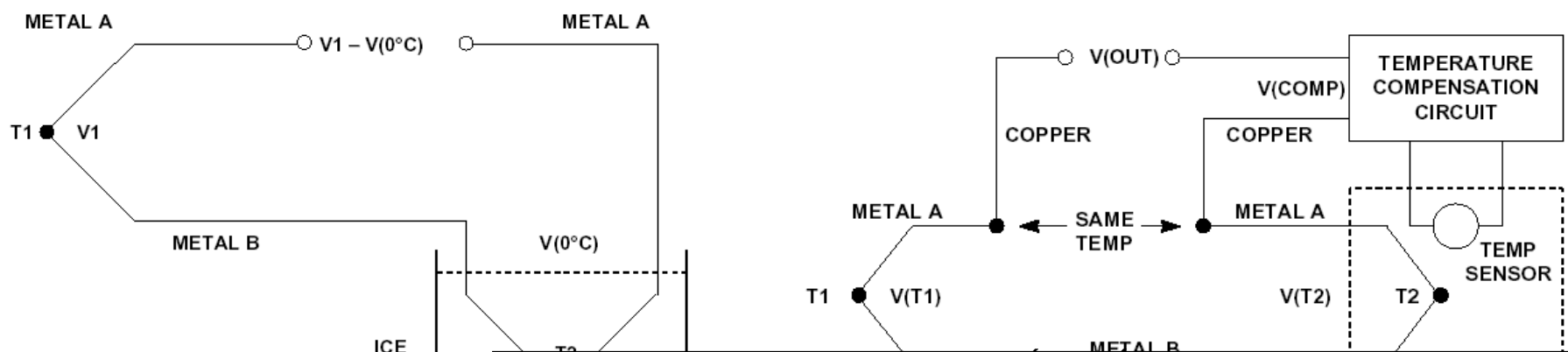
Problema: La unión fría está alejada del medidor y su temperatura puede ser extrema. Como To tiene que ser medida (*compensación unión fría*) esto puede ser un problema.

Uso de *cables de compensación*: similares

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

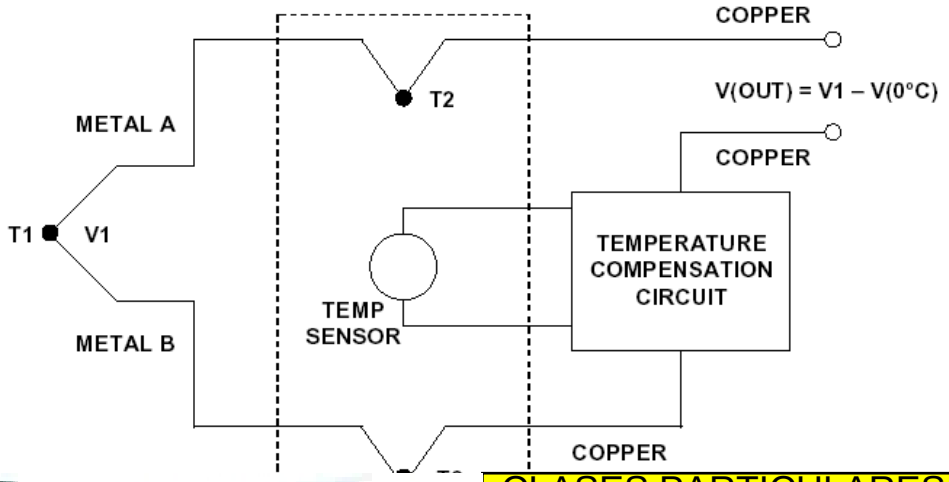
- Termopares.
  - Compensación de la unión fría o de referencia. Este concepto se refiere a obtener una tensión o medida que solo dependa de la temperatura de la unión caliente. Posibilidades:
    - *Someter la unión de referencia a una temperatura conocida y estable. Solo se suele utilizar en procesos de calibración.*
    - *Medir con un segundo sensor la temperatura de la unión de referencia y eliminar su aportación al resultado. Esta es la opción práctica habitual.*




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Compensación de la unión fría o de referencia. El bloque isotermo suele ser el mismo conector de entrada al medidor (*conector específico del tipo de termopar*) que permite llevar la unión de referencia al interior del equipo, donde se puede asegurar una temperatura uniforme y es medida la temperatura de la unión fría. Deben evitarse diferencias de temperatura en las conexiones posteriores del cable de cobre.




Para medir la unión fría se utilizan diferentes sensores en función de:
- Margen de variación de T2.
- Exactitud deseada.
- Precio.

Típicamente:
- Unión PN
- Sensor unión semiconductora.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Aspecto de termopares y accesorios.

| Termopar Tipo | Aleación | Rango | IEC 584 | ANSI 43710 |
|---|---|---|---|---|
| K | Niquel-Cromo<br>Niquel-Aluminio | -150 a 1100°C | | |
| J | Hierro<br>Cobre-Niquel | -40 a 700°C | | |
| T | Cobre<br>Cobre-Niquel | -200 a 350°C | | |
| E | Niquel-Cromo<br>Cobre-Niquel | -150 a 800°C | | |
| N | Niquel-Cromo<br>Niquel-Silicio | -150 a 1100°C | | |
| S | Platino<br>Platino-Rodio10% | 0 a 1550°C | | |
| R | Platino<br>[illegible] | 0 a 1600°C | | |

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Tolerancias termopares según norma IEC 584-2.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fe-Con (J) | Class 1 | - 40 +750°C: | ±0.004 . t | or ±1.5°C |
| | Class 2 | - 40 +750°C: | ±0.0075 . t | or ±2.5°C |
| | Class 3 | - - | - | |
| Cu-Con (T) | Class 1 | - 40 +350°C: | ±0.004 . t | or ±0.5°C |
| | Class 2 | - 40 +350°C: | ±0.0075 . t | or ±1.0°C |
| | Class 3 | -200 + 40°C: | ±0.015 . t | or ±1.0°C |
| NiCr -Ni (K) and NiCrSi-NiSi (N) | Class 1 | - 40 +1000°C: | ±0.004 . t | or ±1.5°C |
| | Class 2 | - 40 +1200°C: | ±0.0075 . t | or ±2.5°C |
| | Class 3 | -200 + 40°C: | ±0.015 . t | or ±2.5°C |
| NiCr-Con (E) | Class 1 | - 40 +800°C: | ±0.004 . t | or ±1.5°C |
| | Class 2 | - 40 +900°C: | ±0.0075 . t | or ±2.5°C |
| | Class 3 | -200 + 40°C: | ±0.015 . t | or ±2.5°C |
| Pt10Rh-Pt (S) and Pt13Rh-Pt (R) | Class 1 | 0 +1600°C: | ±[1+(t-1000).0.003] | or ±1.0°C |
| | Class 2 | - 40 +1600°C: | ±0.0025 . t | or ±1.5°C |
| | Class 3 | - - | - | |
| Pt30Rh- | Class 1 | - - | - | |

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Termopares.
  - Comparativa sensores de temperatura por contacto.

| TERMOPAR | RTD Platino | NTC | SEMICONDUCTOR |
|---|---|---|---|
| -270 a 2300ºC | -200 a 850ºC | -150 a 250ºC | -55 a 150ºC |
| Buena exactitud y reproducibilidad media | Alta exactitud, linealidad y reproducibilidad | No lineal | Linealidad y exactitud ≈1-2ºC |
| Necesita compensar la unión fría | Necesita excitación | Necesita excitación | Necesita excitación |
| Sensibilidad Baja (Electrónica de alta precisión) | Sensibilidad Media (Electrónica de media precisión) | Alta sensibilidad (Electrónica de baja precisión) | 10mV/K, 10mV/ºC, 1μA/K... (Sin electrónica adicional) |
| Alta velocidad de respuesta | Baja velocidad de respuesta | Media-alta velocidad de respuesta | Baja velocidad de respuesta |

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

# Sensores de magnitud física
## Índice


- Lección 0. Objetivos del tema.
- Lección 1. Sensores de temperatura por contacto.
- Lección 2. Medida de temperatura sin contacto.
  - Principios de radiación térmica.
  - Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Aplicaciones.
  - Sensores de radiación infrarroja.
- Lección 3. Sensores de fuerza.
- Referencias y bibliografía.



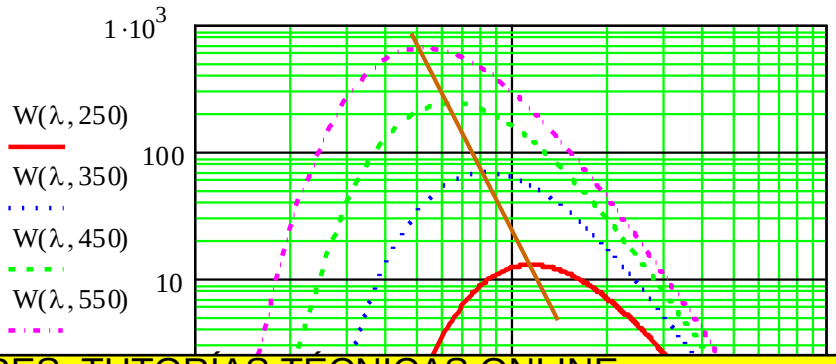
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Radiación de un cuerpo: La materia en estado condensado (sólido o líquido) emite un espectro continuo de radiación electromagnética que es función de su temperatura. A temperaturas ordinarias los cuerpos se ven por la luz que reflejan, mientras que a temperaturas altas los cuerpos son auto-luminosos (rojo vivo, rojo blanco, azul, etc.) como consecuencia de que radian una potencia significativa dentro del espectro visible.
  - Ley de Planck. Establece la distribución de la potencia emitida por un cuerpo negro que se encuentra a una temperatura T (Kelvin).

$$W(\lambda,T)=\frac{3.74\cdot 10^{8}}{\lambda^{5}\left(e^{\frac{1.44\cdot 10^{4}}{\lambda T}}-1\right)}\left(W\cdot m^{-2}\cdot \mu m^{-1}\right)$$




  - Ley del desplazamiento de Wien:

    Establece la longitud de onda de máxima densidad espectral de potencia radiada

Cartagena99

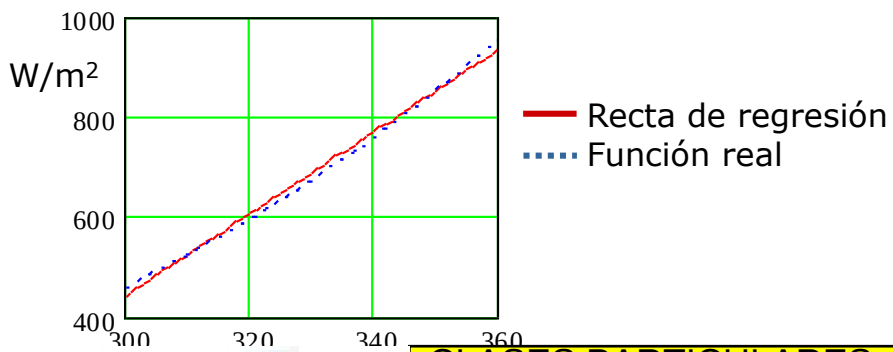
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

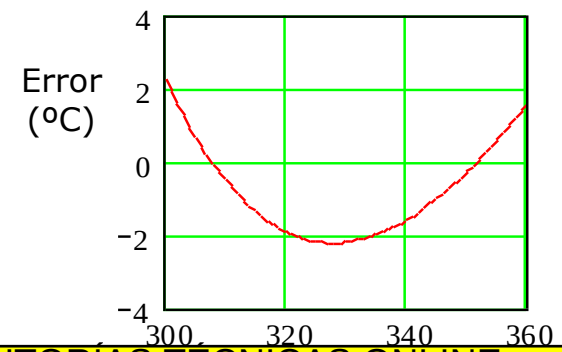
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Ley de Stefan-Boltzmann. Establece la potencia total máxima radiada por una superficie. Es el resultado de integrar la ecuación de Planck para toda λ.

$$W(T) = \sigma \cdot T^4 (W/m^2)$$ σ=5.67x10$^{-8}$ W·m$^{-2}$·K$^{-4}$ : constante de Stefan-Boltzmann

Como se observa, la Ley de Stefan-Boltzmann no es lineal. Si se utiliza para determinar la temperatura de una superficie a partir de la potencia captada por un sensor de radiación, dentro de un margen reducido de temperatura, puede aproximarse por una variación lineal. En la figura se muestra el resultado de utilizar la recta de regresión en el margen 300-360K.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Emisividad de una superficie (ε). Representa la eficiencia de radiación de una superficie comparada con la del radiador ideal "*cuerpo negro, ε=1*". Las expresiones de las leyes de radiación de Planck y Stefan-Boltzmann, solo se cumplen exactamente para un cuerpo negro. Cualquier otra superficie radia una energía que es dada por la ley de radiación ponderada por la emisividad. Atendiendo al valor de la emisividad, las superficies se clasifican en:
    - *Cuerpo negro,* ε=1. Cuanto mas se aproxime una superficie al cuerpo negro, mayor exactitud se podrá conseguir en la medida de su temperatura por estos métodos.
    - *Cuerpo gris*, 0<ε<1. Su emisividad es independiente de la longitud de onda. También es un cuerpo ideal, en la práctica solo se puede aproximar a esta característica en un margen reducido de longitudes de onda. Para estas superficies, la expresión de la potencia radiada sería:

$$W(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 (W/m^2)$$

    - *Radiador selectivo*, 0<ε<1. Son los cuerpos reales, en estos ε=f(λ). Resultando:

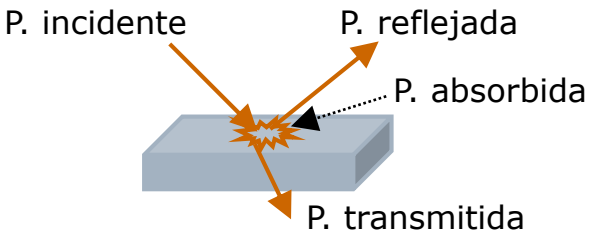
$$3.74 \cdot 10^8$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Principios de radiación térmica.

- **Absorción, reflexión y transmisión de una superficie.** Por el principio de conservación de la energía, se cumple: $A(\lambda,T,\alpha)+ R(\lambda,T,\alpha)+ Tr(\lambda,T,\alpha)=1$.



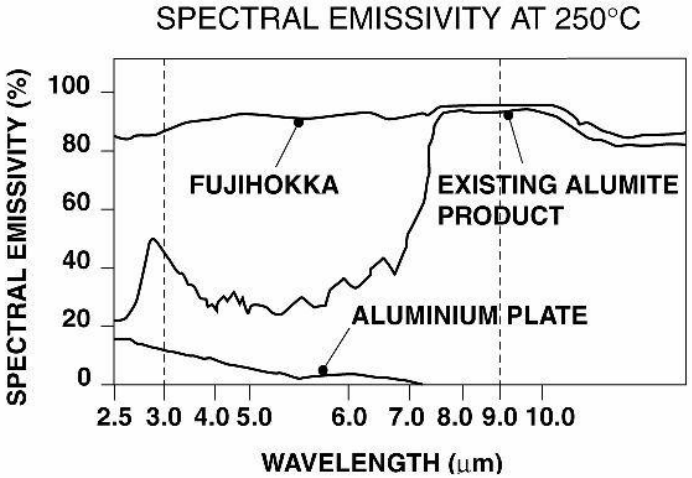

Cuerpo negro: A=1, R=Tr=0.
Espejo perfecto: R=1, A=Tr=0.
En el IR, $Tr\approx 0$ ⇨ $A(\lambda,T,\alpha)+ R(\lambda,T,\alpha)=1$
Ley de Kirchoff: $A(\lambda,T,\alpha)=\varepsilon(\lambda,T,\alpha)$ si equilibrio térmico
Por lo tanto: $\boldsymbol{\varepsilon(\lambda,T,\alpha)+ R(\lambda,T,\alpha)=1}$

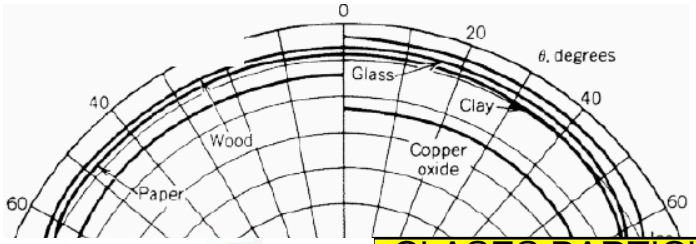
- **Factores de los que depende la emisividad de una superficie.**
  - *Tipo de superficie:* las metálicas presentan baja emisividad ($\varepsilon<0.3$), mientras que en el resto tiende a ser bastante alta. La emisividad es marcada por la capa mas externa de la superficie, por ejemplo, un metal oxidado presenta alta emisividad.
  - *Longitud de onda.*
  - *Ángulo de observación:* la emisividad máxima se obtiene con una observación perpendicular a una superficie. Habitualmente, se mantiene casi constante dentro de un ángulo superior a ±30º sobre la normal.

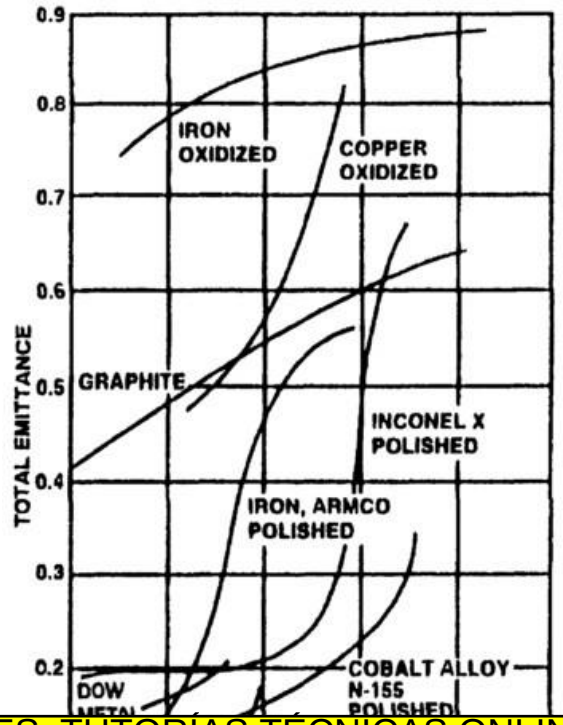
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Factores de los que depende la emisividad de una superficie.




Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Principios de radiación térmica.

### Factores de los que depende la emisividad de una superficie.

| **Metales y sus óxidos** | | **Temperatura** (ºC) | **Emisividad** |
|---|---|---|---|
| Aluminio | Lámina brillante | 20 | 0.04 |
| | tratado | 20 | 0.83-0.94 |
| Cobre | Pulido | 100 | 0.05 |
| | con alto grado de oxidación | 20 | 0.78 |
| Hierro | Fundido oxidado | 100 | 0.64 |
| | lámina oxidada | 20 | 0.05 |
| Acero inoxidable (18-8) | Pulido | 20 | 0.07 |
| | oxidado | 60 | 0.79 |
| Acero | Pulido | 100 | 0.07 |
| | oxidado | 200 | 0.79 |
| **Otros materiales** | | | |
| Ladrillo | Rojo común | 20 | 0.93 |
| Carbón en polvo | | 20 | 0.95 |
| Hormigón | Seco | 35 | 0.95 |
| Aceite | Lubricante | 17 | 0.87 |
| | Película de espesor 0.03mm | 20 | 0.27 |
| | Película de espesor 0.13mm | 20 | 0.72 |
| | Cubierta grasa | 20 | 0.82 |
| Pintura grasa | Promedio 16 colores | 20 | 0.94 |
| Piel | Humana | 32 | 0.98 |

**Determinación práctica de la emisividad:**
- Sensor de contacto + medidor por Infrarrojos con ajuste de emisividad.
- Cinta adhesiva negra (0.9 a 0.98) o pintura mate (0.94) + medidor por Infrarrojos.

**Precauciones:**
- Temperatura de la superficie al menos +10ºC sobre ambiente.
- Suficiente exactitud de la medida por contacto.
- Similar margen de longitudes de onda de los medidores de Infrarrojo.

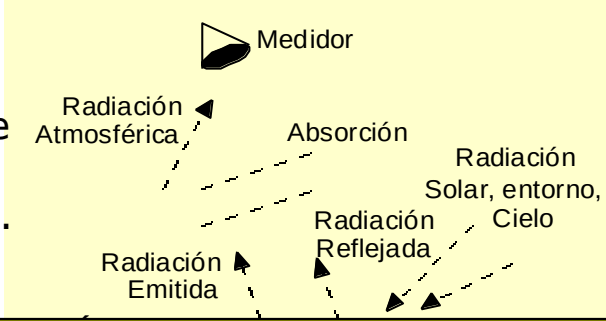
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Radiación recibida por el medidor. La radiación que llega al sensor está compuesta por las siguientes aportaciones:
    - *Emisión de la superficie ponderada por la absorción del camino óptico.*
    - *Radiaciones del entorno que se reflejan en la superficie y se ponderan por la absorción del camino óptico.*
    - *Emisión del camino óptico entre sensor y superficie.*

    La primera es la información deseada aunque modificada por la absorción, mientras que las dos últimas se pueden considerar radiaciones interferentes.

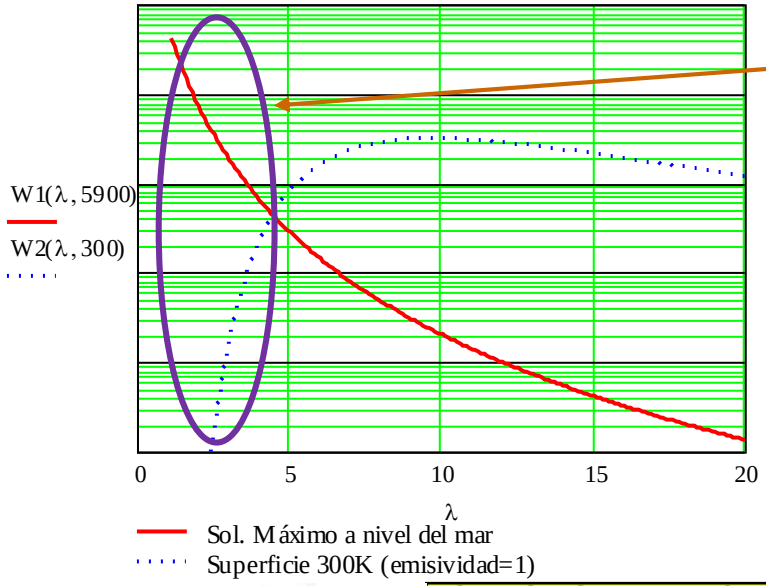
    Las diferentes aportaciones de radiación interferente así como la absorción del camino óptico, se estiman, para realizar el modelo, con un grado de incertidumbre que habitualmente es bastante elevado, lo que compromete la exactitud de la medida de temperatura. Una condición básica para asegurar alta calidad en la medida es que la potencia de la información sea muy




Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Radiación solar. Representa una fuente muy importante de radiación del entorno en medidas en el exterior. El Sol radia, aproximadamente, como un cuerpo negro a una temperatura de 5900K, imponiendo a nivel del mar potencias de hasta unos 1000W/m$^2$.




Mayor aportación de la radiación solar que de la superficie a medir. Cruce a 4.4μm.

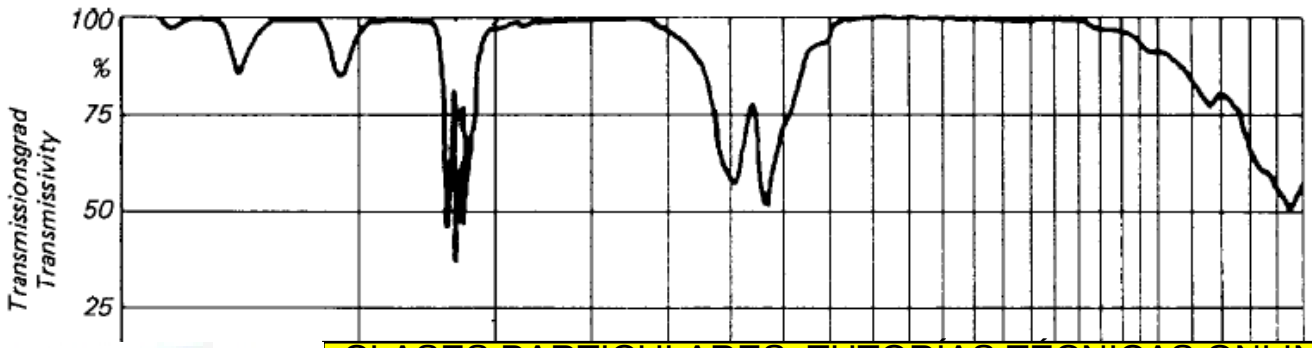
Según se deduce de la gráfica, en las medidas realizadas en exteriores deben utilizarse longitudes de onda grandes para reducir el efecto de la radiación solar. Lógicamente, cuanto mayor es la emisividad de la superficie a medir (menor reflexión) y mayor es su temperatura (mayor emisión), menos efecto tendrá la radiación solar.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Principios de radiación térmica.
  - Transmisión y emisión de la atmósfera. La atmósfera no es transparente, absorbe y por lo tanto, emite energía electromagnética:
    - *La emisión y la absorción son proporcionales a la distancia entre superficie medida y medidor.*
    - *Estos efectos son producidos por los gases presentes en la atmósfera, principalmente por: dióxido de carbono y vapor de agua.*
    - ***Si se trabaja en las ventanas atmosféricas, 3-5µm ó 8-16µm aproximadamente, se puede despreciar el efecto de absorción y emisión.***




Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Modelo del sistema de medida. La potencia que llega al sistema sensorial se puede aproximar por las expresiones que se indican, donde la primera corresponde a densidad espectral de potencia y la segunda a la potencia total captada por el sensor dentro del margen de longitudes de onda determinado por el método de medida:

$$W_T(\lambda,T) = K[\varepsilon(\lambda,T,\alpha)\cdot W_S(\lambda,T) + [1-\varepsilon(\lambda,T,\alpha)]\cdot W_E(\lambda,T_E)]$$

$$W_T(T) = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}[\varepsilon(\lambda,T,\alpha)\cdot W_S(\lambda,T) + [1-\varepsilon(\lambda,T,\alpha)]\cdot W_E(\lambda,T_E)]d\lambda$$

$W_T$: potencia captada por el sensor.
$W_S$: potencia emitida por la superficie ($\varepsilon$=1).
$W_E$: potencia del entorno que llega a la superficie.
K: constante función del sistema óptico.

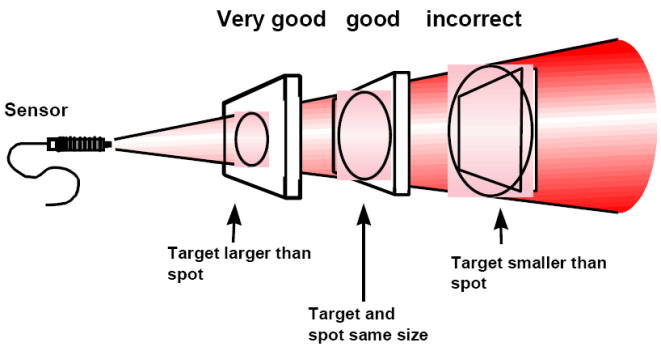
En el modelo planteado tenemos:

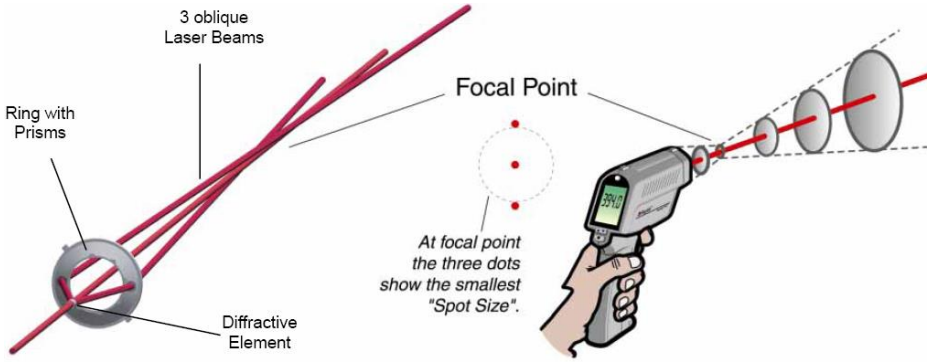
- La emisividad será función del tipo de superficie y se obtendrá de tablas o de forma experimental para el margen de λ contemplado.
- La expresión de W es la función de radiación de Planck particularizada para la temperatura indicada.
- La temperatura del entorno ($T_E$) suele adoptarse que es la temperatura de

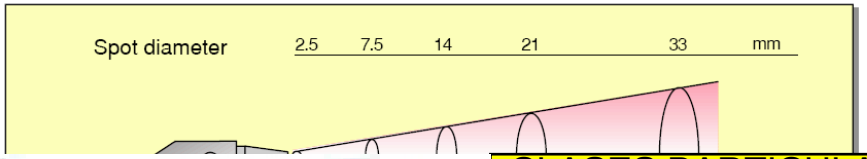
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - El modelo anterior asume que la absorción del camino óptico es despreciable y que el sistema sensorial es ideal. Según la aplicación, puede ser necesario introducir su efecto en el modelo.
  - El campo de visión del sistema óptico debe ser menor que la superficie medida, salvo en los medidores de relación o dos colores donde no es necesario:



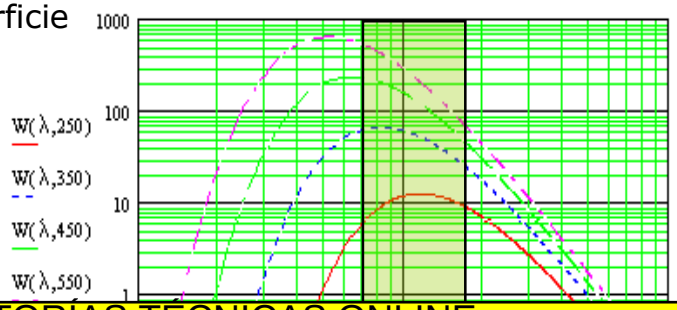

La *resolución óptica* de estos dispositivos se suele proporcionar como la relación entre la distancia y el diámetro de la superficie circular

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Medidor de banda ancha. El medidor captura la energía procedente de la superficie en un margen amplio de longitudes de onda que abarca varios μm. Para usar este método se deben cumplir las siguientes condiciones:
    - *Emisividad aproximadamente constante y conocida en todo el margen de λ.*
    - *Absorción del camino óptico constante, conocida y reducida en el margen de λ.*
    - *Campo de visión del sistema óptico inferior al de la superficie.*
    - *Tiempo de respuesta necesario del sistema compatible con sensores térmicos, esto es, no inferior a unas decenas de ms.*

$$W_T(T,T_E) = \varepsilon \cdot W_S(T) + [1-\varepsilon] \cdot W_E(T_E) \begin{cases} T_E \rightarrow \text{Tª entorno} \\ T \rightarrow \text{Tª superficie} \end{cases}$$




**Posibilidades para la función W($T_X$):**

• Tabular la función a partir de la integración de la ecuación de Planck en el margen de λ.
• Usar un polinomio como aproximación

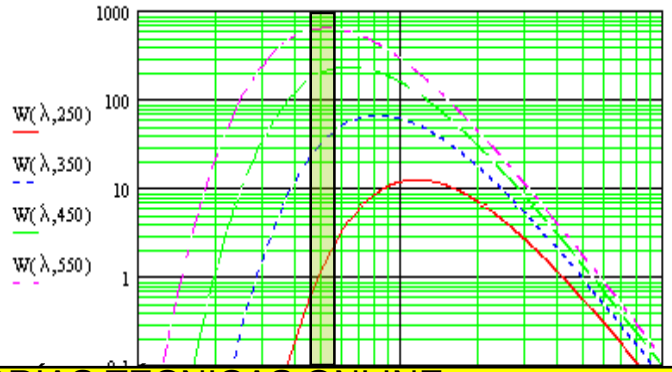
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Medidor de banda estrecha. Si la emisividad y la absorción del camino óptico no son conocidas y constantes para un margen amplio de longitudes de onda, debe utilizarse el método de banda estrecha. Las condiciones ahora se evalúan en un margen reducido de λ, inferior a 1μm. El método permite también medir materiales que son transparentes salvo a ciertas λ, de manera que el sensor debe captar solo la potencia en dichas frecuencias, como por ejemplo plásticos finos.

    Para la medida se utilizan principalmente sensores fotónicos por su alta SNR y sensibilidad. Son necesarios puesto que la potencia disponible suele ser reducida.

    En los sensores fotónicos la *responsividad* (R(λ), sensibilidad) depende de λ, por lo que puede ser necesario incluir su efecto en el modelo. Si además consideramos la absorción del camino óptico superficie a medir-sensor ($A_{\lambda x}$) y superficies entorno-superficie a medir ($A'_{\lambda x}$), quedaría la siguiente expresión, donde W(λ,$T_x$) es la ecuación de Planck.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

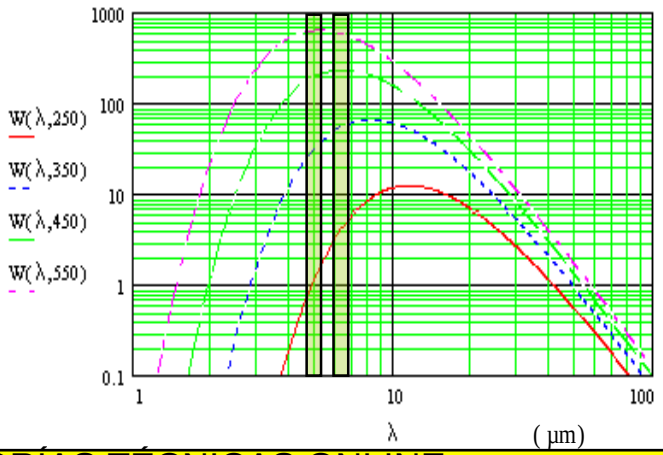
- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Elección del margen de longitudes de onda. Independientemente del método de medida, es necesario determinar el margen de longitudes de onda mas adecuado para asegurar una medida de calidad. Los medidores de propósito general suelen ser de banda ancha y trabajan en la ventana 8-15μm. Para muchas aplicaciones industriales las características de la superficie o del entorno hacen complicado determinar el margen mas adecuado. Por suerte, los fabricantes de medidores pueden recomendar soluciones adecuadas para las aplicaciones mas comunes.

| **Respuesta Espectral (μm)** | **Margen de Temperatura (ºC)** | **Aplicación** |
|---|---|---|
| 6.8±0.15 | 0-400 | Películas plásticas finas (PVC) |
| 4.9-5.5 | 100-2500 | Procesado de vidrio y cuarzo |
| 4.26±0.13 | 400-2500 | Gases calientes y llamas (banda $CO_2$) |
| 2-4.5 | 150-2500 | Metales, óxidos de metal y cerámica. |
| 8-14 | -50-1000 | Superficies pintadas, asfalto, materiales de construcción |

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

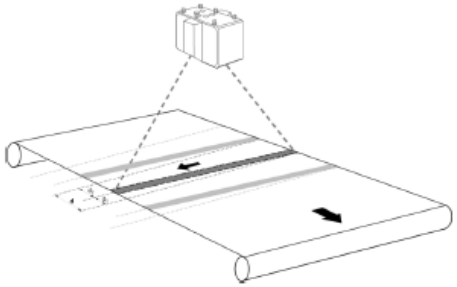
- Métodos de medida y tipos de medidores.
  - Medidor de relación o dos colores. Determinan la temperatura de la superficie a partir del cociente entre las energías recibidas en dos bandas de longitudes de onda estrechas y próximas, con el fin de que la emisividad de la superficie y/o la absorción del camino óptico sean muy similares. Este método permite obtener una medida de calidad en aplicaciones en las que no se cumplen los requisitos especificados en los métodos de banda ancha y estrecha.
  - Ventajas frente a los otros métodos.
    - Solo necesita que la emisividad sea igual en las dos bandas o al menos su cociente constante y conocido.
    - Medida de superficies mas pequeñas que la superficie enfocada (tiende a medir la superficie mas caliente).
    - Medida en la presencia de obstáculos semitransparentes. Basta con que el cociente



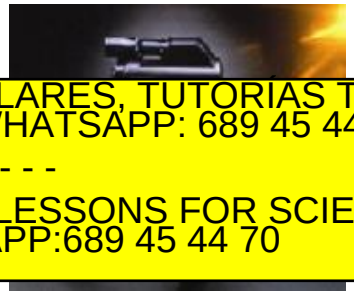

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Tipos de medidores.
  - Puntuales.
    - *Sondas: distancias cortas.*
    - *Portátiles: enfoque infinito.*
    - *Medidores en continuo: aplicaciones industriales.*
    - *Especiales:*
      - Acoplados por fibra óptica: superficies poco accesibles o entornos agresivos.
      - Microscopios de IR.
      - Pirómetros láser: permiten determinar la emisividad.



  - Scanner de línea. Miden distribuciones espaciales de temperatura en superficies en movimiento.
  - Cámaras termográficas. Pueden interesar diferentes características:
    - *Alta resolución de temperatura.*



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Aplicaciones.

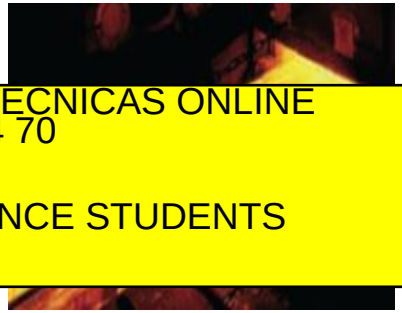
*Sector industrial:*
- Mantenimiento preventivo.
- Control de procesos.
- Monitorizado.

*Sector médico:*
- Control de la temperatura de bebes en incubadoras.
- Detección de venas y arterias.
- Detección de tumores.
- Control de la temperatura de bancos de sangre y órganos para transplante.

*Sector civil:*
- Medidas de aislamiento térmico en edificios.
- Búsqueda de personas enterradas.
- Detección de incendios.
- Medida aérea de la temperatura de las diferentes zonas terrestres.
- **Detección de anomalías mecánicas en medios de transporte.**

*Sector espacial:*
- Medida de la temperatura de planetas y estrellas.
- Medida de la temperatura del universo.

*Sector militar:*

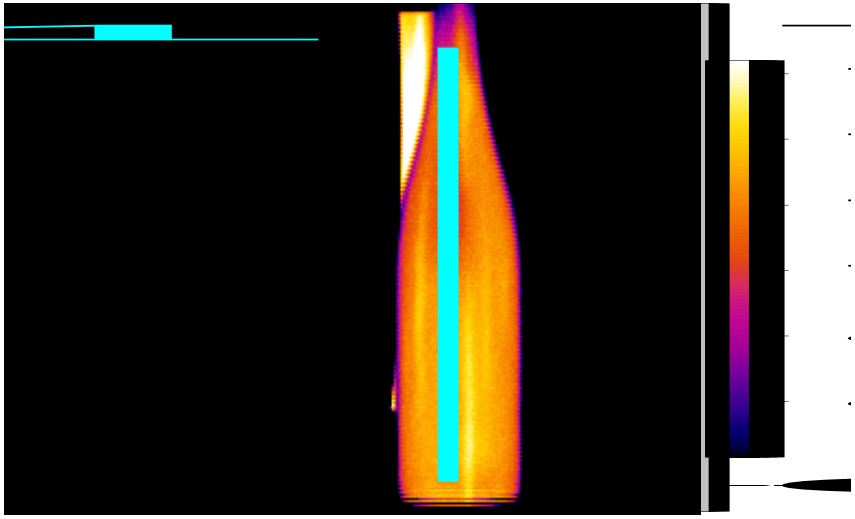


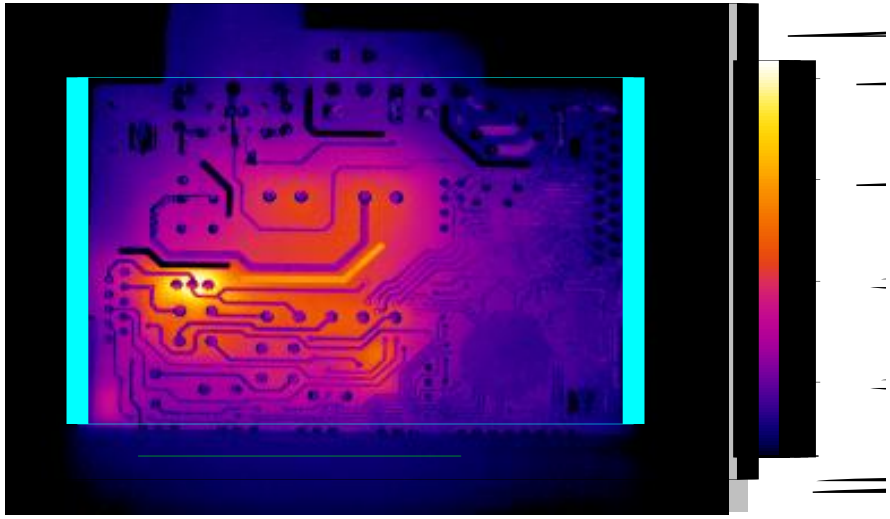
Cartagena99

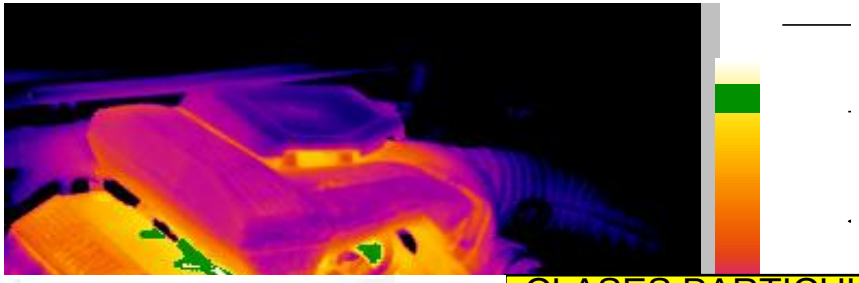
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

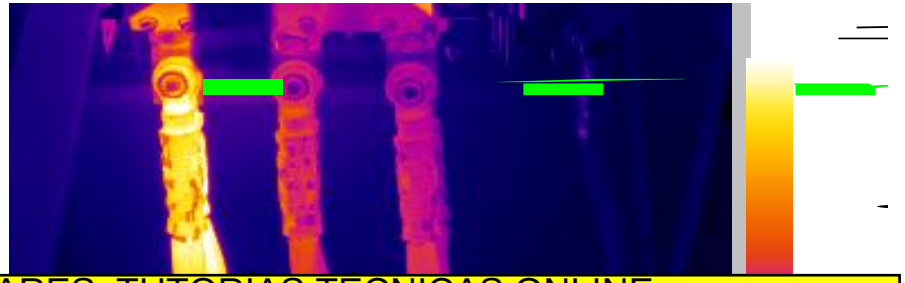
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Aplicaciones. EMISIVIDAD??







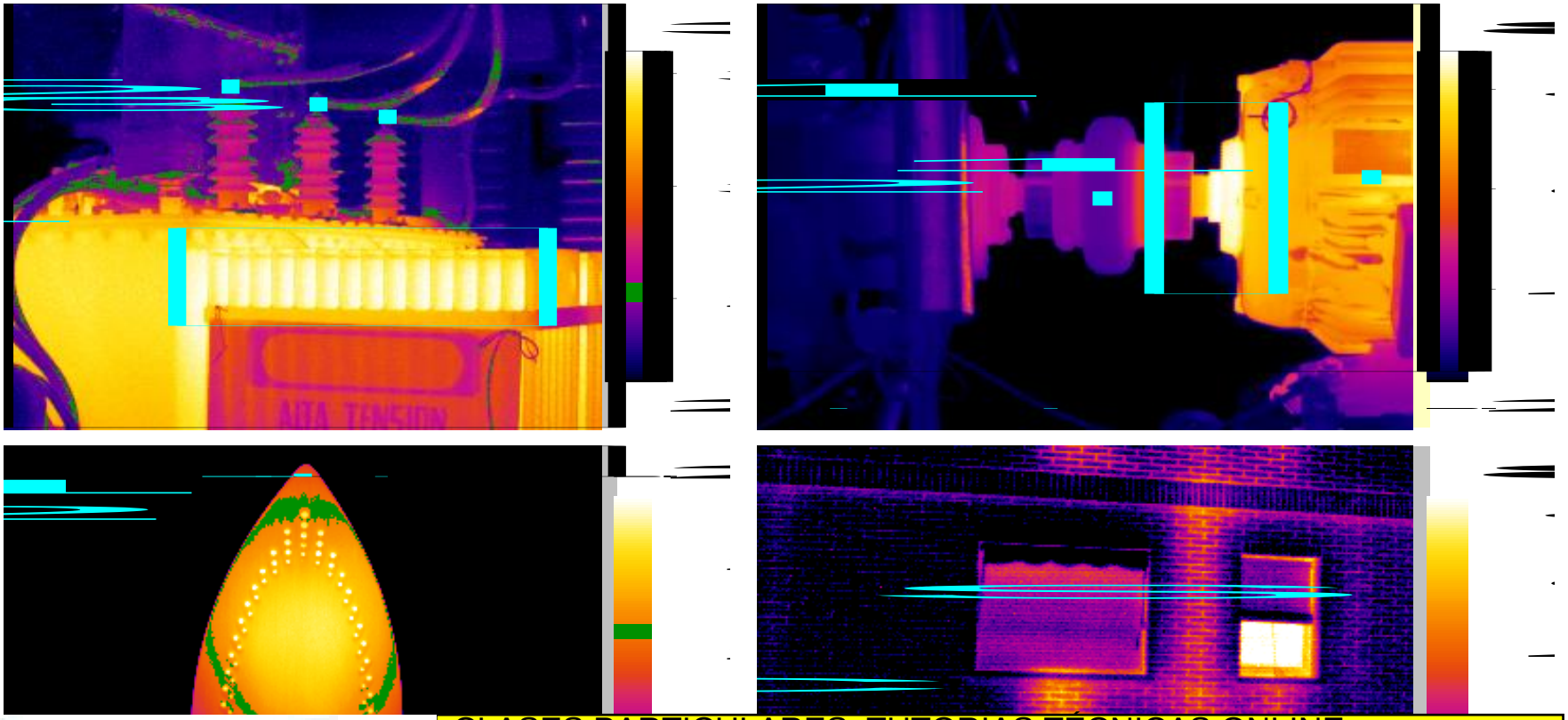


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Aplicaciones.

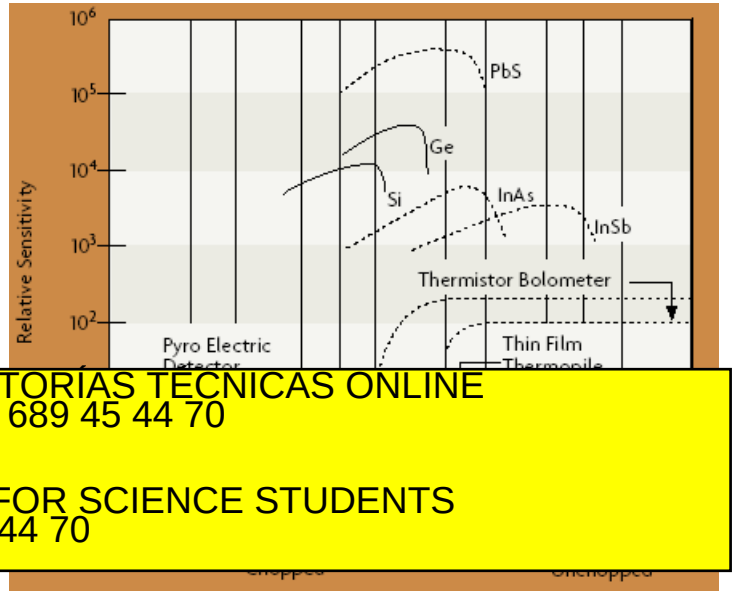


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

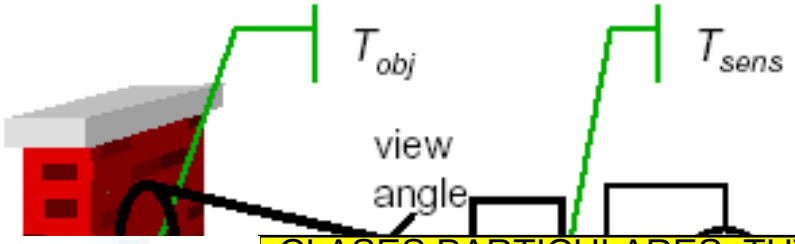
- Sensores de radiación infrarroja.
  - Tipos de sensores. Su principio de funcionamiento determina de forma acusada sus características y parámetros.
    - *Térmicos:* la radiación captada genera un cambio de su temperatura lo que produce el cambio de una magnitud eléctrica: termopilas, bolómetros, piroeléctricos. Se usan fundamentalmente en medidores de banda ancha.
    - *Fotónicos o cuánticos:* la radiación captada produce portadores de carga, sin una variación apreciable de la temperatura del elemento sensible: Fotoconductores, fotoelectromagnéticos, fotodiodos y de pozo cuántico. Se usan en medidores de banda estrecha y de relación
  - Diferencias entre térmicos y fotónicos.
    - *Menor precio.*
    - *Responsividad independiente de λ.*
    - *Menor detectividad (SNR).*
    - *Mucho mas lentos (20ms a 1s, frente a μs*




Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de radiación infrarroja.
  - Principio de funcionamiento de los sensores térmicos. El incremento de temperatura producido por la radiación (ΔT) debe ser lo mayor posible para así conseguir alta sensibilidad. El ΔT se refiere a la variación frente a la temperatura de ambiente, que en algunos casos se puede medir sobre la carcasa metálica del dispositivo. Para conseguir un alto ΔT, se debe cumplir:
    - *La resistencia térmica del elemento sensor con el entorno debe estar marcada principalmente por el mecanismo de radiación.*
    - *El intercambio energético por conducción y convección se minimiza. Por lo tanto, la temperatura del elemento sensible puede ser superior o inferior a la de ambiente.*
    - *Superficie captadora de alta emisividad y elevada concentración de la radiación.*

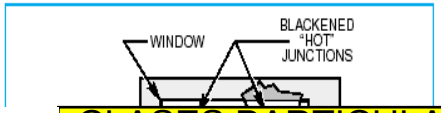



ΔT: diferencia entre la temperatura del elemento sensible y la de ambiente.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de radiación infrarroja.
  - Tipos de sensores térmicos.
    - *Termopilas:* basadas en el efecto Seebeck. Son los mas utilizados para medidores puntuales por su robustez.
    - *Bolómetros:* sensor resistivo (tipo semiconductor) cuya resistencia cambia con la temperatura. Son los mas habituales en cámaras termográficas de propósito general y han permitido reducir drásticamente su coste.
    - *Piroeléctricos:* generación de diferencia de cargas por la diferencia de temperatura (efecto piroeléctrico).
    - *Células Golay:* variación de la temperatura de un gas y por lo tanto de la presión ejercida por este sobre una membrana elástica. Medida de la deformación de la membrana.
  - Termopilas. Unión en serie de termopares. Características:



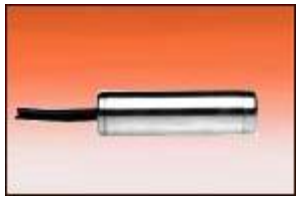

- Bajo coste y robustas.
- Tiempos de respuesta elevados (0.2-1s).
- Se usan como un termopar convencional

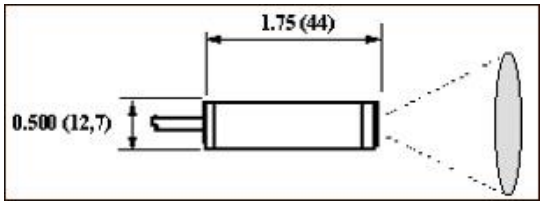
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

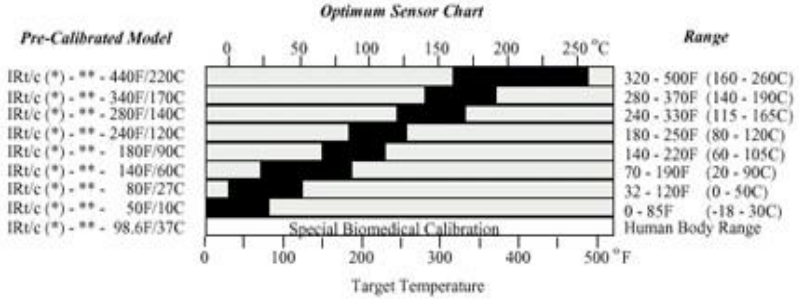
- Sensores de radiación infrarroja.
  - Ejemplo Termopila. Modelo precalibrado IRt/c de Exergen.

| | |
|---|---|
| **Sensing Range** | -50 to 1200 °F (-45 to 650 °C) |
| **Ambient Temperature Range** | 0 to 212 °F (-18 to 100 °C) |
| **Optimum Range Selections** | Eight models per t/c type (see Temperature Selection Guide) |
| **Field-of-View** | 1:1 (60°) approximately |
| **Minimum Spot Size** | 0.3" (8 mm) |
| **Spectral Response** | 6.5 to 14 μ |
| **Output Impedance** | 3 Kohms approximately |
| **Cable** | Twisted shielded pair of base thermocouple material (J, K, etc.), 3 ft. (.9 m) standard length, Teflon sheathed, rated to 392 ºF (200 ºC) continuous service. |
| **Dimensions** | 1.75" x .50" Diameter (44 x 12.7 mm) |
| **Weight** | 1.4 oz (40 g) with cable |
| **Housing** | Stainless steel, hermetically sealed, exceeds NEMA 4, 4x; IP65, 67, intrinsically safe, cable shield grounded to housing and electrically isolated from signal. |






| Rango respecto a tempe. calibración | Error uso como termopar convencional | Error uso tablas fabricante |
|---|---|---|
| 0°F (0°C) | 0% or 0.02°F (0.01°C) | 0% or 0.02°F (0.01°C) |
| ±5°F (± 3°C) | ± 0.2% or 0.5°F (0.3°C) | 0% or 0.02°F (0.01°C) |
| ±10°F (± 6°C) | ± 0.4% or 1.0°F (0.6°C) | ± 0.1% or 0.3°F (0.2°C) |
| ±20°F (± 12°C) | ± 1% or 2°F (1°C) | ± 0.2% or 0.5°F (0.3°C) |
| ±40°F (± 24°C) | ± 2% or 4°F (2°C) | ± 0.3% or 0.8°F (0.5°C) |
| ±75°F (± 42°C) | ± 5% or 8°F (5°C) | ± 0.5% or 1.2°F (0.3°C) |
| ±180°F (± 100°C) | > 5% or 8°F (5°C) | ± 1% or 2°F (1°C) |
| ±540°F (±300°C) | > 5% or 8°F (5°C) | ± 2% or 4°F (2°C) |

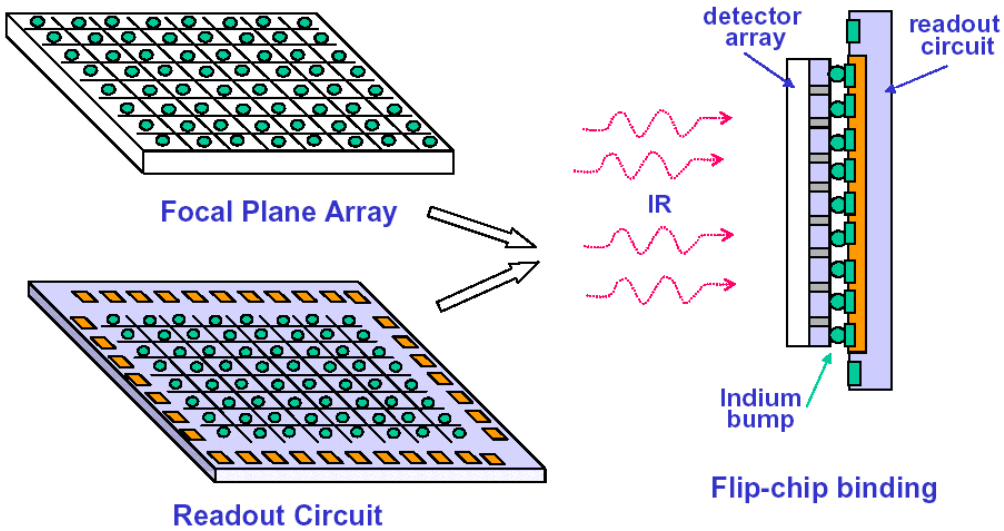



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de radiación infrarroja.
  - Arrays y matrices. Integran los dispositivos sensores (FPA), junto con la electrónica de acondicionamiento y lectura de la información (Readout Circuit)



La resolución de estas cámaras no es muy elevada. Los dispositivos mas básicos pueden tener una resolución de 60x60 píxel, con velocidades de actualización de 10Hz y NETD=0.2ºC. Una

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Sensores de radiación infrarroja.
  - Ejemplo: Cálculo de incertidumbre por radiación del entorno y emisividad.

    Si la emisividad nominal es 0.8 y la temperatura ambiente 300K, calculemos la incertidumbre al medir una temperatura de 350K, si:

    1. *La emisividad presenta una incertidumbre de ±10%.*
    2. *Consideramos las superficies del entorno a temperatura ambiente, pero en la práctica pueden estar en un margen de ±10ºC sobre ella.*

Supongamos que el modelo del sistema de medida sigue la siguiente expresión:

$$V_O(T_S,T_E)=K_P(\varepsilon\cdot T_S^{\,4}+[1-\varepsilon]\cdot T_E^{\,4})$$

Supuesto:
$T_S >> T_E \Rightarrow \Delta T_S/T_S = 0.25\cdot\Delta\varepsilon/\varepsilon$

$$\Delta T_S\big|_{\Delta\varepsilon}\cong\frac{dVo/d\varepsilon}{dVo/dT_S}\Delta\varepsilon=\frac{T_S^{\,4}-T_E^{\,4}}{4\varepsilon T_S^{\,3}}\Delta\varepsilon=\frac{1}{4}(T_S-\frac{T_E^{\,4}}{T_S^{\,3}})\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}=4K<\boxed{\frac{T_S}{4}\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}}=8.75K$$

Interesa:
$T_S >> T_E$ y $\varepsilon \rightarrow 1$

$$\Delta T_S\big|_{\Delta T_E}\simeq\frac{dVo/dT_E}{}\Delta T_E=\frac{4(1-\varepsilon)T_E^{\,3}}{}\Delta T_E=\boxed{\frac{1-\varepsilon}{}\frac{T_E^{\,3}}{}}\Delta T_E=1.6K$$

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

mayor posible. En un modelo con más términos en el polinomio el razonamiento es el mismo.

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

# Sensores de magnitud física
## Índice

- Lección 0. Objetivos del tema.
- Lección 1. Sensores de temperatura por contacto.
- Lección 2. Medida de temperatura sin contacto.
- Lección 3. Sensores de fuerza.
  - Introducción.
  - Conceptos básicos relación Fuerza-Deformación.
  - Galgas o bandas extensométricas (strain gauge).
- Referencias y bibliografía.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Introducción.
  - Fuerza: Es una magnitud física de carácter vectorial, capaz de deformar los cuerpos, modificar su velocidad o vencer su inercia. La fuerza se mide a partir del efecto que produce.
  - Objetivo de la lección: **Medida de Fuerzas estáticas sobre sólidos.** Para ello, la fuerza se aplica sobre un sólido, produciendo una deformación según un modelo físico establecido. La deformación es entonces medida mediante un sensor adecuado.
  - Tensión mecánica (σ): representa la fuerza soportada por un sólido por unidad de área.

$$\sigma = \frac{Fuerza}{Superficie} = \frac{F}{S}(N/m^2)$$

  - Presión mecánica (P): es el equivalente a la tensión mecánica cuando la fuerza es ejercida por/en líquidos o gases.
  - Modelo común de un sistema de medida de fuerzas estáticas:

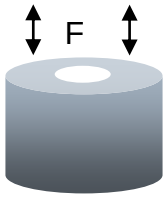
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

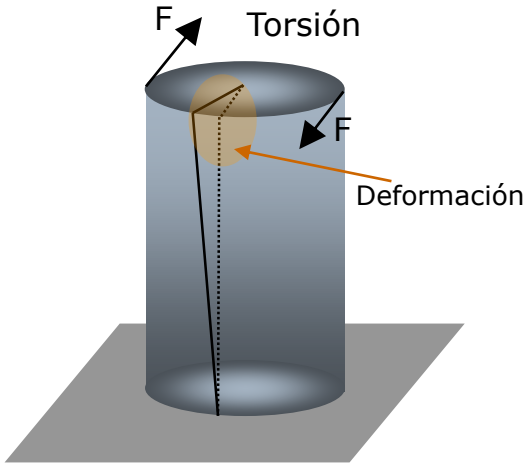
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Introducción.
  - Conversión Fuerza-Deformación: Para ello la Fuerza se aplica sobre un sólido de características mecánicas adecuadas y conocidas. La elección del material, diseño geométrico y punto de aplicación de la fuerza, depende de las características de la fuerza a medir.

Barra de tracción y compresión




Toro circular, Tracción / compresión



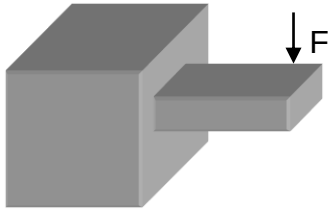
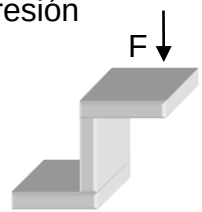
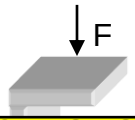




Lámina empotrada




Pescante




Características del sólido:
- Rigidez elevada.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Prof. Tecnología Industrial. Ingeniero Técnico Industrial. Especialidad Electrónica. Universidad de Alcalá

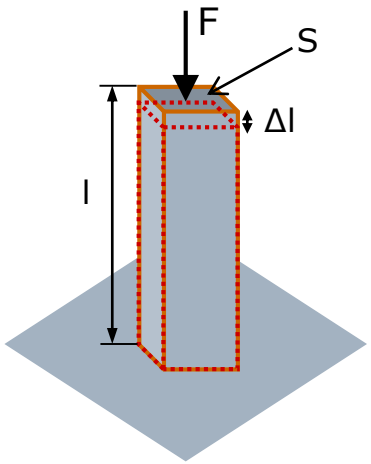
- Introducción.
  - Conversión Deformación-Magnitud eléctrica. Diferentes posibilidades para medir la deformación producida en el sólido, podemos destacar:
    - *Galga extensométrica metálica.* La deformación se traslada a un elemento resistivo metálico. La variación en sus dimensiones produce una variación de resistencia.
    - *Galga extensométrica semiconductora.* La deformación se traslada a un elemento resistivo semiconductor. La tensión mecánica sobre un semiconductor produce variación de su resistividad (efecto piezorresistivo) lo que produce un cambio en la resistencia de magnitud muy superior al producido por la variación de sus dimensiones.
    - *Sensores de Fibra óptica basados es redes de Bragg.* La deformación se traslada a una fibra óptica en la que se ha grabado una red de Bragg. El índice de refracción de esta cambia con la deformación, lo que permite obtener una longitud de onda reflejada que es función de dicha deformación.
    - *Sensores magnetoelásticos.* En algunos materiales su permeabilidad magnética cambia con la tensión mecánica soportada. En este caso el sólido, que soporta la

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Conceptos básicos relación Fuerza-Deformación.

- **Extensometría.** Se entiende como tal el conjunto de técnicas experimentales que permiten medir las deformaciones superficiales y las tensiones mecánicas en sólidos.

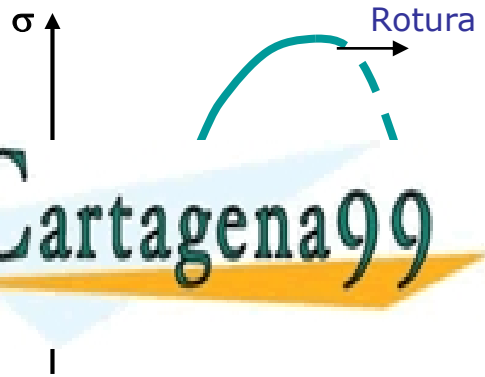



- F: fuerza aplicada sobre la barra.
- l: longitud de la barra para F=0.
- S: superficie sobre la que se distribuye la fuerza.
- Δl: deformación en la dirección de la fuerza.

- **Ley de Hooke:** Si un material elástico lineal se somete a una fuerza, sin sobrepasar su *límite de elasticidad*, la deformación en la dirección de la fuerza, *deformación longitudinal*, $\boldsymbol{\varepsilon_l}$, sigue la siguiente relación:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{-F}{S \cdot E}$$

**E:** Módulo de Young o de elasticidad longitudinal ($N/m^2$), depende del tipo de material.



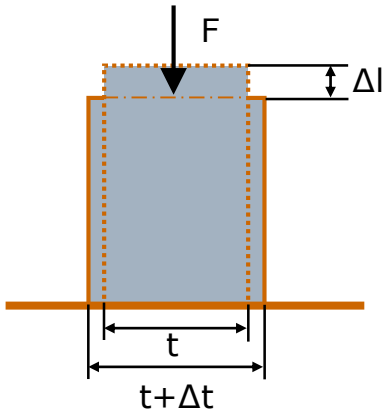

- *Límite elástico o límite de fluencia*: tensión máxima que puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

## Conceptos básicos relación Fuerza-Deformación.

- Coeficiente de Poisson ($\mu$). Relaciona la deformación longitudinal y transversal de un prisma de material elástico lineal, sometido a fuerzas de tracción o compresión.




$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \qquad \varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t} \qquad \mu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

| Material | μ |
|---|---|
| Titanio | 0.34 |
| Cobre | 0.34 |
| Aluminio aleado | 0.33 |
| Bronce | 0.31 |
| Níquel | 0.30 |
| Acero inoxidable | 0.30-0.31 |
| Acero | 0.27-0.30 |
| Hierro colado | 0.21-0.26 |
| Hormigón | 0.20 |
| Vidrio | 0.18-0.3 |
| Caucho | ~ 0.5 |

El coeficiente de Poisson se encuentra en el margen (0,0.5) para la gran mayoría de materiales, con un valor típico del orden de 0.3.

**Ejemplo:** Obtener $\varepsilon_l$ y $\varepsilon_t$ del prisma de acero de la figura anterior, cuando es sometido a una fuerza de 100 N distribuida uniformemente sobre una superficie de 1cm$^2$. Calcule, además, la fuerza máxima que se puede aplicar sin superar el límite de elasticidad.

**DATOS:**

$$\sigma \quad -F \quad -100/9.8$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

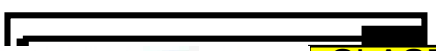
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Definición. Son los dispositivos electrónicos utilizados para transformar la deformación en una variable eléctrica. Los mas habituales son aquellos que presentan una resistencia eléctrica que es función de la deformación a la que son sometidos. Para ello, se adhieren convenientemente a la superficie a medir.
    - *Galgas conductoras:* Están realizadas con material conductor y la variación de la resistencia es función de la variación en las dimensiones (*L y S*) y la variación de resistividad por el efecto piezorresistivo.
    - *Galgas semiconductoras*: Aquí el efecto principal es el piezorresistivo. En los materiales semiconductores la resistividad ($\rho$) cambia acusadamente con la tensión mecánica soportada.

$$R = \rho \frac{L}{S} \Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} = \frac{dL}{L}[1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)] = \varepsilon_l \cdot K_l$$

C: constante de Bridgman. C≈1 en aleaciones y hasta unos 100 en semiconductores.

*De película metálica*



*De película semiconductora*

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Comparación galgas metálicas y semiconductoras. De forma general se utilizan galgas metálicas. Para aquellas aplicaciones en las que se deben medir deformaciones muy pequeñas, puede ser preferible el uso de semiconductoras, gracias a su elevada sensibilidad (*factor de sensibilidad o factor de galga, $K_l$*). En contra, son mas sensibles a la temperatura y menos robustas.
  - Factor de galga, $K_l$. Relaciona la deformación longitudinal de la galga y la variación de su resistencia. Esta relación es aproximadamente lineal dentro de un margen especificado, resultando: $Rg = Ro(1 + K_l \cdot \varepsilon_l)$

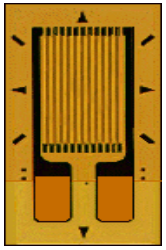
| | Metálicas | Semiconductoras |
|---|---|---|
| Margen medida με | 0,1 a 40000 | 0,001 a 3000 |
| Factor sensibilidad K | 1,8 a 2,35 | 50 a 200 |
| Resistencia R0 (Ω) | 120, 350, 600,1000 | 1000 a 5000 |
| Tolerancia % | 0,1 a 0,2 | 1 a 2 |
| Temp. máxima | 120°C | 100°C |

| Material | Factor de galga |
|---|---|
| Advance o Constantan | 2.1 |
| Kama | 2 |
| Isoelastic | 3.6 |

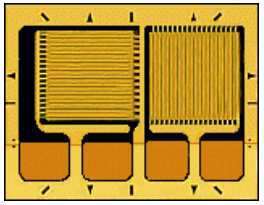
Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

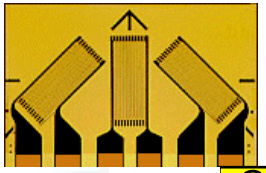
- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Tipos según deformación medida.
    - *Uniaxial:* Mide la deformación en una dirección.
    - *Biaxiales y rosetas:* Miden deformaciones en varias direcciones.
    - *Radiales y tangenciales:* Miden deformaciones de dichas características.
    - *Otras.*

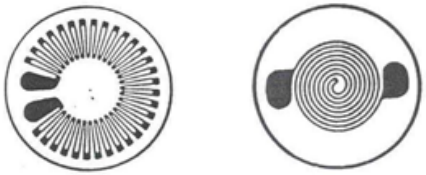


Uniaxial

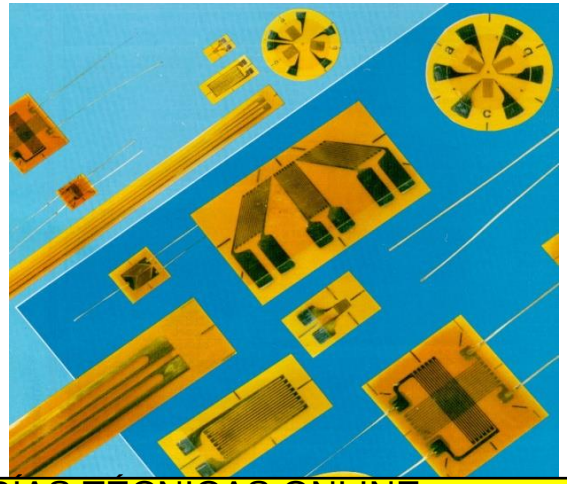


Rosetas





Radiales y tangenciales



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Parámetros de error.
    - *Tolerancia de Ro (T(Ro)).*
    - *Tolerancia del factor de galga ($T(K_l)$) y su coeficiente de temperatura ($CT(K_l)$).*
    - *Sensibilidad transversal ($K_t$).* La sensibilidad de la galga a deformaciones perpendiculares a su dirección de medida debe ser cero. En la práctica esta sensibilidad se indica como un porcentaje de $K_l$, por ejemplo, +0.6% de $K_l$.
    - *Deformación aparente (apparent strain) o salida térmica ($\varepsilon_{Ap}$).* Sin esfuerzo aplicado, la resistencia de una galga montada en una pieza cambia con la temperatura como consecuencia de tres efectos: coeficiente de temperatura de la resistividad, dilatación del sustrato de la galga, dilatación de la pieza que soporta los esfuerzos. Algunas disposiciones de medida que utilizan varias galgas consiguen compensar este efecto, pero en aplicaciones de galgas individuales el error por este concepto es muy elevado. Para reducirlo se utilizan galgas compensadas (*selft-compensated strain gages*) para el coeficiente de dilatación que presenta el material del que está construido la pieza. El error remanente por este concepto

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Ejemplo de Características de una galga metálica.

**Type** ■ Series , S-T-C number , pattern , and grid resistance of the strain gage as determined by the Micro-Measurements Gage Designation System .

**Option** ■ Any Optional Feature the gage contains.

**Quantity** ■ Number of uniaxial gages or rosettes contained in the package at the time it was shipped. Typically 5 per package.

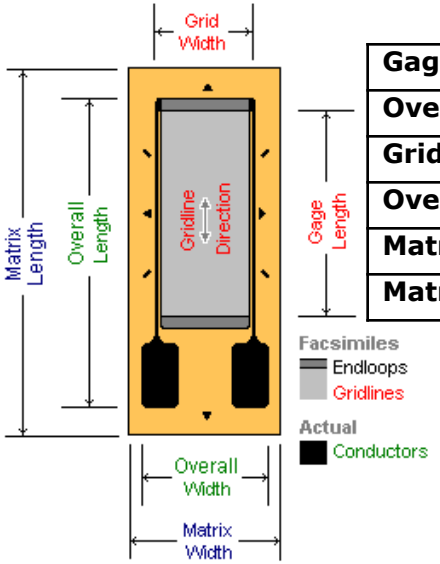
**Lot Number** ■ Designation for a group of gages with grid elements from a common melt of strain-sensing alloy, subjected to the same mechanical and thermal processes during manufacturing.

**Resistance** ■ Statistical average and 2-Sigma (95% confidence) limits for the electrical resistance of the gage grids.

**Gage Factor** ■ Obtained through calibration of the specific gage type, the gage factor, *GF* , is:

$$GF = \frac{\Delta R/R_o}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R_o}{\varepsilon}$$

where $R_o$ is the initial unstrained resistance of the gage. A measure of sensitivity of the gage to strain, the gage factor is reported as the statistical average with 2-Sigma (95% confidence) limits.



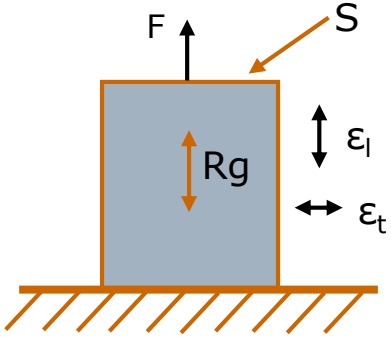

| | |
|---|---|
| **Gage Length** | 6.35 mm |
| **Overall Length** | 11.4 mm |
| **Grid Width** | 4.57 mm |
| **Overall Width** | 4.57 mm |
| **Matrix Length** | 14.0 mm |
| **Matrix Width** | 6.9 mm |

| | |
|---|---|
| **Temperature Range** | Normal: -75 ºC to +175º C<br>Special or Short-Term: -195º C to +205º C) |
| **Strain Range** | ± 3% for gage lengths under 3.2mm<br>± 5% for 3.2mm and over |

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Ejemplo 1: Calculo de errores de una galga. Supuesto la galga anterior, montada como se indica, obtenga los diferentes errores en la medida de la deformación.




$E=2.1\cdot10^4(Kg/mm^2)$
$S=1cm^2$
$\mu=0.3$
$0\le F\le 10^5 N$

$$Rg = Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l) = 120(1+K_l\frac{F/9.8}{2.1\cdot10^6}) = 120(1+K_l\cdot4.84\cdot10^{-8}\cdot F)$$

$$S = 0.0484\,\mu\varepsilon/N \equiv 12.16\,\mu\Omega/N$$

**1. Tolerancia Ro, T(Ro)=±0.3%:**

$$\Delta Rg = \Delta Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l) = Ro\cdot T(Ro)(1+K_l\cdot\varepsilon_l)$$

$$Incertidumbre\_Offset = \frac{\Delta Ro}{12.16\,\mu\Omega/N} = \pm2.96\cdot10^4\,N$$ ⇑⇑⇑ NECESARIO AJUSTE

$$Incertidumbre\_Ganancia = \frac{\Delta Ro}{Ro} = T(Ro) = \pm0.3\%$$

**2. Tolerancia $K_l$, $T(K_l)$=±0.5%** ⇨ $Incertidumbre\_Ganancia = T(K_l) = \pm0.5\%$

**3. Sensibilidad transversal, $K_t$=(0.6±0.2)% de $K_l$:**

$K_l$

Cartagena99
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Ejemplo 2: Error por deformación aparente. Supuesta la galga anterior, no compensada térmicamente, montada en una pieza de acero que presenta un coeficiente de dilatación α=+11ppm/ºC, obtener el error en la medida de fuerza.

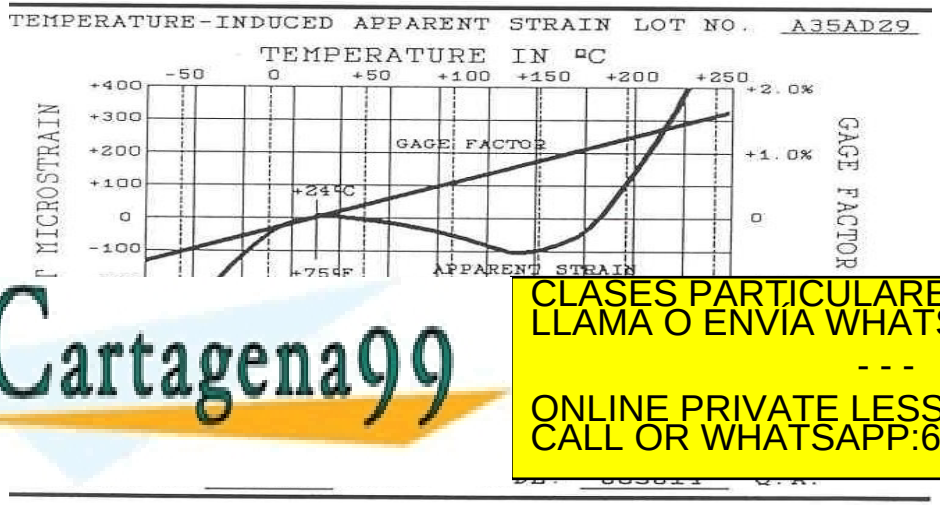
En la práctica, existiría además el efecto de dilatación del sustrato de la galga y el de su resistividad, que hemos supuesto nulos en este ejemplo. Resultaría:

$$Rg = Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l)(1+K_l\cdot\alpha\cdot t) \cong Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l+K_l\alpha\cdot t)$$

$$S = 0.0484\,\mu\varepsilon / N \equiv 12.16\,\mu\Omega / N$$

$$Error = \frac{Ro\cdot K_l\cdot\alpha\cdot t}{12.16\,\mu\Omega / N} = 226\cdot t(N) \rightarrow 226\,N/^{o}C \rightarrow 10.9\,\mu\varepsilon/^{o}C$$

En muchas aplicaciones el error es excesivo y debe usarse una galga compensada en temperatura.

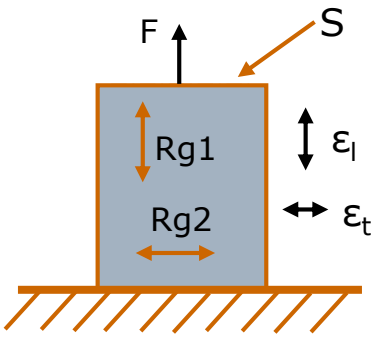


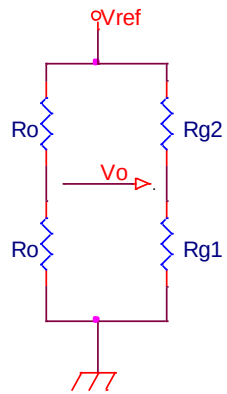

Si la gráfica de error de una galga compensada para acero es la indicada, en el margen entre 75ºF y 275ºF (111ºC de incremento), el error es de -100με, lo que equivale a -0.9με/ºC

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Otras soluciones para reducir el error por deformación aparente. Se utilizan configuraciones con varias galgas pegadas a la pieza, y dispuestas, normalmente, en un puente de Wheatstone.



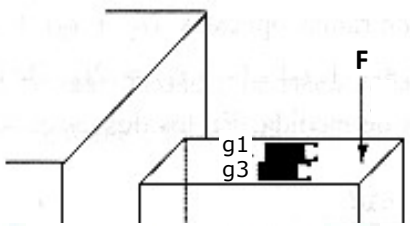

$$Rg1 = Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l)(1+\alpha\cdot t)$$

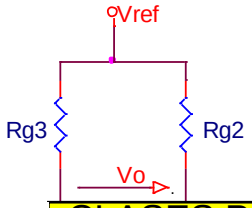
$$Rg2 = Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_t)(1+\alpha\cdot t)$$

Anulado efecto α

$$Vo = Vref\left[\frac{Rg1}{Rg1+Rg2}-\frac{1}{2}\right] = Vref\left[\frac{1+K_l\cdot\varepsilon_l}{(1+K_l\cdot\varepsilon_l)+(1+K_l\cdot\varepsilon_t)}-\frac{1}{2}\right] \cong$$

$$\cong \frac{Vref}{4}(K_l\cdot\varepsilon_l - K_l\cdot\varepsilon_t) = \frac{Vref}{4}\cdot K_l\cdot\varepsilon_l(1+\mu)$$



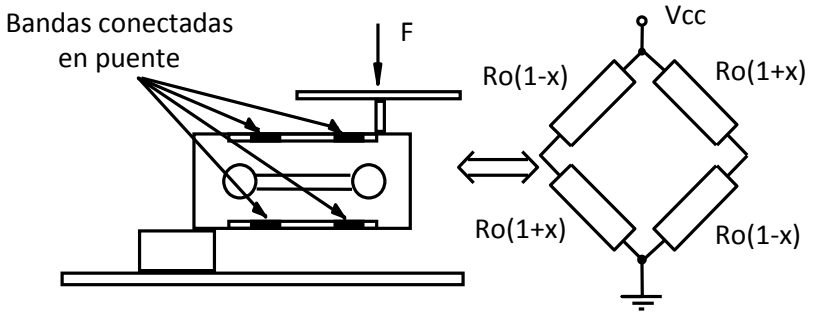

$$Rg1 = Rg3 = Ro(1+K_l\cdot\varepsilon_l)(1+\alpha\cdot t)$$

$$Rg2 = Rg4 = Ro(1-K_l\cdot\varepsilon_l)(1+\alpha\cdot t)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Célula de carga. Es un dispositivo para medir fuerza que integra el elemento mecánico que convierte la fuerza en deformación y las bandas extensométricas pegadas para medir dichas deformaciones. Una aplicación muy usual es en una balanza electrónica. Según las características de la pieza, se pueden construir balanzas con fondos de escala desde gramos hasta cientos de toneladas, con exactitudes muy elevadas.

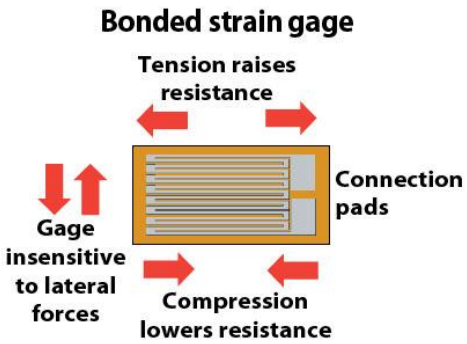


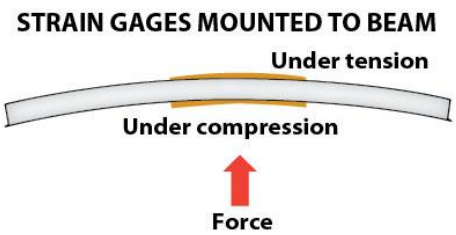
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

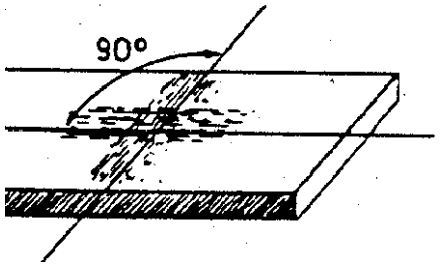
- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Colocación de galgas.



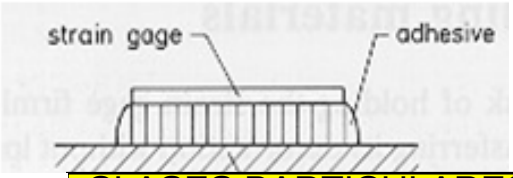




1.- Desengrasado, limpieza y pulido de superficie.

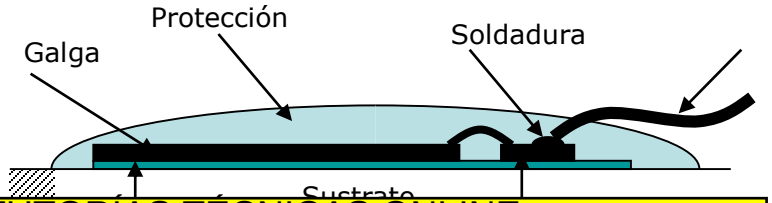
2.- Trazado ejes referencia.




3.- Pegado de la galga al soporte.



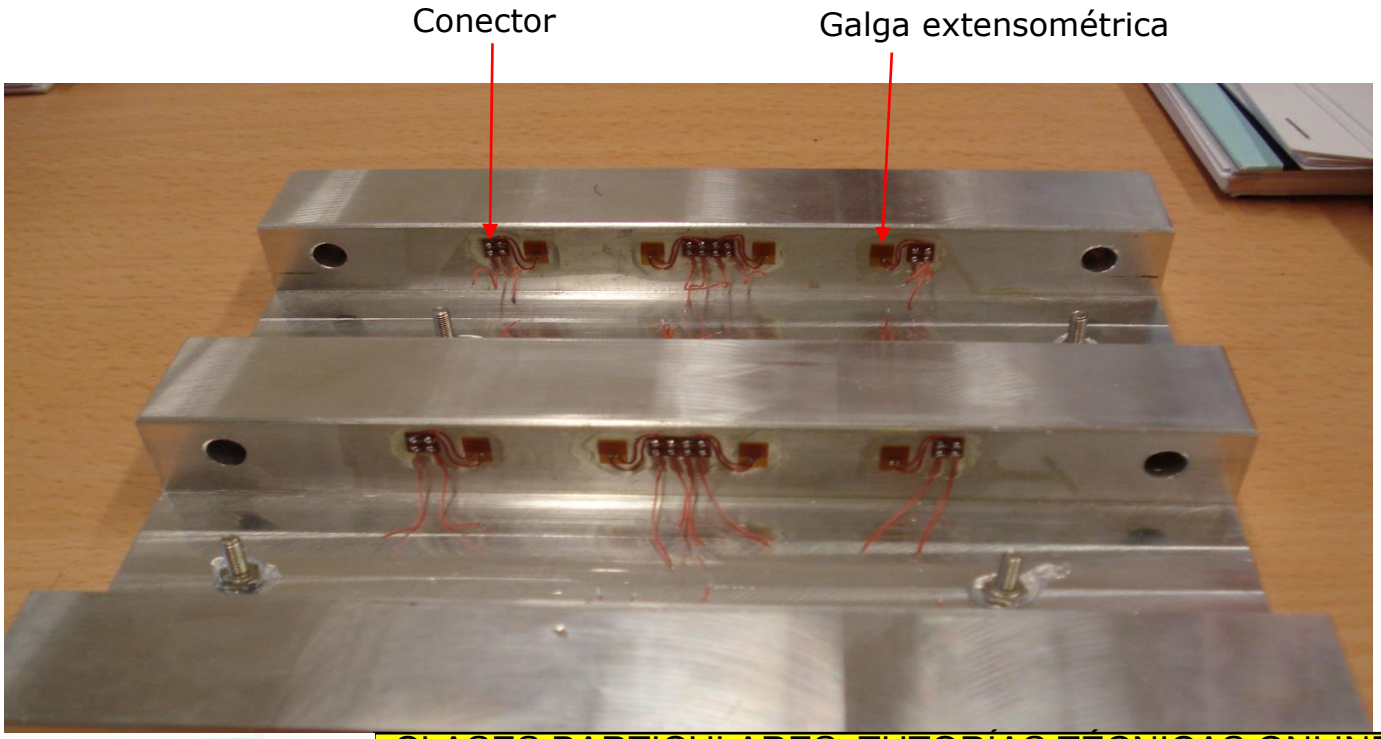

4.- Protección de la galga.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Galgas o bandas extensométricas (*strain gauge*).
  - Medida de la distribución de fuerzas sobre un plano.




CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

# Sensores de magnitud física

## Referencias y Bibliografía


- M.A. Pérez et al. Instrumentación Electrónica. Ed. Thomson.
- A.Creus. Instrumentación Industrial. Ed. Marcombo.
- A. D. Khazan. Transducers and Their Elements. Ed.Prentice Hall.
- T.G. Beckwith, R.D. Marangoni. J.H. Lienhard. Mechanical Measurements. Ed. Addison-Wesley.
- Documentos en página web de la asignatura.
- http://www.labfacility.com
- http://www.minco.com
- http://www.analog.com
- http://www.ti.com
- http://www.thermometricscorp.com
- http://www.epsilontech.com
- http://www.smdsensors.com/



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
- - -
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.