
Introducció als sensors

PID_00257319

Ferran Domínguez Gros
Jordi Solé Casals

Temps mínim de dedicació recomanat: 6 hores



Ferran Domínguez Gros

Enginyer tècnic de Telecomunicacions (Universitat Politècnica Catalunya). Col·laborador de la UOC des del 2003 en els estudis d'Enginyeria Informàtica, ETTT, grau de Telecomunicació, postgrau i màster de Seguretat Informàtica. Treballa des de fa temps en diferents empreses privades del sector de les telecomunicacions, informàtic i sanitari en diferents projectes de tecnologies de la informació i la comunicació (TIC).

Jordi Solé Casals

Doctor enginyer de Telecomunicacions (Universitat Politècnica Catalunya). Llicenciat en Humanitats (Universitat Oberta de Catalunya). Col·laborador de la UOC des del 2001 en els estudis d'Enginyeria Informàtica, ETTT, grau de Telecomunicació. Actualment, és professor titular al Departament de Tecnologies Digitals i de la Informació de la Universitat de Vic. El seu àmbit de recerca se centra en el processament de senyals biomèdics.

Tercera edició: febrer 2019
© Ferran Domínguez Gros, Jordi Solé Casals
Tots els drets reservats
© d'aquesta edició, FUOC, 2019
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Disseny: Manel Andreu
Realització editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars dels drets.

Índex

| | |
|--|----|
| Introducció | 5 |
| Objectius | 7 |
| 1. Sensors de temperatura | 9 |
| 1.1. Resistències metàl·liques (RTD) | 10 |
| 1.1.1. Model matemàtic | 11 |
| 1.1.2. Metalls més utilitzats en la construcció d'RTD | 11 |
| 1.1.3. Diferents aspectes de les RTD | 14 |
| 1.1.4. Aplicacions de les RTD | 17 |
| 1.1.5. Condicionament del senyal per a les RTD | 17 |
| 1.2. El termoparell | 22 |
| 1.2.1. Tipus de termoparells | 25 |
| 1.2.2. Tipus d'unió dels metalls que conformen els termoparells | 26 |
| 1.2.3. Condicionament del senyal per als termoparells | 28 |
| 1.3. El termistor (NTC) | 29 |
| 1.3.1. Model matemàtic: exponencial | 31 |
| 1.3.2. Relació temperatura-resistència en els NTC | 31 |
| 1.3.3. Alguns models comercials de termistors NTC | 32 |
| 1.4. Sensors de silici | 33 |
| 1.5. Comparativa i quadre resum dels diferents sensors de temperatura | 37 |
| 1.6. Sensors de radiació | 38 |
| 2. Sensors de distància | 43 |
| 2.1. Mesurament de la posició lineal | 43 |
| 2.1.1. Mesuraments de la distància sense contacte físic | 44 |
| 2.1.2. Mesuraments de la distància amb contacte físic | 46 |
| 2.2. Mesurament de la posició angular | 53 |
| 2.2.1. Potenciòmetres | 54 |
| 2.2.2. Sensors electromagnètics rotatius de posició angular | 56 |
| 2.2.3. Sensors inductius | 58 |
| 2.2.4. Codificadors de polsos | 60 |
| Resum | 64 |
| Exercicis d'autoavaluació | 65 |
| Solucionari | 67 |

| | |
|---------------------------|----|
| Glossari | 71 |
| Bibliografia | 73 |

Introducció

Un pacient ingressa en un hospital i li han de fer una exploració cardíaca. Un centre de procés de dades requereix la mesura correcta i constant de la temperatura i humitat ambiental per al funcionament correcte del seu maquinari. Un supermercat vol utilitzar un sistema fàcil de cobrament dels productes que ven als clients mitjançat, per exemple, un lector de codi de barres associat a cada producte. La Direcció General de Carreteres (DGC) vol controlar la velocitat a la qual circulen els cotxes per una autovia. Una indústria determinada vol mesurar el flux de fluid que passa per un punt concret en un moment determinat.

Aquests són només uns quants exemples d'una llista infinita de casos o circumstàncies en què pretenem detectar i mesurar variables concretes.

Així, doncs, en la nostra vida quotidiana i en molts àmbits professionals, de la indústria i en una àmplia varietat de negocis, es fa necessari mesurar variables mecàniques, tèrmiques, elèctriques, òptiques, biològiques, químiques, etc.

Els sensors són els elements que permeten obtenir les variacions d'aquests senyals físics i convertir-los en altres senyals, i traduir-los en magnituds amb característiques específiques. Aquesta traducció ens permet interpretar i manipular les variacions d'aquestes variables físiques.

Establir un criteri per a l'assignació d'un tipus de sensor concret i apropiat per a cada tipus de variable física podria desbordar l'abast mateix d'aquests materials didàctics. De fet, si fem una classificació orientada no al tipus de sensor sinó al tipus de variable, podríem parlar de:

- Mesurament de la temperatura.
- Mesurament de la distància (posició).
- Mesurament de la presència i proximitat.
- Mesurament de la velocitat.
- Mesurament de l'acceleració i la vibració.
- Mesurament de la força i el pes.
- Mesurament de la pressió.
- Mesurament del nivell.
- Mesurament del cabal.

En aquesta classificació podríem afegir més variables físiques per mesurar, però, concretament, ens centrarem en les dues primeres: **temperatura** i **distància**.

En aquest punt matisarem el mesurament de les variables de **presència** i **proximitat**, en què els sensors utilitzats per a això tenen la funció de detectar l'existència d'un objecte dins del seu radi d'acció. Tot i que de vegades es fa molt difícil establir quan es tracta d'una variable de proximitat o quan es tracta d'una variable de presència, el concepte d'un sensor que mesuri la presència sempre es refereix a un camp d'acció relativament gran, mentre que el de proximitat sempre té un radi d'acció més limitat.

El mesurament de la **distància** es refereix, en realitat, a la **posició** d'un objecte concret i acostuma a ser un cas molt habitual dins de la instrumentació industrial actual.

Objectius

Els objectius que ha d'assolir l'estudiant amb aquest mòdul didàctic són els següents:

- 1.** Conèixer els diferents tipus de sensors per a detectar i mesurar les variables de temperatura i distància.
- 2.** Entendre la base de funcionament d'aquests sensors.
- 3.** Conèixer-ne les possibles aplicacions en situacions reals.
- 4.** Saber-ne interpretar les principals característiques donades pels fabricants, per tal de tenir criteri a l'hora d'escollir-ne un d'acord amb les nostres necessitats.

1. Sensors de temperatura

Mesurar la temperatura té una importància fonamental en nombrosos processos industrials, tecnològics, sanitaris i, també, domèstics, per esmentar-ne només uns quants. D'aquesta manera, de tots els sensors que es poden trobar en el mercat, els sensors de temperatura són, sens dubte, uns dels més importants.

En general, es fa indispensable disposar d'una mesura de la temperatura precisa. L'obtenció d'uns valors incorrectes pot tenir conseqüències greus, com, per exemple, la reducció de la vida útil d'un equipament si pateix un sobreescalfament d'uns quants graus.

És evident que gràcies a l'evolució de la tecnologia i la seva integració, les prestacions dels sensors de temperatura també han millorat. Si bé fa uns anys els sensors de temperatura únicament ens servien per a mesurar una temperatura concreta, per exemple parlant d'un habitatge, actualment no sols podem tenir la certesa de la temperatura exacta sinó també de la temperatura que tindrem en funció del sistema d'ambientació/climatització que s'utilitzi i de la que tindriem en proporció a la mida de l'habitació que s'estigui revisant.

L'elecció del sensor més adequat per a cada aplicació no resulta sempre evident. Entre els sensors de temperatura més habituals podem enumerar els següents:

- Resistència metàl·lica o detector de temperatura resistiu (RTD¹).
- Termoparell.
- Termistor (NTC²).
- Sensors de silici.
- Sensors de radiació.

En realitat, i en funció de les aplicacions concretes en què els vulguem utilitzar, els podem agrupar en tres grups d'alternatives possibles:

- Decidir entre resistències metàl·liques o termoparells.
- Decidir entre termistors i sensors de silici.
- Decidir-nos pels sensors de radiació.

Instrumentació industrial

És el grup d'elements que serveixen per a mesurar, convertir, transmetre, controlar o registrar variables d'un procés per tal d'optimitzar els recursos utilitzats en aquest procés.

⁽¹⁾De l'anglès, *resistance temperature detector*.

⁽²⁾De l'anglès, *negative temperature coefficient*.

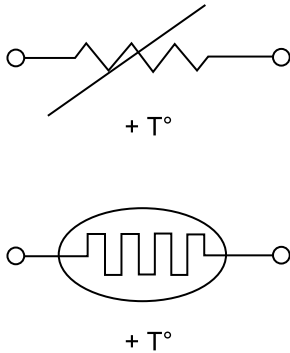
Inclinar-nos per una alternativa o una altra és una qüestió per a la qual necessitem tenir una mica més de criteri.

Vegem-ne, una per una, les característiques principals.

1.1. Resistències metàl·liques (RTD)

Els símbols normalment utilitzats per les RTD es mostren en la figura 1.

Figura 1. Símbols d'una RTD



Els metalls es caracteritzen perquè tenen coeficients tèrmics positius de variació de la resistència elèctrica. Quan n'augmenta l'energia interna, n'augmenta la resistivitat.

Aquesta propietat dels metalls s'utilitza des de fa temps en el disseny i construcció de sensors de temperatura de resistència metàl·lica o RTD.

Recordem que la resistència elèctrica, R , d'un conductor metàl·lic és determinada per l'equació:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

en què ρ és la seva resistivitat, l la longitud del conductor i S la secció. En equilibri tèrmic, aquest conductor metàl·lic presentarà una resistència R_{T1} proporcional a la temperatura T_1 del medi, amb la qual cosa no hi haurà pràcticament intercanvi d'energia (el fil metàl·lic tindrà, en realitat, la mateixa temperatura que el medi).

Si la temperatura del medi augmenta a T_2 , la resistivitat, la longitud i la secció del conductor també canviaran per l'efecte de la dilatació del metall. Si considerem mínims els canvis que patiran aquesta secció i longitud del fil metàl·lic per efecte de la dilatació en comparació dels canvis de resistivitat amb l'augment de la temperatura, veiem que la resistència també canviarà linealment amb la resistivitat. Veiem, doncs, que un increment de la temperatura

Equilibri tèrmic

Representa la situació en què la temperatura dins d'un sistema és uniforme.

del medi produeix també un increment lineal de la resistència del conductor metàl·lic. Aquest efecte sobre els metalls és el que s'aprofita en la construcció d'RTD.

1.1.1. Model matemàtic

Com hem vist, el fonament de les RTD és la variació de la resistència d'un conductor amb la temperatura. En un conductor, el nombre d'electrons disponibles per a la conducció elèctrica no canvia de manera apreciable amb la temperatura. No obstant això, si la temperatura augmenta, les vibracions dels àtoms entorn de les seves posicions d'equilibri també augmenten i dispersen d'una manera més eficaç els electrons i en redueixen la velocitat mitjana. Aquest fet implica un coeficient tèrmic positiu, això és, un augment de la resistència amb la temperatura (R_T). Aquesta dependència es pot expressar com a:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots) \quad (2)$$

En què:

R_0 és la resistència de l'RTD a la temperatura de referència (T_0), és a dir, per a $T = T_0 = 273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$.

ΔT és la variació de temperatura respecte a la referència ($T - T_0$), i per tant, si la referència és $T_0 = 273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$, llavors ΔT serà la temperatura T expressada en graus centígrads.

α , β , γ ... són els coeficients del model d'RTD utilitzat per als termes lineal, quadràtic, cúbic, etc. Cal tenir en compte que les unitats d'aquests coeficients dependran de si treballem amb graus centígrads o graus kelvin per a la temperatura.

En general, els valors de β i γ són molt petits (de l'ordre de 10^4 i 10^9 vegades menys, respectivament, en comparació del valor de α per al cas del platí), i per tant podem aproximar la fórmula com a:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3)$$

1.1.2. Metalls més utilitzats en la construcció d'RTD

Els metalls més utilitzats normalment per a la construcció d'RTD són el platí (Pt), el níquel (Ni) i el coure (Cu).

El platí és el que presenta el coeficient tèrmic més baix, mentre que el níquel és el que el té més alt. Això vol dir que les RTD de níquel presentaran una sensibilitat més gran que les de platí. Aquesta sensibilitat més gran de l'RTD de níquel es tradueix en el fet que, davant d'un canvi en la seva temperatura, hi haurà també una variació més gran en la seva resistència.

Per contra, el platí té una resistivitat més gran que facilita la construcció de fils conductors molt més fins, no gaire llargs i amb una bona resistència. El níquel no experimenta una linealitat tan bona si se n'augmenten les dimensions.

Aquest comportament diferent en la linealitat de la resistència en funció de la temperatura fa que no tots els metalls puguin ser utilitzats en la construcció d'RTD.

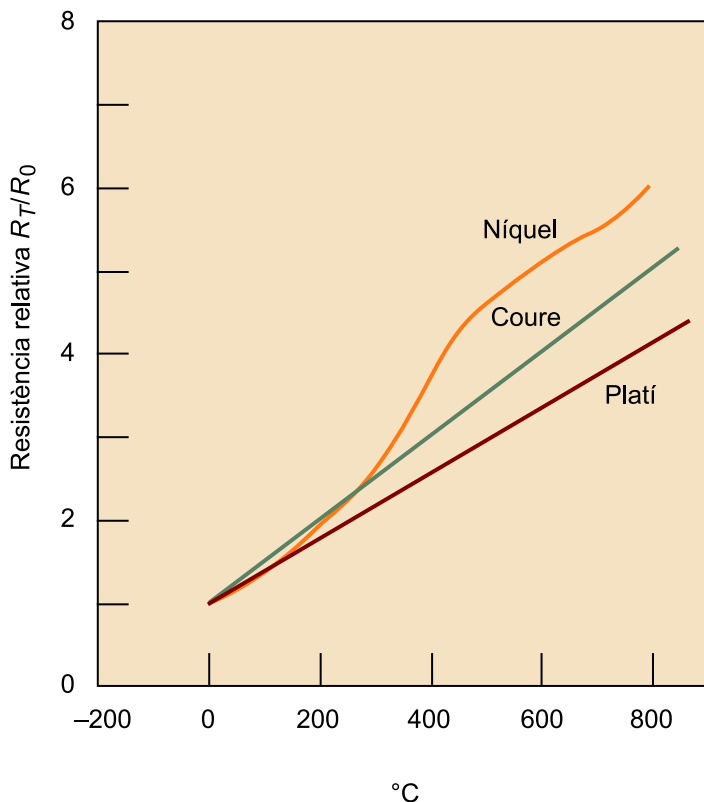
En la taula 1 es presenten els metalls més utilitzats per a la construcció d'RTD –el platí (Pt), el níquel (Ni) i el coure (Cu)–, amb els seus coeficients tèrmics (α , variació de la resistència a temperatura ambient) i les seves resistivitats (ρ).

Taula 1. Metalls més utilitzats per a la construcció d'RTD

| Metalls | Resistivitat (ρ) $\Omega \cdot m$ | Coefficient tèrmic (α) K^{-1} |
|-------------|--|--|
| Platí (Pt) | $10,6 \times 10^{-8}$ | $3,9 \times 10^{-3}$ |
| Níquel (Ni) | $6,84 \times 10^{-8}$ | 7×10^{-3} |
| Coure (Cu) | $1,68 \times 10^{-8}$ | $4,3 \times 10^{-3}$ |

A partir dels valors de la resistència de cadascun dels metalls en funció de la temperatura, els fabricants d'RTD elaboren les respectives **corbes de calibratge** (figura 2).

Figura 2. Corbes de calibratge del platí, el níquel i el coure



Nota: tingueu present que les 3 corbes han de passar per 1 a 0°C.

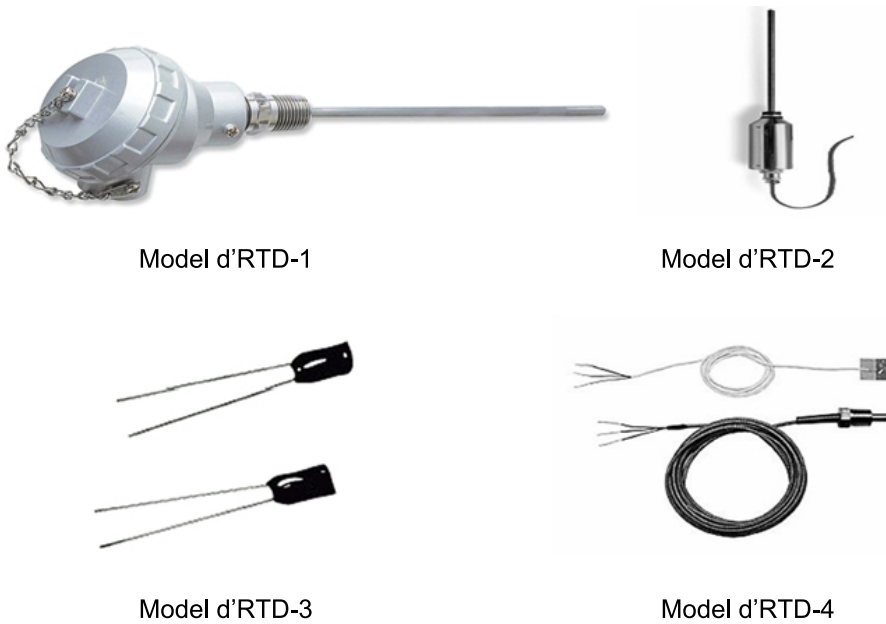
En aquestes corbes de calibratge, observem que les RTD que tenen una linealitat més gran són les de platí i les de coure, motiu pel qual els fabricants les acostumen a utilitzar per a la gran majoria d'aplicacions. No obstant això, continuem notant que l'RTD de níquel és més sensible que la de coure i bastant més que la de platí.

En general, les resistències metàl·liques són un tipus de sensors molt utilitzats actualment, tant en aplicacions industrials com en l'àmbit domèstic, en general en climatitzadors de gran precisió. Aquesta gran acceptació es deu principalment a tres característiques:

- Gran estabilitat en el temps.
- Molt bona precisió.
- Resposta ràpida.

A més, hi ha una gran varietat d'encapsulatges per a les RTD. En la figura 3 en tenim alguns exemples comercials amb diferents tipus d'aquests encapsulatges.

Figura 3. Diferents exemples d'encapsulatges d'RTD comercials



1.1.3. Diferents aspectes de les RTD

Tot seguit, veurem un conjunt de característiques que ens permetran classificar les RTD. Considerarem les següents:

- Tipus de metall.
- La forma o l'encapsulatge.
- Característiques del medi.
- La mida.
- El valor resistiu, R_0 .
- La tolerància.

1) Segons el **tipus de metall** que utilitzen els fabricants per a elaborar-les, les RTD més populars són les de platí, gràcies a la seva linealitat i la seva estabilitat en el temps. Utilitzada per a diferents aplicacions i en contacte directe amb el medi, l'RTD de platí presenta una reactivitat molt baixa i per tant una deformació baixa en un ampli ventall de temperatures.

Com s'ha vist, també es fabriquen amb coure per a aplicacions a baixes temperatures i quan la precisió no és un aspecte indispensable de l'aplicació. El wolframí, del qual no hem parlat fins ara, també és un metall utilitzat quan l'RTD ha de treballar amb temperatures altes i amb precisió baixa.

Per a millorar la poca linealitat del níquel, també s'utilitza un aliatge amb ferro (70% de níquel i 30% ferro) que dóna una RTD resultant utilitzada per a aplicacions de baix cost i sensible amb baixes temperatures.

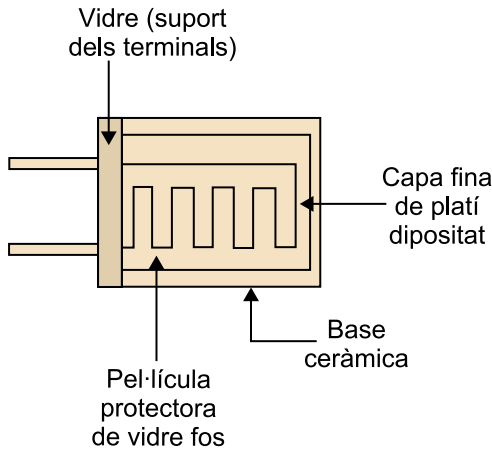
2) Segons la **forma o l'encapsulatge**, en realitat les RTD poden ser de dos tipus:

- Pel·lícula metàl·lica.
- Bobinades.

Les de pel·lícula metàl·lica consisteixen en una pel·lícula fina de platí sobre una base ceràmica (material aïllant elèctric i bon conductor de la calor) i recoberta per una pel·lícula de vidre fos a manera de protecció.

En la figura 4 podem veure un esquema de l'RTD de pel·lícula metàl·lica.

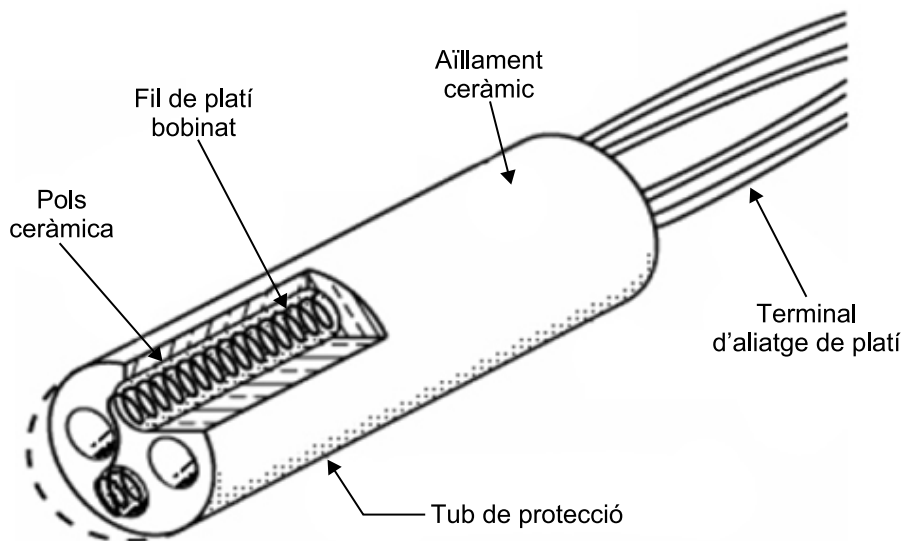
Figura 4. Esquema d'RTD de pel·lícula metàl·lica



Les bobinades disposen el fil conductor bobinat sobre un element ceràmic que permet la dilatació d'aquest fil amb el canvi de temperatura. Hi ha una variació d'aquest tipus d'RTD, les anomenades *RTD de bobina suspesa*, en què el bobinatge del fil metàl·lic té forma helicoidal dins de tubs de ceràmica plens de pols ceràmica i segellats amb vidre en els extrems.

Veiem un esquema d'RTD de bobina suspesa en la figura 5:

Figura 5. Esquema d'RTD de bobina



3) Segons les característiques del **medi**, diferenciem les de contacte superficial i les d'immersió en el fluid, ja es tracti de líquids o de gasos. Les de contacte superficial normalment són de pel·lícula metàl·lica amb una base plana o flexible per a adaptar-se a la superfície amb la qual farà contacte. Les d'immersió en el fluid acostumen a ser bobinades i protegides amb un tub d'acer inoxidable.

4) Segons la **mida** de l'RTD, ens podem trobar sensors diminuts si l'aplicació per la qual és utilitzada pretén mesurar un punt concret del medi. Si, pel contrari, es tracta d'obtenir la temperatura mitjana de tota una àrea, la mida de l'RTD pot ser de diversos centímetres.

5) Segons el **valor resistiu**, R_0 , a 0 °C veiem en la taula 2 un quadre d'RTD amb els metalls de fabricació més utilitzats i el seu marge útil de temperatura. En la columna dels valors resistius R_0 a 0 °C trobem els valors comercials més utilitzats per a cada tipus de metall.

Taula 2. Metalls més utilitzats per a RTD, amb valor de R_0 i marges de temperatura

| Metall | Valors R_0 (Ω) | Marge útil de temperatura (°C) |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Platí | 25, 100, 400, 500, 1.000 i 2.000 | -260 ÷ 900 |
| Wolframi | 10, 50, 100, 1.000 i 2.000 | -100 ÷ 1.200 |
| Níquel | 120, 1.000 | -200 ÷ 430 |
| Coure | 10, 100 i 1.000 | -200 ÷ 260 |
| Aliatge (Ni 70% i Fe 30%) | 100, 1.000 i 2.000 | -100 ÷ 230 |

6) Finalment, també podem classificar les RTD en funció de la **tolerància**. Recordem que com més petita sigui la tolerància tindrem una precisió més gran en aquest tipus de sensor de temperatura.

Per exemple, la norma UNE-EN60751 matissa dos tipus de toleràncies per a les RTD de platí, PT100:

- Classe A per a aplicacions d'alta precisió: $\pm 0,15$ °C / $\pm 0,06$ Ω (0 °C).
- Classe B per a aplicacions estàndard: $\pm 0,30$ °C / $\pm 0,12$ Ω (0 °C).

També hi ha les de classe C i D per a aplicacions de menys precisió.

Resumint, podem concloure que malgrat que el **platí** sigui considerat un metall preciós i d'alt cost, gràcies al seu alt marge d'estabilitat, linealitat i marge de treball, les **RTD fabricades amb aquest metall són les més àmpliament utilitzades**.

1.1.4. Aplicacions de les RTD

Com hem pogut veure, gràcies a la seva gran estabilitat al llarg del temps, la gran precisió (de l'ordre de $\pm 0,2$ °C en àmbits industrials i $\pm 0,0001$ °C per a aplicacions especials de laboratori), la gran varietat d'encapsulatges i la capacitat per a romandre inert en aquells casos en què ha d'interactuar amb el medi i donar una resposta ràpida, les RTD són els sensors de temperatura més utilitzats actualment tant en aplicacions industrials (controladors d'equips de fred i calor), en aplicacions domèstiques (forns de cuina, climatitzadors), com en els automòbils, etc.

1.1.5. Condicionament del senyal per a les RTD

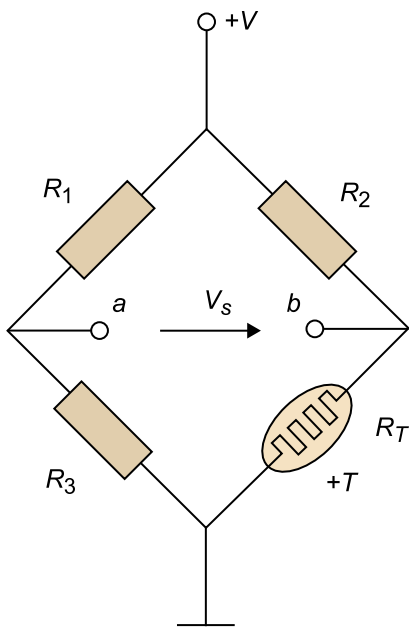
Com hem vist, les RTD són sensors de temperatura la resistència dels quals incrementa amb la temperatura. Mesurar aquesta temperatura implica, doncs, mesurar la resistència de l'RTD i, mitjançant la seva corba de calibratge, avaluar-la. Però aquest mètode no ofereix un senyal elèctric proporcional a la temperatura que volem mesurar.

Si fem circular un corrent I conegut per l'RTD i en mesurem la diferència de potencial, aquesta tensió serà directament proporcional a la temperatura. Per tal de poder aconseguir una tensió que sigui proporcional a les temperatures objecte dels mesuraments que cal avaluar, s'utilitzen els circuits condicionadors.

El circuit condicionador per excel·lència dels sensors RTD, i el més utilitzat, és el pont de Wheatstone alimentat per fonts de tensió i/o corrent.

Analitzem el circuit condicionador del sensor RTD (vegeu la figura 6), el pont de Wheatstone, amb el model lineal d'aquest sensor, en què $R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T)$.

Figura 6. Pont de Wheatstone com a circuit condicionador d'un RTD



Es pot verificar que la tensió de sortida, V_s , serà:

$$V_s = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha\Delta T)}{R_0(1 + \alpha\Delta T) + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (4)$$

Si considerem la temperatura $T = 273 \text{ K} = 0^\circ \text{C}$ i $V_s = 0 \text{ V}$, aleshores V_s coincidirà amb el valor de la temperatura que volem mesurar, per la qual cosa en el pont es complirà:

$$\frac{R_0}{R_0 + R_2} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (5)$$

Una manera usual de mantenir una bona simetria en el pont, si les variacions de R_T són petites, és utilitzar resistències iguals en les branques superiors i amb un valor r vegades superior al de la resistència R_0 del sensor RTD:

$$R_1 = R_2 = rR_0 \quad (6)$$

i seleccionar $R_3 = R_0$. Fent aquestes substitucions en l'equació (4) obtenim:

$$V_s = V \frac{r\alpha\Delta T}{(r + 1) \cdot (r + 1 + \alpha\Delta T)} \quad (7)$$

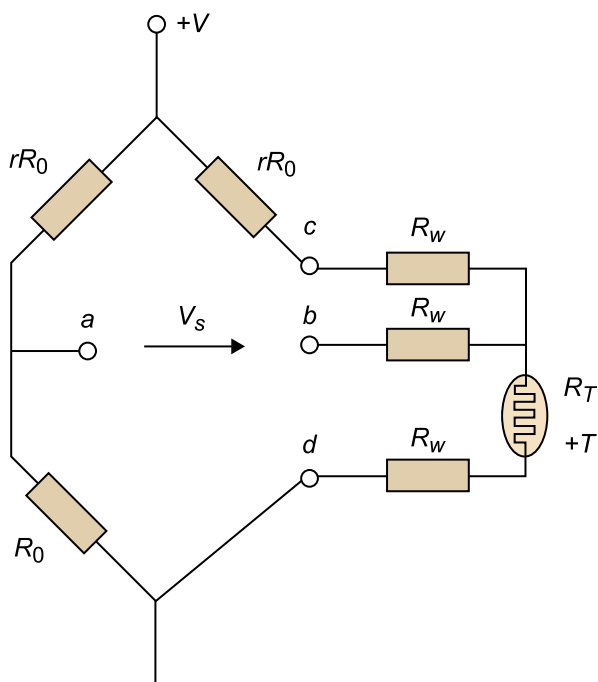
És força habitual que aquests sensors RTD no puguin estar físicament ubicats on tenim el pont de Wheatstone. Per a fer aquesta connexió s'utilitzen cables conductors de certa longitud però de resistència R_w , moltes vegades significativa en comparació de la resistència del sensor R_T (figura 6).

Quan s'utilitzen cables conductors fets d'aliatges especials com la manganina o el constantà, amb un coeficient tèrmic de variació amb la temperatura insignificant, evitem els errors en el mesurament provocats pel canvi de temperatura en els fils. Les resistències, al contrari, acostumen a ser altes.

Si al contrari, s'utilitzen cables conductors de coure de resistència molt baixa, tindrem un coeficient tèrmic alt que introduirà errors significatius en el mesurament.

Aquesta connexió remota de l'RTD al pont de Wheatstone s'anomena *mètode Siemens* o *connexió a tres fils* (figura 7).

Figura 7. Connexió remota d'una RTD



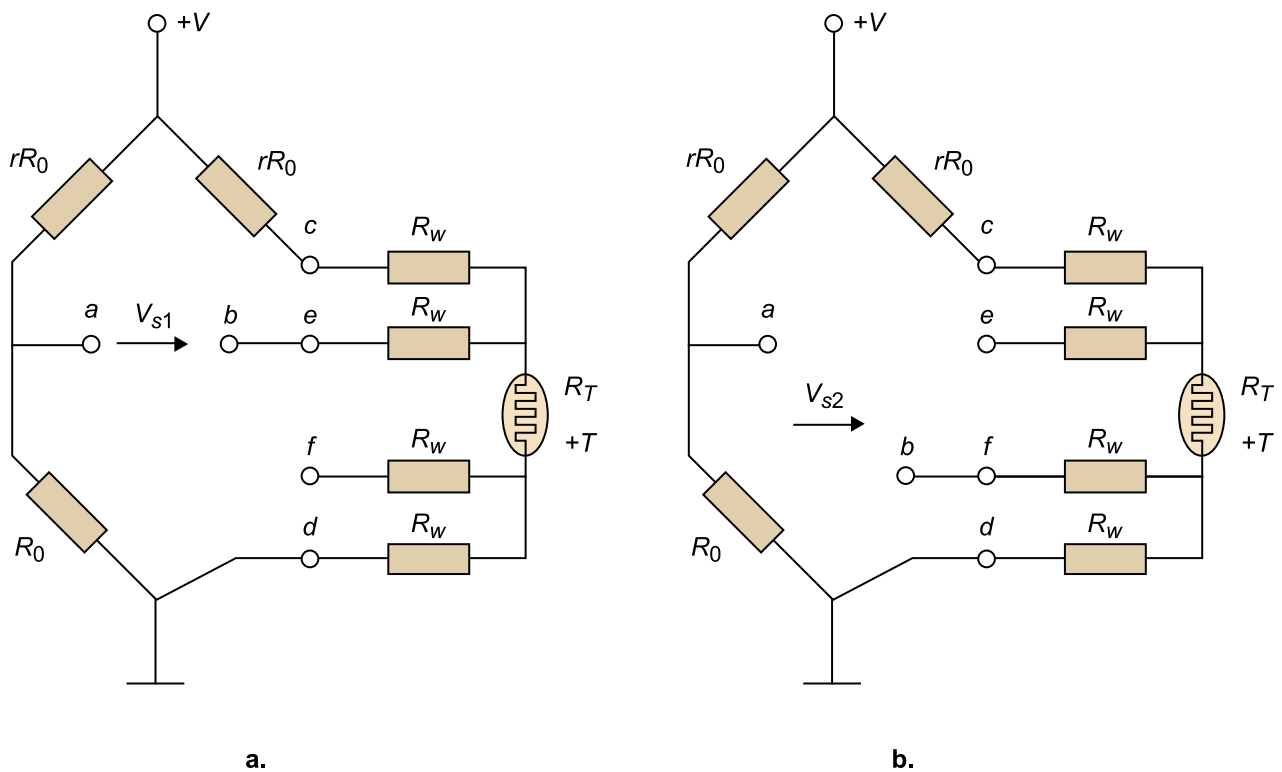
Si els fils connectats al pont en els punts *c* i *d* són iguals en longitud, secció i tipus de material utilitzat, les seves resistències R_w són iguals. Considerant que la resistència de la branca inferior és $R_w + R_T$ i que la resistència de la branca superior és $R_w + rR_0$, l'expressió que obtenim en aquest cas de l'anterior (7) és la següent:

$$V_s = V \frac{r\alpha\Delta T + (r - 1) \frac{R_w}{R_0}}{(r + 1) \cdot \left(r + 1 + \alpha\Delta T + 2 \frac{R_w}{R_0} \right)} \quad (8)$$

No obstant això, per als casos en què cal una mesura de més alta precisió s'utilitza la denominada *connexió a quatre fils* (figura 8). Aquest tipus de connexió s'utilitza per a reduir els errors que introdueixen les resistències dels cables conductors.

Veiem a continuació un exemple d'aquest nou pont de Wheatstone a quatre fils en la figura 8a en què es fa un primer mesurament en els extrems de connexió del pont. Tot seguit, es fa un segon mesurament canviant de posició els extrems de connexió, segons la figura 8b. La resta d'aquests dos mesuraments (V_{S1} i V_{S2}) elimina la dependència en R_W (la que va del node d a l'RTD) en el numerador, fent que només depengui de la suma de les R_W (les que van del node c i el node d a l'RTD). En aquest cas, i a diferència que amb el mètode Siemens, les diferències que pugui haver entre fils conductors no afectaran la mesura.

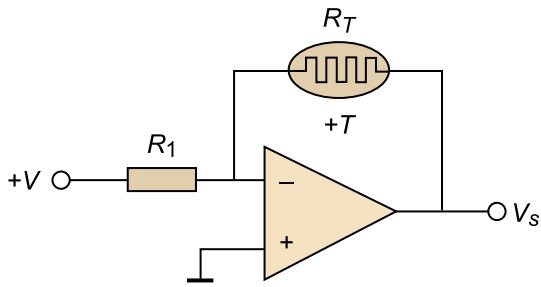
Figura 8. Pont de Wheatstone a quatre fils



A part dels circuits condicionadors de sensors RTD per pont de Wheatstone alimentat per tensió o alimentat per corrent, n'hi ha d'altres també força utilitzats i dissenyats amb amplificadors operacionals. En aquest cas, l'amplificador operacional es pot combinar constructivament amb l'RTD en diverses combinacions i obtenir diferents circuits. L'objectiu de tots ells és compensar les interferències i linealitzar-ne la resposta.

Vegem-ne tot seguit uns exemples: un amplificador inversor (figura 9), un amplificador diferencial (figura 10) o un inversor amb RTD en el bucle de realimentació (figura 11).

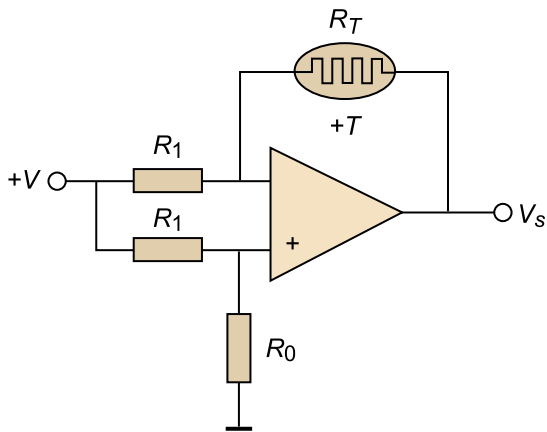
Figura 9. Amplificador inversor amb RTD



En la figura 9 es mostra un amplificador inversor amb RTD, en què recordem que $R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T)$. La tensió de sortida V_s té el valor:

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha\Delta T) \quad (9)$$

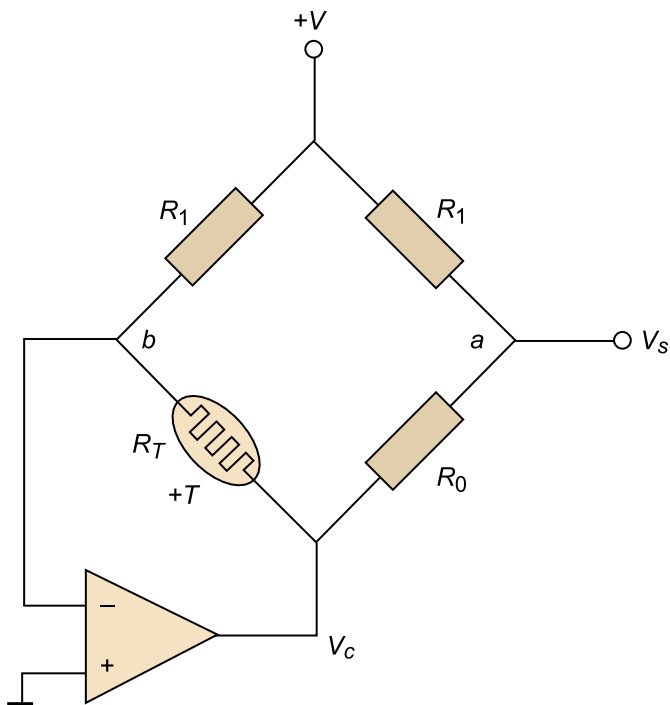
Figura 10. Amplificador diferencial amb RTD



En la figura 10 es presenta un amplificador diferencial amb RTD [$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T)$] en què la tensió de sortida V_s té el valor:

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha\Delta T \quad (10)$$

Figura 11. Amplificador inversor amb RTD en el bucle de realimentació



Finalment, en la figura 11 es mostra un inversor amb RTD [$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$] en el bucle de realimentació, en què la tensió V_c i la tensió de sortida V_s tenen els valors segons les equacions (11) i (12), respectivament.

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha \Delta T \quad (11)$$

$$V_c = -\frac{VR_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad (12)$$

1.2. El termoparell

El termoparell és un sensor de temperatura constituït per dos metalls diferents i que té com a característica principal que produeix una tensió proporcional a la diferència de temperatures entre els punts d'unió d'ambdós metalls.

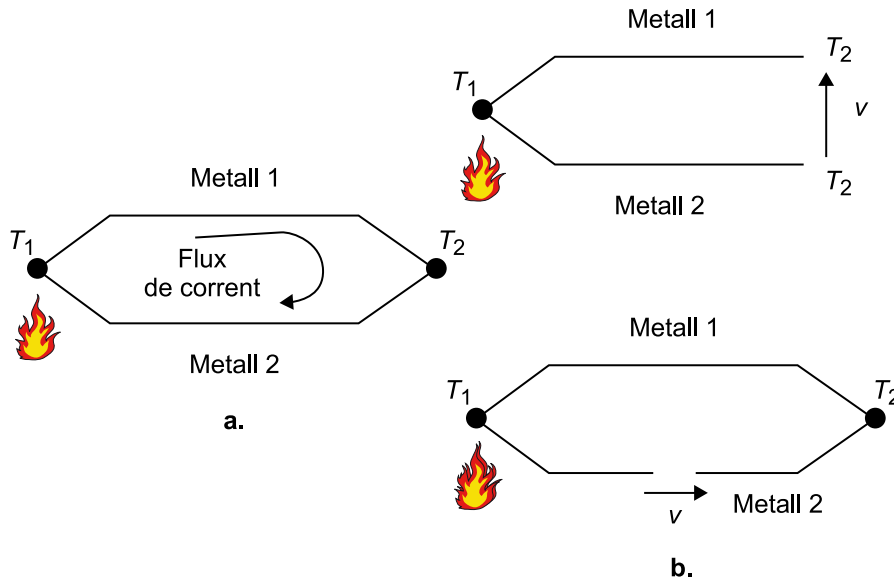
En el principi de funcionament del termoparell hi ha implicats tres fenòmens:

- L'efecte Seebeck.
- L'efecte Peltier.
- L'efecte Thomson.

1) El primer va ser descobert per Thomas Johan Seebeck el 1821. Seebeck va observar que si tenia un circuit tancat format per dos metalls diferents (termoparell) i cadascuna de les unions es trobava a una temperatura diferent, T_1 i

T_2 , es generava una força electromotriu que implicava una circulació de corrent que es mantenia mentre les temperatures de les unions fossin diferents (figura 12).

Figura 12. Funcionament esquemàtic de l'efecte Seebeck



a. En escalfar una de les dues unions del termoparell, la de temperatura T_1 , tindrem una diferència de temperatura respecte de la unió amb temperatura T_2 , de manera que es produeix una circulació de corrent elèctric proporcional a aquesta diferència de temperatures. b. Si obrim el circuit del termoparell s'observa una diferència de tensió entre ambdós terminals.

L'efecte Seebeck es resumeix en l'equació següent:

$$S_{ab} = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (13)$$

en què ΔV és la diferència de tensió entre els terminals (esquerre menys dret) i ΔT és la diferència de temperatura entre els mateixos terminals. S_{ab} és el coeficient Seebeck, també anomenat *poder termoelèctric*, i mesurat en VK^{-1} (o en μVK^{-1} donat el valor dels materials més usuals utilitzats).

2) El segon efecte va ser descobert per Jean C. A. Peltier el 1834. Peltier va descobrir un fenomen invers en aquest mateix circuit. Si es fa circular un corrent elèctric per aquest circuit tancat una de les unions s'escalfa i l'altra es refreda.

En invertir el sentit de circulació del corrent, la unió que abans s'escalfava ara es refreda i a la inversa. Això comporta una absorció de calor en una de les unions i una dissipació de calor en l'altra.

L'efecte Peltier es resumeix en l'equació següent, en què Π_{ab} és l'anomenat *coeficient Peltier*:

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad (14)$$

en què I és el corrent elèctric que circula pel circuit i Q és la quantitat de calor absorbida en la unió.

3) El tercer efecte va ser descobert per William Thomson Kelvin el 1854. Thomson va observar que quan feia circular un corrent constant per un conductor, en el qual un dels dos extrems es mantenia a diferent temperatura que l'altre, es produïa una transferència de calor proporcional, en gran manera, al producte del corrent pel gradient de temperatura. En invertir el sentit de circulació del corrent també s'inverteix el sentit de la transferència de calor. Fixem-nos que aquest efecte és diferent de l'efecte Joule, que no admet aquesta inversió.

A diferència dels dos efectes anteriors, el coeficient Thomson es pot definir directament per a un únic material mitjançant l'equació:

$$\frac{dQ}{dx} = I \cdot \frac{dT}{dx} \zeta \quad (15)$$

en què $dQ(x)/dx$ és el gradient de flux tèrmic, $dT(x)/dx$ és el gradient de temperatura, x és la coordenada espacial i ζ és el coeficient Thomson del material.

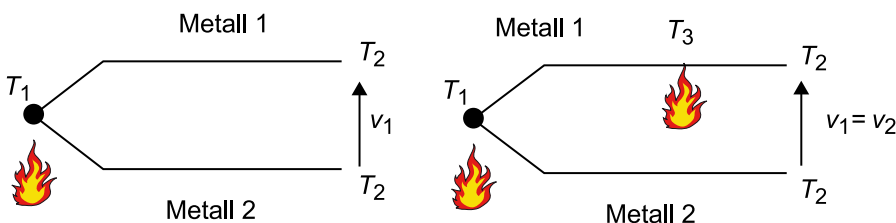
De l'estudi experimental dels termoparells es van deduir tres lleis, anomenades *lleis termoelèctriques*.

Aquestes tres lleis són:

- Llei dels circuits homogenis.
- Llei dels metalls intermedis.
- Llei de les temperatures intermèdies.

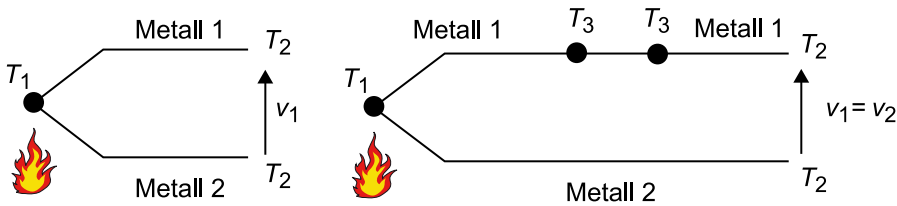
a) La **llei dels circuits homogenis** formula que la tensió generada per un termoparell, en què les dues unions del qual es troben a temperatures T_1 i T_2 , no depèn de la temperatura a la qual es trobin els punts intermedis (figura 13).

Figura 13. Llei dels circuits homogenis



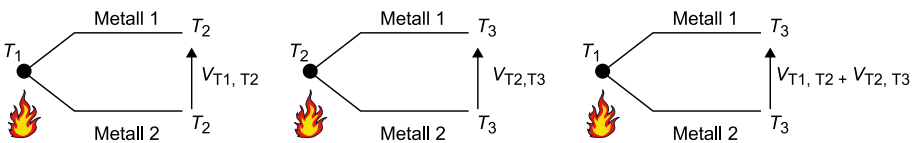
b) La **llei dels metalls intermedis** postula que si introduïm un tercer metall en sèrie a un dels dos que ja conformen el termoparell, la tensió generada pel termoparell no varia sempre que els extrems del metall inserit estiguin a la mateixa temperatura (figura 14).

Figura 14. Llei dels metalls intermedis



c) La llei de les temperatures intermèdies argumenta que si V_{T_1, T_2} és la tensió generada per un termoparell, les unions del qual es troben a temperatures T_1 i T_2 , i V_{T_2, T_3} és la tensió quan són a T_2 i T_3 , aleshores la tensió V_{T_1, T_3} , quan les temperatures de les unions són T_1 i T_3 , serà igual a $V_{T_1, T_2} + V_{T_2, T_3}$ (figura 15).

Figura 15. Llei de les temperatures intermèdies



No obstant això, cal aclarir que l'efecte termoelèctric és degut a la diferència de temperatures entre dos punts d'un mateix metall i no a l'existència de dos metalls diferents. Malgrat això, la diferència de tensió no es podria mesurar si tinguéssim un sol metall.

1.2.1. Tipus de termoparells

La necessitat de disposar d'un termoparell estable i lineal al llarg del temps i amb un màxim de sensibilitat condiona els tipus de metalls per utilitzar.

Podem dividir els termoparells més importants en dos grups:

- Termoparells de metalls base, atès que estan fets de metalls comuns com l'alumini, el níquel, el coure, etc.
- Termoparells de metalls nobles, elaborats amb platí i rodi.

En la taula 3 es presenten els principals tipus de termoparells i les seves característiques principals.

Taula 3. Tipus de termoparells i característiques

| Tipus | Composició (terminal positiu - negatiu) | Camp de mesura | Sensibilitat (a 25 °C) |
|-------|---|-----------------|-----------------------------------|
| J | Fe - constantà | 0 a 760 °C | 51,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| K | Chromel - alumel | -200 a 1.250 °C | 40,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| N | Nicrosil - nisol | 0 a 1.260 °C | 26,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| T | Cu - constantà | -200 a 350 °C | 41,0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| R | 13% Pt - 87% Rh - Pt | 0 a 1.450 °C | 6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |

| Tipus | Composició (terminal positiu - negatiu) | Camp de mesura | Sensibilitat (a 25 °C) |
|-------|---|----------------|------------------------|
| S | 10% Pt - 90% Rh - Pt | 0 a 1.450 °C | 6 µV/°C |
| B | 30% Pt - 70% Rh - 6% - Pt 94% Rh | 800 a 1.800 °C | 9 µV/°C (a 1.000 °C) |

1) **Tipus J:** ferro - constantà (55% Cu i 45% Ni). Indicats per a atmosferes inertes. Serveix per a mesurar temperatures superiors a la del tipus T. No es recomana usar-los en ambients en què es tingui oxigen lliure, atès que en reduïx ràpidament la vida útil. Té un cost molt baix i això permet que la seva utilització sigui generalitzada. El seu principal inconvenient és que el ferro es comença a oxidar ràpidament a temperatures superiors a 550 °C.

Atmosfera inerta (neutra)

Atmosfera que conté gasos inerts, que no reaccionen amb altres substàncies.

2) **Tipus K:** chromel (90% Ni i 10% Cr) - alumel (95% Al i 5% Ni). Aquest termoparell pot mesurar temperatures de fins a 1.250 °C. A diferència de l'anterior, de tipus J, sensible a l'oxidació, el níquel fa que hi sigui més resistent. Són utilitzats amb molta freqüència en els forns de tractaments tèrmics. El seu cost és considerable, la qual cosa en limita la utilització.

Atmosfera oxidant

Atmosfera que conté predominantment molècules d'oxigen, fet que provoca que es produïxi l'efecte d'oxidació.

3) **Tipus N:** nicrosil (84,4% Ni, 14,2% Cr i 1,4% Si) - nisol (95,6% Ni, 4,4% Si i 1,0% Mg). Utilitzat per a altes temperatures gràcies a la seva estabilitat i a la seva resistència a l'oxidació a aquestes temperatures.

4) **Tipus T:** coure i constantà. Adequat per a atmosferes inertes i oxidants. Té un cost relativament baix i s'utilitza per a mesurar temperatures per sota de 0 °C. Com a límit superior es poden considerar els 350 °C, ja que el coure es rovella violentament a partir dels 400 °C.

5) **Tipus R, S:** platí i rodi. Els dos tenen característiques similars. Els de tipus R són molt resistents a l'oxidació però no se'n aconsella l'aplicació en atmosferes reductores per la seva fàcil contaminació amb l'hidrogen i nitrogen que en modificarà la resposta. Els de tipus S no es poden utilitzar a temperatures elevades perquè els metalls que el constitueixen no són d'alta puresa, de manera que es produeixen alteracions en la lectura a partir dels 1.000 °C.

Atmosfera reductora

Atmosfera amb manca d'oxigen. Qualsevol procés que passi en aquestes condicions implica que alguns components poden perdre oxigen mentre que d'altres de més afinitat l'incorporen.

6) **Tipus B:** platí i rodi. Similar als de tipus R i S, tot i que el límit de temperatura que pot mesurar és superior.

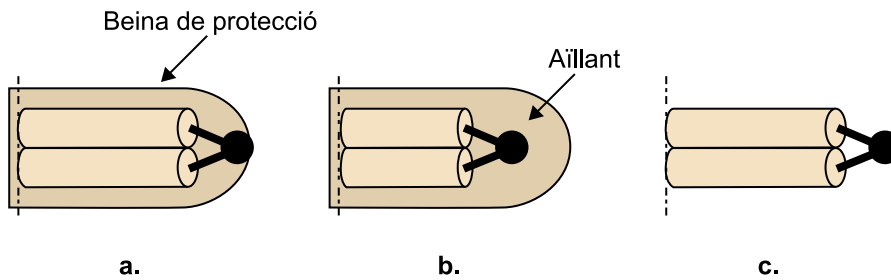
1.2.2. Tipus d'unió dels metalls que conformen els termoparells

La unió entre els dos metalls que conformen el termoparell, denominada *unió calenta*, es pot fer mitjançant una soldadura, un parell de cables trenats o una fusió.

No obstant això, en funció de l'encapsulatge, tal com es presenta en la figura 16 poden ser de tres tipus:

- Unió a massa, en què la unió fa contacte amb la càpsula.
- Unió aïllada, en què la unió està separada de la càpsula mitjançant un aïllant elèctric de conductivitat tèrmica elevada.
- Unió nua, en què la unió no està encapsulada.

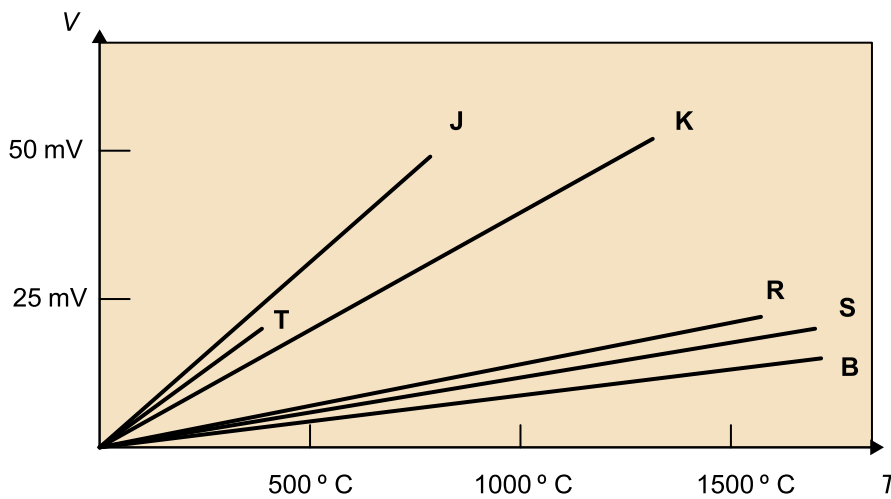
Figura 16. Tipus d'unió calenta, en funció del seu encapsulat



a. Unió a massa. b. Unió aïllada. c. Unió nua

En la figura 17 veiem una gràfica de resum amb les **corbes de calibratge** dels diferents termoparells. Podem observar que són força lineals, especialment les corresponents als metalls base, i amb un error bastant petit depenent principalment del camp de mesura.

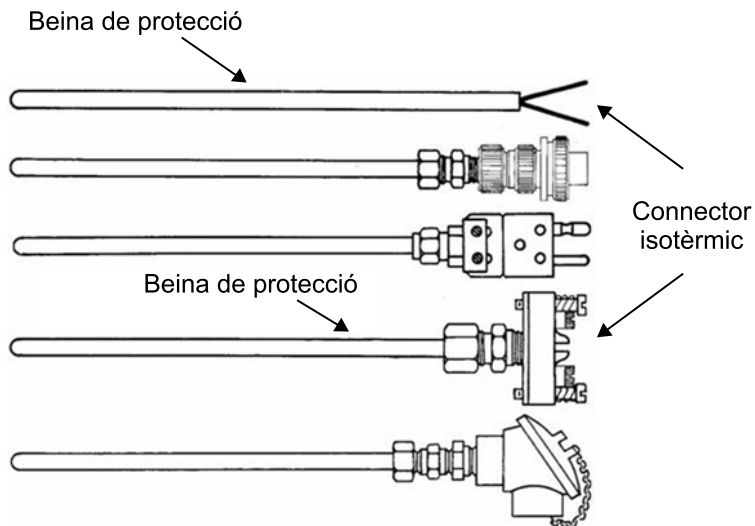
Figura 17. Corbes de calibratge



La gràfica de la figura 17 relaciona la tensió termoelèctrica en els diferents termoparells en funció de la temperatura d'una unió quan l'altra es manté a 0 °C.

Finalment, en la figura 18, es mostren diferents **termoparells comercials**.

Figura 18. Exemples de termoparells comercials



1.2.3. Condicionament del senyal per als termoparells

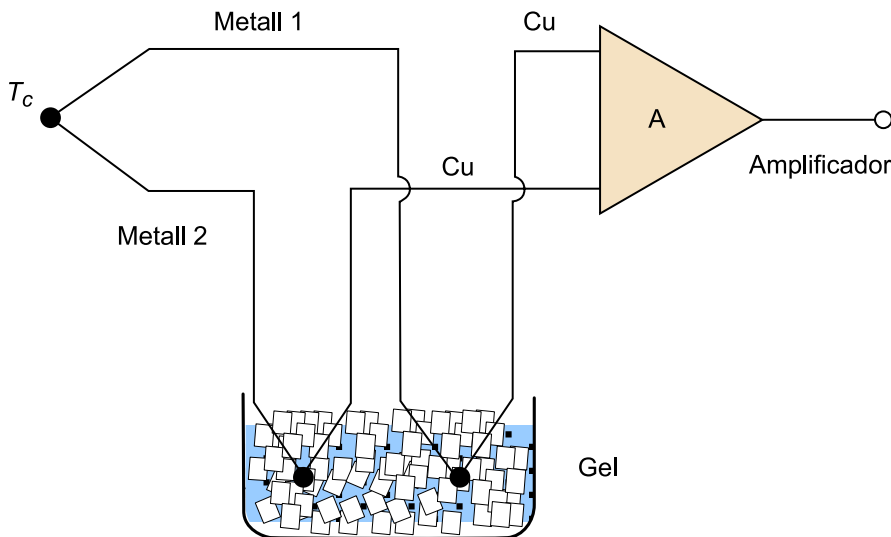
Com hem vist, el termoparell és un dispositiu que respon a les característiques dels transductors, és a dir, transforma fenòmens físics (en el nostre cas a la diferència de temperatures entre dues unions) en senyals elèctrics, com el voltatge i la resistència elèctrica.

El termoparell resulta econòmic, resistent i pot operar en un marge ampli de temperatures. No obstant això, el petit valor de tensió que proporciona, de l'ordre de microvolts per grau centígrad, requereix un condicionament del senyal que ha de tenir presents dos aspectes:

- 1) Per determinar la temperatura objecte del mesurament caldrà conèixer també la temperatura de l'altra unió.
- 2) El circuit condicionador del senyal consistirà, bàsicament, en un circuit amplificador.

Una de les alternatives per a condicionar el senyal d'un termoparell és fer-ho amb el que es coneix com a *compensació mitjançant unions de referència*. Amb aquest mètode, es fixa un valor conegut per una de les dues unions, tradicionalment a 0 °C i per aconseguir-ho s'introdueixen les unions de referència en un bany d'aigua i gel per garantir aquesta temperatura (figura 19).

Figura 19. Compensació mitjançant unions de referència



En què T_c és la temperatura de la unió calenta.

L'error que podem tenir amb aquest tipus de muntatge és molt petit, d'uns $0,001\text{ }^\circ\text{C}$, per això aquesta és una solució típicament de laboratori i utilitzada per a fer calibratges.

Hi ha altres alternatives de condicionament del senyal amb muntatges de programari i maquinari específics.

1.3. El termistor (NTC)

El nom de *termistor* té l'origen en les paraules angleses *thermal* i *resistor*, i, com es pot deduir d'ambdues paraules, ja se'ns avança la idea d'una resistència sensible a la temperatura.

Els termistors són sensors de temperatura de tipus resistiu i es divideixen en dos grups:

- NTC³.
- PTC⁴.

⁽³⁾De l'anglès, *negative temperature coefficient*.

⁽⁴⁾De l'anglès, *positive temperature coefficient*.

Els NTC tenen un coeficient de temperatura negatiu, és a dir, el valor òhmic de la seva resistència disminueix en augmentar la temperatura.

Pel contrari, els PTC tenen un coeficient de temperatura positiu i la seva resistència augmenta en augmentar també la temperatura.

Els PTC s'utilitzen fonamentalment com a detectors de nivell de líquids, generadors de retards en senyals elèctrics, protectors de sobrecorrents elèctrics, arrencament de motors, etc.

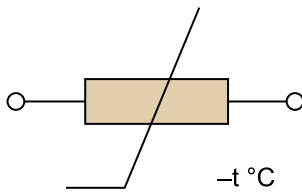
Mesurar la temperatura és l'aplicació més comuna dels NTC. Per aquest motiu, en aquest subapartat ens centrarem en aquests.

Els NTC estan constituïts per una barreja d'òxids metàl·lics utilitzant combinacions com:

- Ni-Mn-O.
- Ni-Cu-Mn-O.
- Ti-Fe-O.

Pel que fa al símbol del sensor NTC, es mostra en la figura 20, en què el signe menys indica que la sensibilitat és negativa i la línia que talla la resistència indica que aquesta canvia amb la temperatura.

Figura 20. Símbol de l'NTC



Hi ha dos tipus de termistors en funció de la manera com s'uneixin els cables al cos de l'NTC:

- **Termistors tipus gota o bead.**
- **Termistors metal·litzats.**

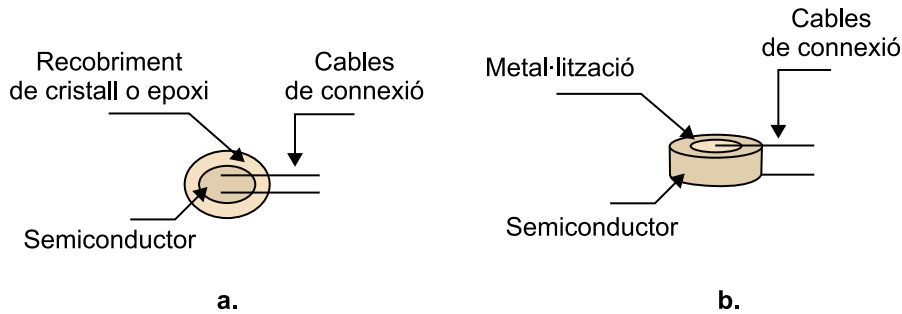
a) En els NTC tipus gota, els cables se sinteritzen juntament amb el cos del termistor, amb la qual cosa en formen part (figura 21).

b) En els NTC metal·litzats, generalment en forma de disc, els cables es connecten directament a la superfície del termistor prèviament metal·litzat (figura 21).

Sinterització

Recordem que la sinterització és el procés que permet d'unir, per difusió en estat sòlid, partícules petites d'un material.

Figura 21. Tipus d'NTC



a. Esquema de l'NTC tipus gota. b. Esquema de l'NTC metal·litzat

Els NTC tipus gota són més estables i suporten temperatures més altes (fins a 550 °C) que els metal·litzats (fins a 130 °C). Les toleràncies pels termistors NTC convencionals acostumen a ser elevades, del 20% per les de tipus gota i del 5% per les de tipus metal·litzat. Pel contrari, les metal·litzades són més econòmiques que les tipus *bead*, que tenen un cost més elevat.

En general, els NTC són sensors molt sensibles i robustos, fiables i econòmics. Presenten, com a gran inconvenient, lentitud de resposta, amplis marges de tolerància en les seves especificacions, un camp de mesura limitat i un enveïlliment amb el pas del temps.

1.3.1. Model matemàtic: exponencial

L'equació més senzilla que reproduïx el comportament d'un termistor és la següent:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (16)$$

en què B és l'índex de sensibilitat tèrmica que pot variar entre 2.000 i 6.000 K.

R_0 és la resistència del termistor a la temperatura T_0 .

T_0 és la temperatura de referència (298 K, o 25 °C).

T és la temperatura absoluta (en K).

1.3.2. Relació temperatura-resistència en els NTC

La sensibilitat és una característica molt important en qualsevol sensor. L'alta sensibilitat és l'avantatge més gran que tenen els termistors respecte a la resta de sensors utilitzats per a mesurar temperatura. A temperatures baixes la sensibilitat d'un sensor NTC és molt alta i va disminuint a mesura que la temperatura augmenta.

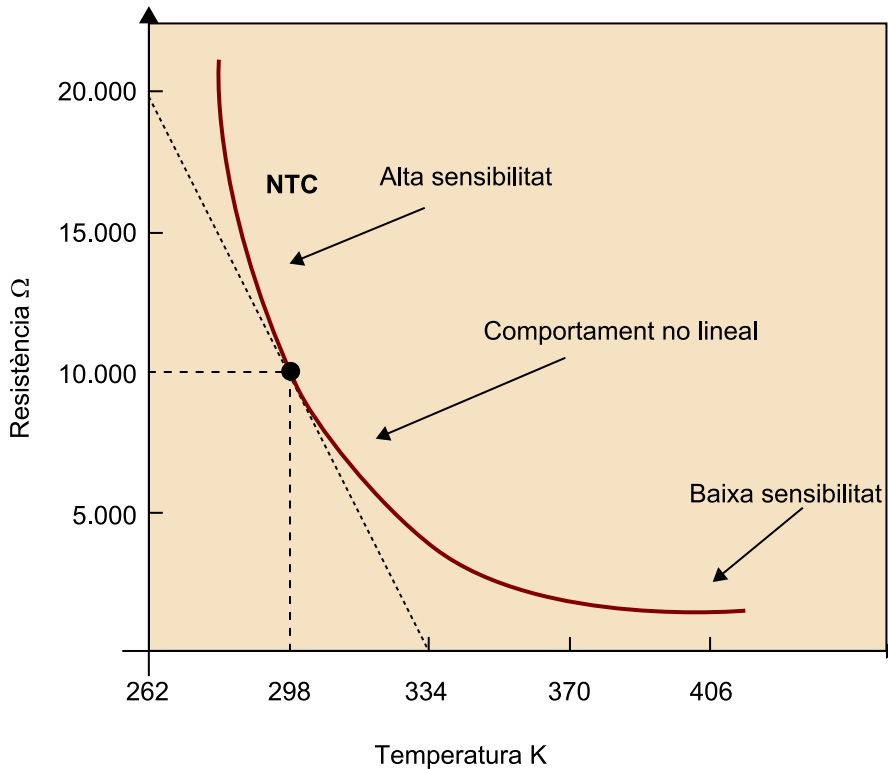
D'altra banda, la relació entre temperatura i resistència no és lineal, sobretot quan considerem marges de temperatura grans. Aquesta relació entre resistència i temperatura (R - T) es presenta en la figura 22. A l'hora de linealitzar aquesta relació, s'utilitza sovint una resistència R_p connectada en paral·lel a l'NTC de manera que el punt d'inflexió de la nova corba linealitzada R - T sigui

en el centre (allà on el comportament s'assimila més al lineal) del marge de temperatures que es vol mesurar. De manera aproximada, aquesta resistència R_p es calcula com:

$$R_p = \frac{B}{B + \frac{2T}{T_0}} R_T \quad (17)$$

amb T la temperatura mitjana del marge de temperatures que cal mesurar.

Figura 22. Relació entre resistència i temperatura en els NTC



Els NTC mesuren temperatures absolutes amb un valor que arriba fins als 500 °C com a valor màxim (tot i que amb els materials nous podria arribar als 1.000 °C) i fins a -70 °C com a valor mínim. Pel que fa als valors nominals de resistència, aquests varien entre els 10 Ω i 20 MΩ.

Tal com s'ha comentat anteriorment, la velocitat de resposta no és una de les bones característiques d'aquest tipus de sensors, tot i que, com més petit sigui l'NTC, més alta n'és la velocitat de resposta gràcies a la baixa inèrcia tèrmica que poden presentar.

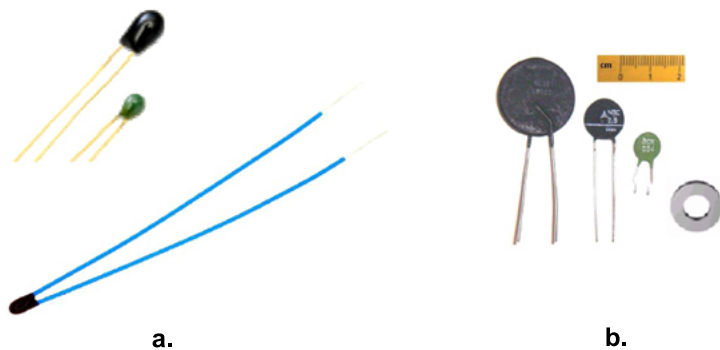
1.3.3. Alguns models comercials de termistors NTC

En la figura 23 veiem alguns models comercials habituals que es poden trobar fàcilment en el mercat de termistors NTC.

Inèrcia tèrmica

Propietat que indica la quantitat de calor que pot conservar un cos i la velocitat amb què la cedeix o absorbeix de l'entorn.

Figura 23. Exemples de models comercials d'NTC



a. NTC tipus gota amb coberta de cristall. b. NTC tipus disc i volandera

Activitat

Busqueu informació per Internet sobre diferents tipus d'NTC. Compareu-ne les característiques principals (marge de valors de resistència, marge de temperatura de treball, sensibilitat tèrmica). Trobareu *datasheets* d'NTC a <http://category.alldatasheet.com>.

1.4. Sensors de silici

Una de les invencions més importants del segle XX va ser, sens dubte, el transistor. Aquest dispositiu va donar el tret de sortida per al desenvolupament posterior de processos de fabricació de dispositius semiconductors i circuits integrats (tecnologia CMOS, transistors d'unió bipolar, etc.). Per a la construcció d'aquests elements electrònics, els materials semiconductors més estudiats i utilitzats han estat el silici (Si) i el germani (Ge).

Quan les capacitats electròniques del silici estan fora de les possibilitats exigides per a la construcció de determinades aplicacions, els dissenyadors opten per utilitzar semiconductors compostos. No obstant això, la gran majoria d'aquests desenvolupaments estan basats en el silici.

Els televisors moderns, la telefonia cel·lular, els dispositius de correcció auditiva o els sistemes de monitoratge neuronal, són només alguns dels exemples de sistemes que no solament inclouen circuits integrats sinó també sensors. Els dissenyadors actuals han aprofitat les propietats sensores del silici, atès que la fabricació d'aquest tipus de components electrònics no la penalitza amb un cost elevat.

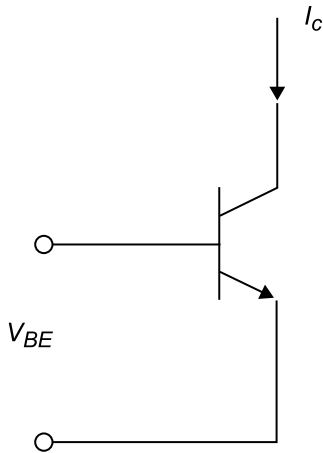
Parlant de les qualitats dels sensors de silici per a mesurar la temperatura, ja hem indicat que el cost de fabricació del sensor és baix i la seva inclusió en un component electrònic també resulta econòmica.

L'abast de mesura dels sensors de silici gira entorn dels -40 °C a $+125\text{ °C}$, les seves toleràncies són del $\pm 1\%$ i $\pm 3\text{ °C}$ i presenta una sensibilitat de 10 mV/°C .

Els sensors de silici estan basats en la relació entre la tensió base-emissor (V_{BE}) i el corrent de col·lector (I_c) d'un transistor bipolar de junció, BJT⁵. Vegem-ho gràficament en la figura 24.

⁽⁵⁾De l'anglès, *bipolar junction transistor*.

Figura 24. Transistor BJT



Amb l'expressió matemàtica mostrada en l'equació (17) que identifica aquesta relació:

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_c}{I_s} \quad (18)$$

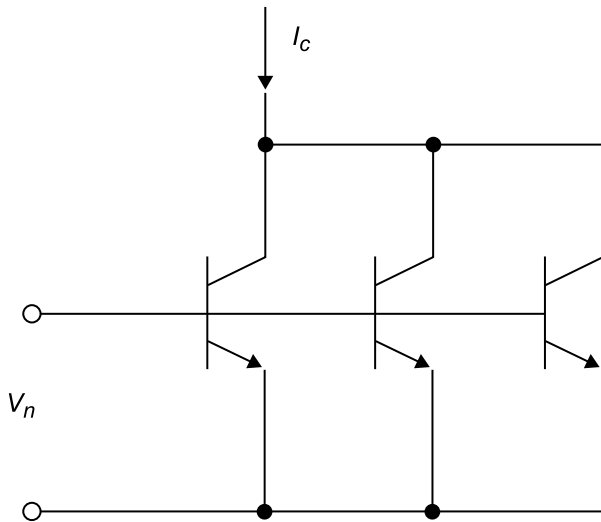
en què k és la constant de Boltzmann;

T és la temperatura absoluta en graus Kelvin;

q és la càrrega d'un electró: $-1,6 \times 10^{-19}$ C;

I_s és el corrent invers de saturació que depèn de la geometria i de la temperatura del transistor.

Si es disposen n transistors idèntics a l'anterior, segons es mostra en la figura 25.

Figura 25. Unió de n transistors

Suposem el corrent de col·lector I_c repartit d'igual manera entre tots els transistors, i la relació de la tensió base-emissor, V_n , de tots els transistors és la que veiem expressada en l'equació (19).

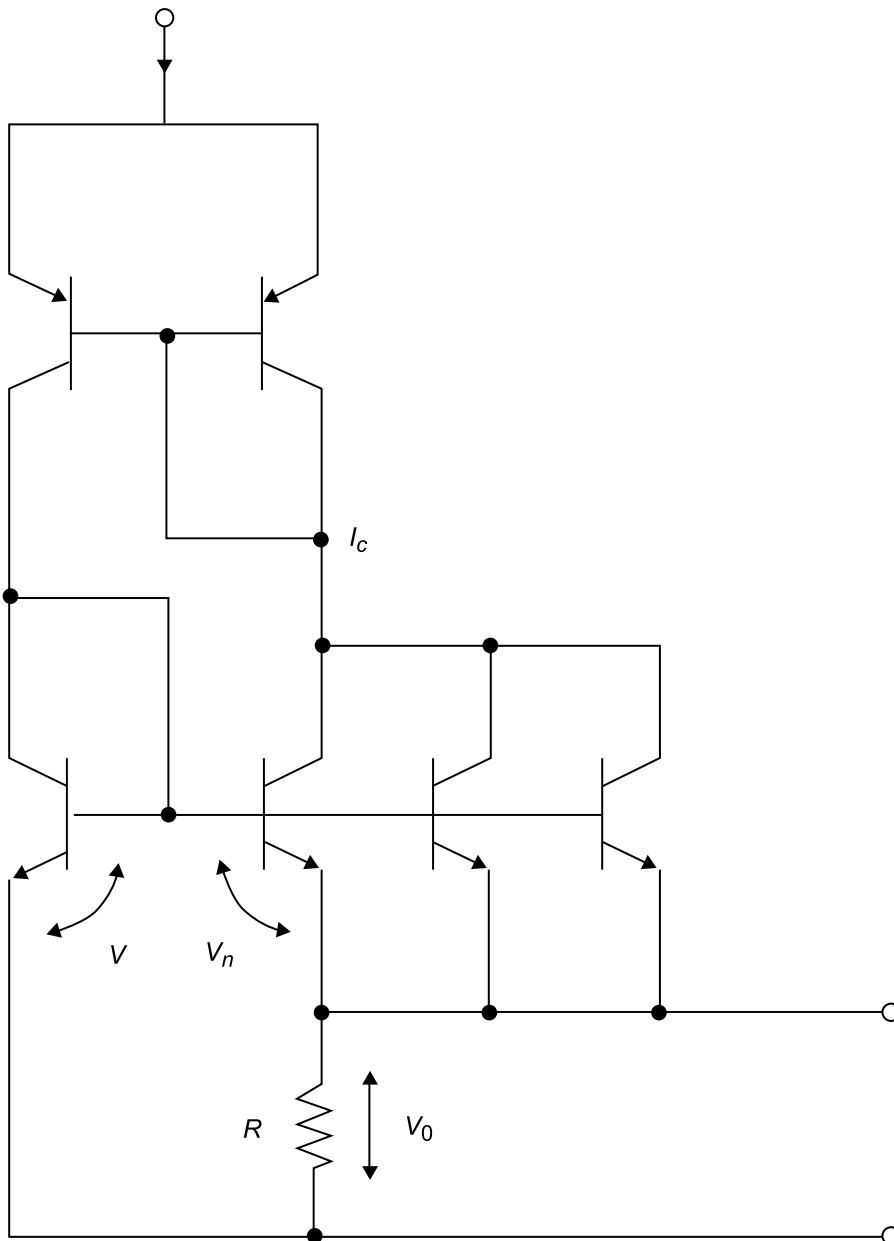
$$V_n = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_c}{nI_s} \quad (19)$$

No obstant això, aquest tipus de circuits presenten el problema que no poden ser utilitzats de manera aïllada a causa de la forta dependència del corrent invers de saturació, I_s , respecte a la temperatura. La manera de resoldre-ho és aconseguir que la temperatura del col·lector, I_c , sigui igual en els n transistors. D'aquesta manera, la diferència de tensió entre les tensions de base i emissor, V_{BE} , acaba sent proporcional a la temperatura absoluta i deixa de dependre del corrent invers de saturació, I_s .

Veiem a continuació un circuit pràctic de mesura de temperatura format per transistors PNP configurats en mirall i amb $N + 1$ transistors NPN (figura 26). En aquest nou circuit si el corrent de col·lector, I_c , del transistor bipolar de junció és igual que en els N transistors BJT, aleshores la diferència de potencial entre V i V_N , és a dir, V_0 , serà proporcional només a la temperatura absoluta. A més, la resistència del conjunt resulta estable a la temperatura.

Aquest circuit es completaria amb la circuiteria necessària fent treballar els transistors bipolars de junció en commutació, és a dir, treballant com si fossin interruptors i posant-se en ON quan s'aplica una tensió i en OFF en cas contrari.

Figura 26. Sensor de temperatura format per transistors PNP configurats en mirall i amb $N + 1$ transistors NPN



El circuit bàsic és el de la figura 26, en què la diferència de potencial entre V i V_N , és a dir, V_0 , és expressada per l'equació (20).

$$V_0 = V - V_N = \frac{kT}{q} \cdot \ln N \quad (20)$$

Per acabar, en la figura 27 es mostren uns exemples comercials de sensors de temperatura de silici en un circuit integrat.

Figura 27. Exemples comercials de sensors de temperatura de silici integrats



1.5. Comparativa i quadre resum dels diferents sensors de temperatura

Com hem pogut veure fins al moment, tot i tenir al nostre abast una bona varietat de sensors, l'elecció d'un tipus concret no és una tasca evident.

En la taula 4 veiem una comparativa entre els diferents sensors de temperatura a tall de resum: RTD, termoparells, NTC i sensors de silici.

Taula 4. Comparativa de diferents tipus de sensors de temperatura

| Característiques | Sensor | | | | |
|----------------------------------|---|---|-----------------|---|--------------|
| | RTD de pel·lícula (platí) | RTD bobinada (platí) | Termoparell | Termistor NTC | Silici |
| Cost del sensor | De moderat a baix | Moderat | Baix | De baix a moderat | Baix |
| Cost del sistema | Moderat | Moderat | Alt | De baix a moderat | Baix |
| Abast de mesurament | -200 a 750 °C (560 °C màx., típicament) | -200 a 850 °C (600 °C màx., típicament) | -270 a 1.800 °C | -100 a 500 °C (125 °C màx., típicament) | -40 a 125 °C |
| Tolerància | ±0,1%, ±0,3 ° | ±0,06%, ±0,2 °C | ±0,5%, ±2 °C | ±10%, ±0,2 ° | ±1%, ±3 °C |
| Estabilitat | Excel·lent | Excel·lent | Pobra | Moderada | Moderada |
| Sensibilitat | 0,39 %/°C | 0,39 %/°C | 40 µV/°C | -4 %/°C | 10 mV/°C |
| Sensibilitat relativa | Moderada | Moderada | Baixa | Molt alta | Moderada |
| Linealitat | Excel·lent | Excel·lent | Moderada | No és lineal | Moderada |
| Pendent de la recta | Positiu | Positiu | Positiu | Negatiu | Positiu |
| Susceptibilitat al soroll | Baixa | Baixa | Alta | Baixa | Baixa |

1.6. Sensors de radiació

Els sensors de radiació efectuen els mesuraments a partir de l'energia que emeten tots els materials, en funció de la temperatura, en la regió de l'espectre electromagnètic infraroig. Per tant, treballen sota el principi que la temperatura d'un material determina la longitud d'ona de la radiació emesa.

Els sensors de radiació són formats pel mateix sensor, un sistema òptic que l'ajuda a enfocar l'objecte que cal mesurar i un sistema electrònic de condicionament del senyal i visualització. En molts casos, s'hi inclouen uns díodes làser o LED que il·luminen la zona que cal mesurar i que per tant ajuden l'usuari a reconèixer fàcilment què s'està mesurant.

En funció de l'emissivitat dels materials, és a dir, la capacitat d'emetre radiació, es resumeixen en tres tipus:

- **Cos negre:** és un objecte teòric o ideal que absorbeix tota la llum i tota l'energia radiant que hi incideix. La seva emissivitat és igual a 1. En realitat, es tracta d'un concepte totalment teòric atès que tots els materials presenten una emissivitat inferior a 1.
- **Cos gris:** aquell material que presenta una emissivitat constant però inferior a 1. Molts materials presenten emissivitats amb valors compresos entre 0,85 i 0,95, tot i que el gel, per exemple, presenta un valor de 0,97, l'aigua de 0,98, un paper negre o un paper blanc de 0,9 i, per contra, l'or polit de 0,02 i el coure polit de 0,01.
- **Cos no gris:** quan el material presenta una emissivitat variable en funció de la seva longitud d'ona. N'és un bon exemple el vidre en funció de la seva opacitat i el gruix.

Les emissivitats de quasi qualsevol material es mesuren a 0 °C, però no difereixen significativament a temperatura ambient.

No obstant això, cal considerar que la longitud d'ona a la qual té lloc el pic d'emissió de radiació d'un material depèn de la temperatura, i són inversament proporcional l'una de l'altra. Per aquest motiu, la resposta espectral és un dels paràmetres més importants per a seleccionar el tipus de sensor de radiació.

A diferència d'altres tipus de sensors que hem vist, com les RTD o els termoparells, que requereixen estar en contacte amb el medi la temperatura del qual volen mesurar, els sensors de radiació no cal que ho estiguin, i arriben a mesurar temperatures de fins a 3.000 °C. Aquest fet fa que s'utilitzin quan no poden ser emprats els altres tipus de sensors.

En general, s'utilitzen quan no es poden utilitzar les RTD, els termoparells o altres tipus de sensors seguint els criteris següents per a la seva utilització:

- Mesuraments sense contacte (per exemple, amb aplicacions mèdiques o alimentàries).
- Per a altes temperatures, fora de l'abast de les especificacions d'altres sensors.
- Quan es necessita un temps de resposta molt petit, per exemple, de menys d'un segon.
- Quan l'objecte es troba en un medi amb moltes interferències, per exemple, rodejat d'un camp electromagnètic fort, com podria ser un forn d'inducció.

Tot i així, els sensors de radiació presenten alguns inconvenients que cal considerar:

- La presència de vapor d'aigua, pols o gasos situats entre l'objecte que cal mesurar i el sensor de radiació poden representar desviacions importants en el valor final del mesurament.
- Són molt més costosos que altres termòmetres basats en sensors com els termoparells o les RTD i també són més imprecisos.
- El valor de l'emissivitat de cada material és una mesura obtinguda de manera perpendicular a l'objecte (formant un angle recte de 90°). Per a altres angles cal fer una correcció experimental si es vol mantenir l'exactitud.

Alguns dels sensors més utilitzats per a mesurar la radiació són el següents:

a) Sensors piroelèctrics: també utilitzats com a detectors de moviment. Presenten una sensibilitat relativament alta i permeten un camp de mesura gran gràcies a la seva resposta espectral àmplia. L'efecte piroelèctric és anàleg al piezoelèctric però, en lloc d'aparèixer càrregues elèctriques quan es deforma un material, aquí es tracta de l'aparició de càrregues superficials en una direcció determina quan el material experimenta un canvi de temperatura. Una de les principals aplicacions és mesurar la radiació tèrmica a temperatura ambient, per exemple, la pèrdua de calor als edificis.

b) Fotoresistències (LDR⁶): són components electrònics que tenen la característica de disminuir la seva resistència en funció de la intensitat de la llum incident. També són conegudes com a *cèl·lules fotoelèctriques*. Presenten una resposta espectral àmplia i centrada en longituds d'ona més llargues, per la qual cosa resulten adequades per a mesurar temperatures baixes. Algunes de les més utilitzades són les de PbS (sulfur de plom) i les de InSb (antimoni d'indi).

⁽⁶⁾De l'anglès, *light dependent resistor*.

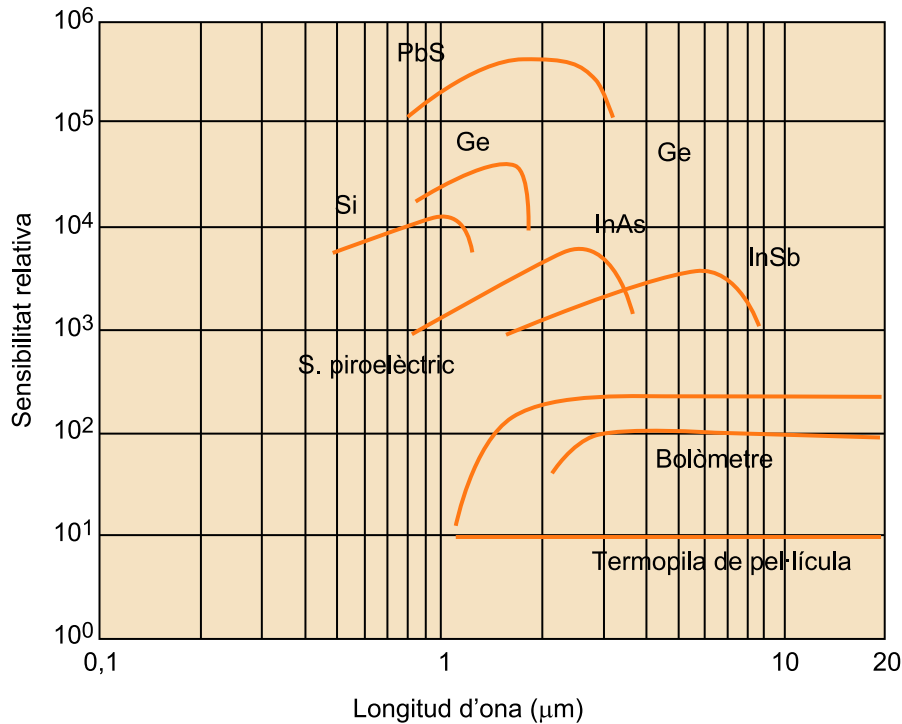
c) **Fotodíodes:** són semiconductors construïts amb una junció pn, sensibles a la incidència de llum visible o infraroja. En absència de llum exterior generen una tensió molt petita. El corrent generat en absència de llum rep el nom de *corrent de foscor*. Perquè el seu funcionament sigui correcte es polaritza inversament. El material emprat per a la construcció d'un fotodíode és un factor molt important per a definir-ne les propietats. Si s'elabora amb silici (Si), el fotodíode serà sensible a la llum visible (longitud d'ona de fins 1 μm). Si la seva elaboració és amb germani (Ge), serà sensible a la llum infraroja (longitud d'ona de fins 1,8 μm , aproximadament). Els de InAs (arseniat d'indi) permeten mesurar temperatures més baixes. En qualsevol cas, seran força adequats per a mesurar temperatures elevades, generalment més grans que 600-1.000 °C.

d) **Termopiles:** les termopiles estan constituïdes per desenes de termoparells en sèrie per augmentar la sensibilitat de tot el conjunt i poder mesurar la temperatura d'un objecte. La termopila detecta la temperatura d'un objecte mitjançant l'absorció dels raigs infrarojos de radiació que s'emeten des de la superfície d'aquest objecte. La majoria de les termopiles estan equipades amb una superfície de cos negre per tal d'absorbir apropiadament aquesta radiació. La seva utilització ha crescut espectacularment en els darrers anys gràcies a l'aparició de termopiles de pel·lícula molt fina fabricades amb tècniques similars a la dels semiconductors. Gràcies a la seva resposta espectral àmplia, permeten un marge de temperatura molt gran (en funció del material pot ser d'entre -200 °C i +1.200 °C), amb un preu relativament baix, una mida reduïda i una sensibilitat acceptablement bona.

e) **Bolòmetre:** són termòmetres de resistència (RTD o NTC) configurats per mesurar radiació d'una manera similar a la de les termopiles.

Veiem en la figura 28 la resposta espectral d'aquests sensors utilitzats com a termòmetres de radiació.

Figura 28. Resposta espectral de sensors de radiació



En funció de la porció de l'espectre que s'utilitzi per a obtenir la mesura de la temperatura, els sistemes es classifiquen en:

- Piròmetres de radiació total.
- Piròmetres de radiació parcial.
- Piròmetres radiomètrics.

1) Els **piròmetres de radiació total** disposen d'un sensor, generalment un piroelèctric o una termopila, amb una resposta espectral molt àmplia, des de 300 nm fins a 2,5 μm, fet que permet un marge força gran de radiació tèrmica emesa per l'objecte. Els camps de mesura van dels 0 °C als +1.000 °C i l'exactitud és entorn de l'1% sobre el fons d'escala.

2) En els **piròmetres de radiació parcial** el mesurament s'efectua en una zona estreta, inferior a 1 μm. El motiu és que el mateix sensor utilitzat (generalment un fotodíode de silici) ja té una resposta espectral reduïda o queda limitat per filtres òptics. Tot i que la sensibilitat és més petita que en l'anterior i que pot resultar més laboriós de dissenyar i per tant resulta més costós, l'avantatge respecte als piròmetres de radiació total és la seva exactitud més gran atesa la seva adaptabilitat a l'aplicació per a la qual hagi estat dissenyat. Pot presentar exactituds del 0,25% i camps de mesura de -40 °C a + 600 °C i + 500 °C a + 2.000 °C.

3) En els **piròmetres radiomètrics** es mesura l'energia rebuda en dues bandes estretes i obtenim el valor de la temperatura a partir del quocient entre ambdós resultats. Són adequats per a mesurar la temperatura de materials no grisos. L'exactitud típica és de l'1-2% sobre el fons d'escala i alguns dels camps de mesura comercials que es poden trobar van dels + 50 °C als + 3.700 °C.

2. Sensors de distància

Tal com hem comentat en la introducció d'aquest mòdul, la mesura de la **distància** es refereix a la **posició** d'un objecte concret i acostuma a ser un cas molt habitual dins de la instrumentació industrial actual. Per aquest motiu, i atès que el concepte general de *mesurament de la distància a un objecte* és molt ampli, ens centrarem en l'àmbit de la instrumentació en el control industrial.

En general, la posició d'un objecte qualsevol es pot observar des de dos punts de vista:

- El mesurament de la posició lineal.
- El mesurament de la posició angular.

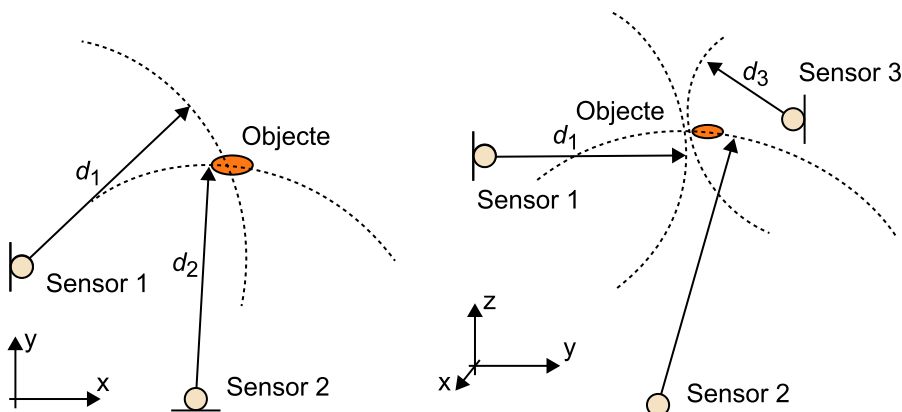
Vegem a continuació aquests dos mesuraments.

2.1. Mesurament de la posició lineal

En l'àmbit de la instrumentació industrial ens trobem amb la necessitat de resoldre el problema de mesurar la distància a un objecte des d'un punt concret. Per a fer-ho, utilitzarem un sensor en aquest punt concret que detecti l'objecte.

Si situem dos sensors, aleshores la posició serà determinada per un pla x - y . En cas que siguin tres els sensors utilitzats per a aquest mesurament, obtindrem la posició de l'objecte en un espai de tres dimensions, x - y - z , tal com podem observar en la figura 29.

Figura 29. Posició d'un objecte en un pla (esquerra) o a l'espai (dreta)



El mesurament de la distància d'un objecte a un punt es pot tractar bàsicament de dues maneres: sense contacte físic amb l'objecte, amb contacte físic amb l'objecte.

El segon tipus de mesurament acostuma a ser més habitual en l'àmbit de la instrumentació electrònica industrial, atès que un cop coneguda aquesta distància es duu a terme una acció sobre aquest objecte.

2.1.1. Mesuraments de la distància sense contacte físic

Per a mesurar la **distància sense contacte físic** a un objecte situat a unes desenes de metres, una distància mitjana, es fan servir sensors que utilitzen el mètode de l'impuls-eco i es basen en ultrasons o tècniques de triangulació mitjançant llum, normalment làser.

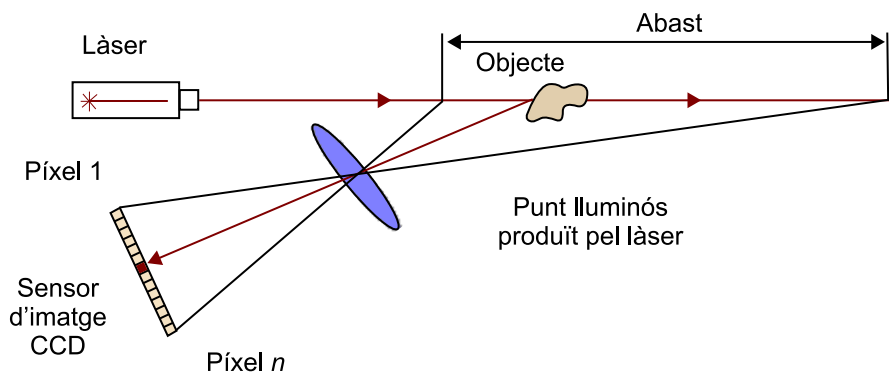
Telèmetres làser

Els **telèmetres làser** basen el seu funcionament en la projecció d'un punt sobre un objecte, la distància del qual es pretén mesurar. Aquesta projecció es detecta mitjançant un sensor d'imatge (un CCD⁷ lineal) que és capaç d'identificar la posició d'aquest punt. El CCD lineal és un dispositiu amb una línia de fotodectors que fa la translació d'una imatge real a un format, generalment binari, que pot ser guardat en dispositius d'emmagatzematge o memòria, de manera que aquesta imatge es pugui processar posteriorment.

⁽⁷⁾De l'anglès, *coupled charge device*.

Podem veure en la figura 30 un esquema explicatiu del mesurament de la distància a un objecte sense contacte, format per un telèmetre làser i un sensor d'imatge o CCD lineal:

Figura 30. Mesurament de la distància a un objecte sense contacte



Per a mesurar la distància a l'objecte, el telèmetre làser es basa en el principi de la mesura de fases de la llum per pulsacions:

- En ordenar la mesura, el diode làser emet pulsacions de llum amb unes característiques (una fase) constants.
- El reflex sobre l'objecte que cal mesurar (punt lluminós visualitzat generalment com un punt vermell) modifica la fase de la llum per pulsacions.

- La diferència de fase és proporcional a la distància entre el telèmetre làser i l'objecte. D'aquesta manera, el telèmetre calcula la distància a l'objecte.

Aquest procediment de mesurament de fases ofereix precisions mil·limètriques i l'abast de mesura acostuma a arribar fins als 600 metres.

Els telèmetres làser són molt utilitzats en el sector industrial de la construcció (fusters, serrallers, paletes, etc.), són fàcils d'usar i, com hem vist, tenen una bona precisió.

Aquests tipus de sensors, en diferents formats, són utilitzats també en altres àmbits dins d'aplicacions complexes per a la navegació de vaixells i avions o sistemes d'enfocament d'imatge de càmeres fotogràfiques i de vídeo.

També s'utilitzen per a distàncies llargues en aplicacions amb finalitats aeronàutiques o militars.

Sensors de distància inductius

Per a distàncies curtes, amb un abast d'entre 2 i 100 mm, els aparells de mesura que s'utilitzen són d'**origen inductiu** i per aquest motiu solen ser molt selectius atès que s'utilitzen per a detectar un objecte ferromagnètic ubicat sota la influència del camp magnètic generat pel dispositiu de mesura.

No obstant això, acostumen a no tenir una bona linealitat i la seva precisió és baixa, i presenten problemes condicionats per:

- Una sensibilitat alta als camps magnètics propers.
- El calibratge de l'aparell està molt condicionat a les propietats del material.
- La temperatura de l'objecte afecta el mesurament que es vulgui efectuar.

Sensors de distància capacitius

D'altra banda, tenim els sensors d'**origen capacitiu**, que tenen una estabilitat més gran i no es veuen afectats a l'hora de mesurar per la temperatura o els camps magnètics existents. El seu abast és similar a l'inductiu tot i que poden mesurar distàncies a objectes metàl·lics inferiors al mil·límetre, amb una precisió elevada i una gran estabilitat. Aquests detectors capacitius es basen en la variació de l'estímul d'un camp elèctric. Es mesura el canvi en la capacitància de la zona activa del sensor, la qual depèn de la constant dielèctrica, la massa i la mida del material que cal detectar respecte a la distància fins a la superfície sensible del detector capacitiu.

2.1.2. Mesuraments de la distància amb contacte físic

Pel que fa als mesuraments de la **distància amb contacte físic**, són molt més freqüents en l'àmbit de la instrumentació industrial i són molt útils en camps generals com:

- La robòtica.
- El control de màquines eina.
- El mesurament de l'allargament de cables de subjecció.
- Sistemes de realimentació de la posició d'un accionament.

Per a efectuar aquests mesuraments hi ha diverses possibilitats:

- Potenciòmetres lineals.
- Transformador diferencial lineal (LVDT).
- *Encoders* lineals.
- Sensors de desplaçament angular amb accionament lineal.

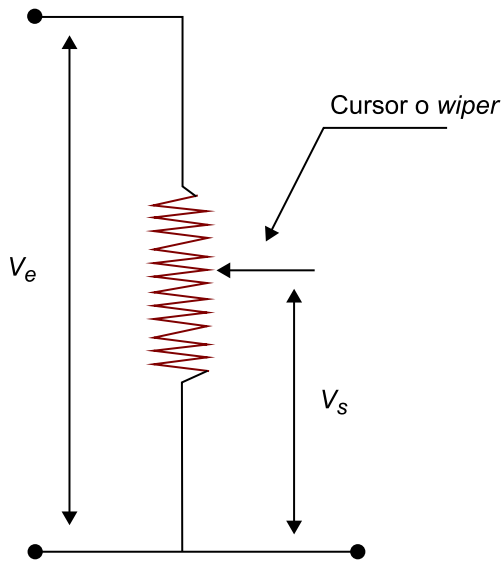
Tots aquests sensors rarament superen l'abast d'un metre de longitud en la distància de mesura. Aquest abast és condicionat pel contacte i mesura de desplaçament amb l'element que volem mesurar. El sistema de mesura disposa d'un accessori que es va desplaçant amb l'objecte i aquest desplaçament actua sobre el sensor, el qual facilita el valor de la distància final.

El potenciòmetre lineal

Els **potenciòmetres lineals** són transductors de distància i posició amb contacte i fregament. Els potenciòmetres, en general, són dispositius capaços de mesurar la posició angular i petits desplaçaments de posició lineal. Segons els tipus de posició per mesurar tindrem dos tipus diferents de dispositius, però la idea bàsica és comuna per a ambdós.

El mesurament s'obté mitjançant el lliscament d'unes escombretes sobre una resistència (normalment una pista plàstica resistiva) que, en funció del punt on es trobi, donarà un valor proporcional en resistència. A més, hi ha un contacte unit a la resistència que es desplaça a través seu, anomenat *wiper*, i que es connecta físicament a l'element el moviment i desplaçament del qual volem mesurar.

Figura 31. Potenciòmetre lineal



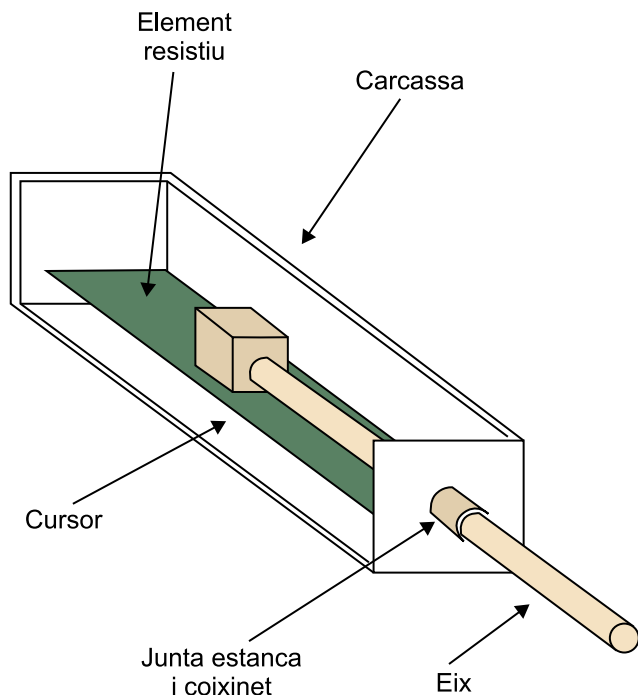
Quan aquest element es mogui, el *wiper* s'anirà movent per la resistència i la tensió de sortida en el *wiper* anirà canviant. Si mesurem aquesta tensió de sortida V_s , podrem determinar quant s'ha desplaçat el *wiper* i, per tant, quina distància s'ha desplaçat l'element que volíem controlar (figura 31). La variació és constant respecte al desplaçament del contacte mòbil.

L'aplicació més comuna d'aquest dispositiu és com a sensor de desplaçament de tipus resistiu (figura 32). Hem vist que el moviment del cursor origina un canvi en la resistència mesurada entre el terminal central i qualsevol dels dos extrems, fent de divisor resistiu.

Per a l'obtenció d'un senyal elèctric relacionat amb el desplaçament s'alimenta, en general, amb corrent continu.

En la figura 32 veiem un esquema d'un potenciòmetre per a mesurar petits desplaçaments de posició lineal.

Figura 32. Potenciòmetre lineal



El seu abast es troba entre els 25 mm i els 950 mm i la seva linealitat va del 0,2 al 0,075%.

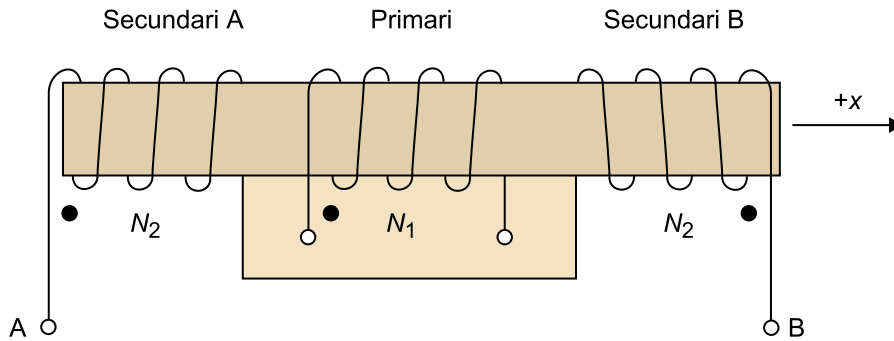
Transformador lineal variable diferencial (LVDT)

El **transformador lineal variable diferencial (LVDT⁸)** és un dels sensors electrònics basat en efectes electromagnètics més utilitzat per a mesurar desplaçaments, ja que presenta unes bones característiques de linealitat, sensibilitat, ràpida resposta i gran resolució. No obstant això, requereix un circuit de tractament relativament complex, ja que no és trivial detectar el signe del desplaçament de l'objecte i, a més, presenta l'inconvenient que no pot mesurar grans desplaçaments.

El transformador lineal variable diferencial dóna un senyal de voltatge de sortida de corrent altern que és proporcional a un desplaçament físic. Consta d'un debanat primari i dos debanats secundaris enrotllats de la mateixa manera (figura 33).

⁽⁸⁾De l'anglès, *linear variable differential transformer*.

Figura 33. Esquema d'un LVDT



En la figura 33 podem veure els tres debanats, els dels extrems són els debanats secundaris (amb N_2 espires) i el del mig és el debanat que actua com a primari (amb N_1 espires).

Si els debanats secundaris estan units tal com es veu en la figura 33 i s'introdueix un senyal sinusoidal en el primari de l'LVDT, amb un valor màxim V_1 , la tensió màxima que tindrem a la sortida del conjunt, V_{AB} , serà determinada per l'expressió matemàtica següent:

$$V_{AB} = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{d\varphi_{2a}}{d\varphi_1} - \frac{d\varphi_{2b}}{d\varphi_1} \right) \cdot V_1 \quad (21)$$

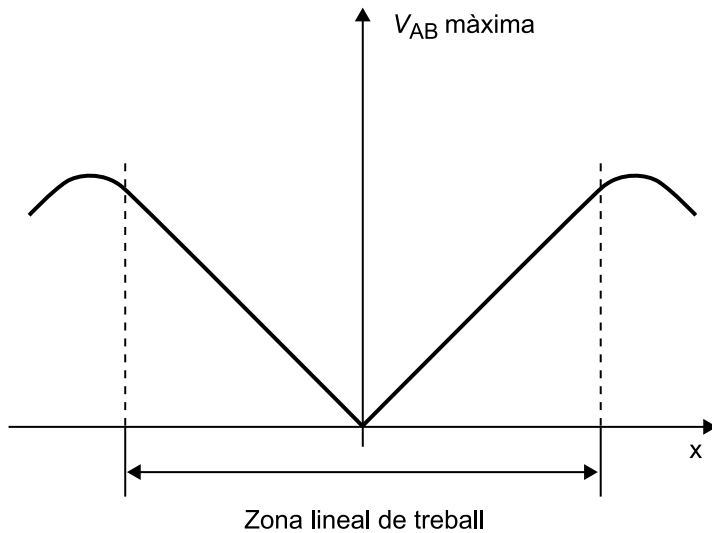
en què φ_1 és el flux generat pel debanat primari, φ_{2a} és la part del flux φ_1 concatenat pel secundari A i φ_{2b} és la part del flux φ_1 concatenat pel secundari B.

L'interior del transformador és buit i conté un nucli magnètic que pot lliscar lliurement dintre del seu continent. Mentre el nucli magnètic estigui perfectament centrat en el continent, l'enllaç del camp magnètic serà el mateix tant per al secundari A com per al secundari B.

Aleshores, el valor de φ_{2a} i φ_{2b} es modificarà segons variï la posició del nucli magnètic i tendirà a disminuir la part del flux que uneix el debanat sobre el qual acaba tenint la part més petita del nucli. D'aquesta manera, el desplaçament és directament proporcional al valor de la tensió de sortida obtinguda.

Podem veure aquesta relació entre desplaçament i la tensió de sortida del conjunt en la figura 34, amb una zona de comportament molt lineal.

Figura 34. Relació entre desplaçament i tensió de sortida en un LVDT



El desplaçament físic que es pot mesurar amb els LVDT gira entorn dels 0,1 metres.

No obstant això, tal com s'ha comentat anteriorment, es requereix un circuit de tractament relativament complex ja que, veient la simetria que presenta el sistema, no és factible detectar el signe del desplaçament de l'objecte.

D'altra banda, l'estabilitat de la font d'excitació del primari és molt important per al funcionament correcte dels LVDT, atès que la tensió de sortida, V_{AB} , depèn tant de la posició del nucli com d'aquest senyal d'excitació.

Per a eliminar la influència de pertorbacions en el senyal d'excitació injectat en el primari de l'LVDT i aconseguir que la informació de sortida sigui una bona representació de l'entrada, és a dir, del desplaçament, s'utilitzen dissenys força optimitzats de la font d'excitació o de la seva influència sobre el senyal de sortida. Són un exemple d'aquests circuits la utilització d'oscil·ladors realimentats o circuits de mesura permanent del senyal d'excitació mitjançant la suma de senyals induïts en els secundaris.

Encoder lineal

Com s'ha comentat, la majoria dels sistemes de mesurament de distància amb contacte físic tenen un abast reduït, atès que el sistema de mesura porta implícit un plançó que tindrà una longitud igual al màxim de la longitud que es pretén mesurar.

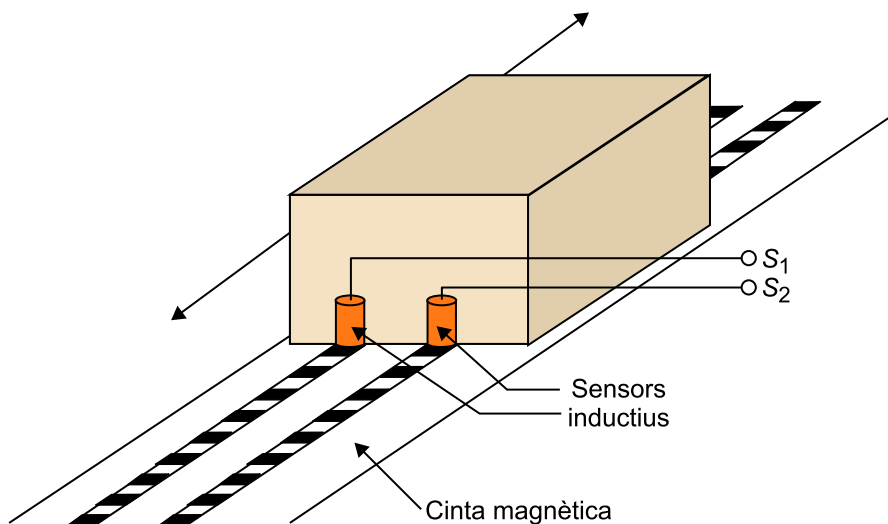
D'aquesta manera, aquests tipus de sensors difícilment superen l'abast màxim de mesura del metre de distància.

Malgrat això, de vegades cal mesurar més enllà d'aquesta distància i es construeix un sensor especialment per fer el mesurament. És el cas de l'**encoder lineal** de tipus relatiu, amb la utilització, per exemple, de sensors de tipus inductiu. S'anomena de *tipus relatiu*, atès que el sensor dóna una informació de sortida respecte a una posició coneguda de referència.

Aquests tipus de sensors són molt resistents a la pols, el greix, la humitat i a altres contaminants comuns dels ambients industrials, i també a cops i vibracions. Aquestes característiques els fan especialment interessants per a aplicacions, per exemple, de control de màquines eina, en què calgui mesurar la distància en els àmbits comentats anteriorment.

L'abast d'aquest tipus de sistema de mesura està limitat només per la capacitat dels comptadors de polsos U/D (*Up/Down* en funció del sentit de la direcció de moviment que tingui l'objecte del qual mesurem el desplaçament). En general, la distància màxima acostuma a ser d'uns 100 metres. Un exemple d'utilització d'aquest sistema sensor és el de la figura 35.

Figura 35. Exemple d'utilització d'un *encoder lineal*

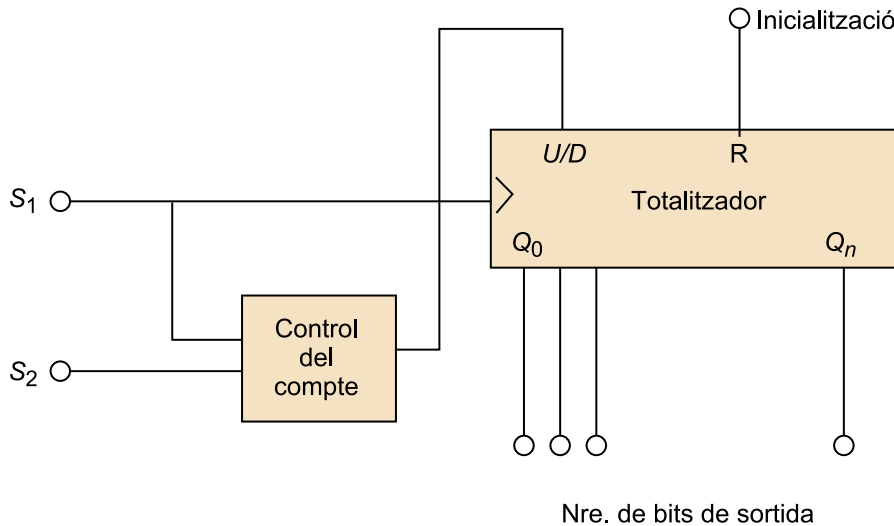


Com podem veure, el sistema de mesura consta de dues parts:

- Unes cintes magnètiques.
- Uns capçals units a l'objecte la distància del qual es pretén mesurar. Aquests capçals són dos sensors inductius que es van desplaçant al llarg de les cintes magnètiques però sense fregament, atès que estan separats a un o dos mil·límetres de les cintes.

Al sistema caldrà afegir-hi un sistema que comptabilitzi el moviment ascendent i descendent (control de compte *Up/Down*, S_1 i S_2). Vegeu la figura 36.

Figura 36. Comptador de polsos ascendants i descendents



Nre. de bits de sortida

Sensors de desplaçament angular amb accionament lineal

Dins del mesurament de la distància establint un contacte amb l'objecte, i en l'àmbit d'abast reduït que estem veient en els darrers exemples, també podem fer esment dels sensors de desplaçament angular. En aquest cas, els sensors de desplaçament angular utilitzats per a mesurar la distància disposen d'accionaments lineals, un cas molt típic en la instrumentació industrial actual.

Un cas habitual és el sensor de posició angular accionat per un cable i utilitzat per a detectar la posició lineal. Veiem **dos casos** en què calculem la distància o el desplaçament d'un objecte unit al sensor de posició angular mitjançant un cable (figures 37 i 38). Observem que la distància, d , recorreguda per l'objecte és directament proporcional a l'angle de gir, α , i al radi, R , de la corona dentada o del mateix sensor, segons l'equació: $d = \alpha R$. Per tant, amb qualsevol dels dos sistemes podem tenir una mesura del desplaçament de l'objecte.

Figura 37. Sensor de desplaçament angular amb corona dentada

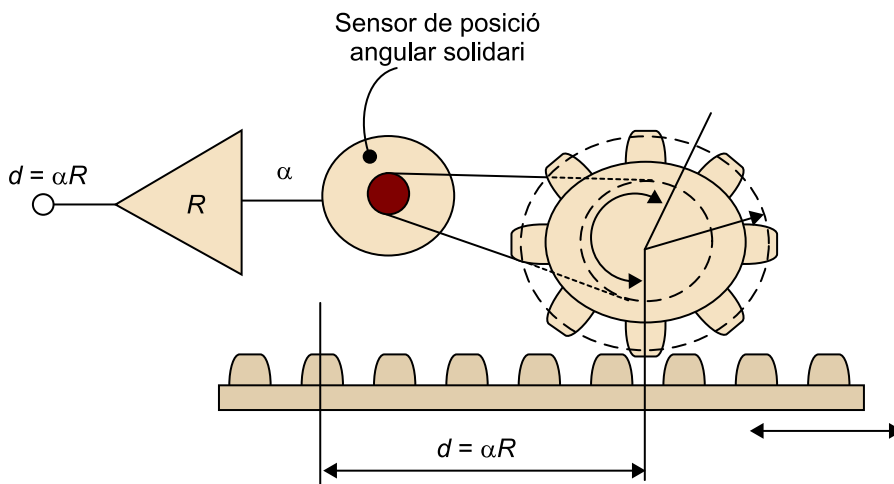
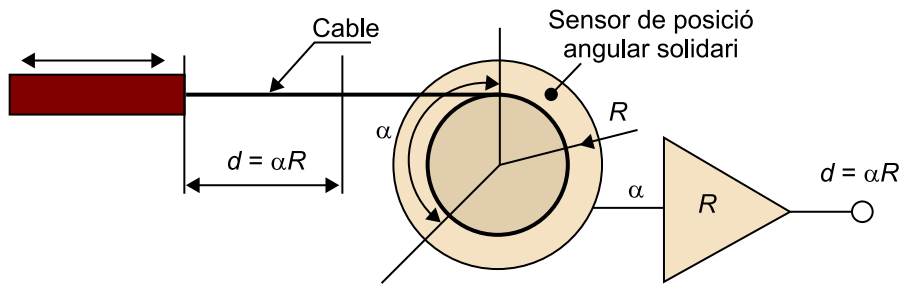


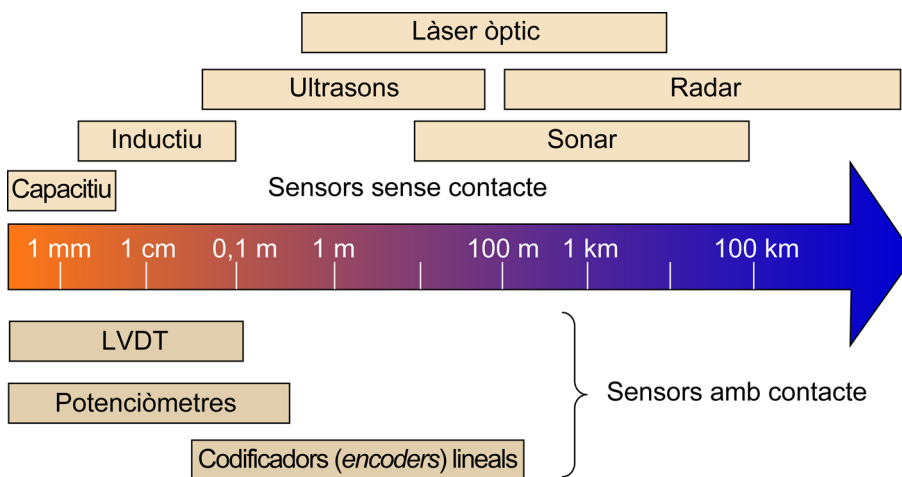
Figura 38. Sensor de desplaçament angular



Comparativa de sensors de distància de posició lineal

En la figura 39 veiem un resum dels sensors de distància de posició lineal amb contacte físic i sense i el seu abast en el mesurament de la distància o del desplaçament per al càlcul de la posició d'un objecte.

Figura 39. Sensors de distància de posició lineal



2.2. Mesurament de la posició angular

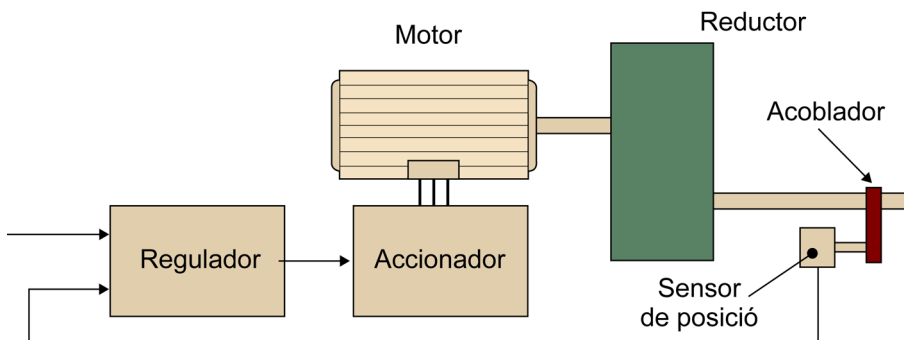
En aquest subapartat ens referirem al càlcul de la posició d'un objecte des del punt de vista del mesurament de la posició angular. Atès que ens trobarem amb casos barrejats de contacte i no-contacte, no utilitzarem aquesta característica com a criteri de classificació.

Aquest tipus de mesurament és molt habitual en accionaments industrials en què cal conèixer l'angle de gir d'una peça determinada, en sistemes que inclouen servomotors i especialment en l'àmbit de la robòtica.

Un servomotor seria com la matèria primera per al disseny i la construcció d'un robot. De fet, el servomotor és un petit dispositiu que té un eix de rendiment controlat. Aquest eix es pot portar a posicions angulars específiques si enviem un senyal concret codificat. Quan el senyal codificat canvia, la posició angular del seu engranatge també ho fa. Aquesta posició determinada és el que es coneix com a *servomotor de posició*.

Veiem en la figura 40 un diagrama de blocs bàsic d'un servomotor de posició molt utilitzat en una cadena de muntatge en què calgui usar braços robotitzats.

Figura 40. Diagrama de blocs bàsic d'un servomotor de posició



Els servomotors són molt utilitzats per a posicionar superfícies de control com el moviment de palanques, petits ascensors, timons i òbviament fins a on arribi la imaginació humana en el disseny de robots.

Per a mesurar la posició angular hi ha una gran varietat de sensors, tot i que els més típics són els següents:

- Els **potenciòmetres**.
- Els **sensors electromagnètics rotatius**, altrament coneguts com a *resolvers*.
- Menys utilitzats per a aquest tipus de mesurament són els **dispositius inductius i capacitius**.
- Els **codificadors de polsos** o *encoders* de tipus òptic, per sobre dels que són de tipus magnètic o capacitiu.

Com podem veure, doncs, les possibilitats són molt àmplies.

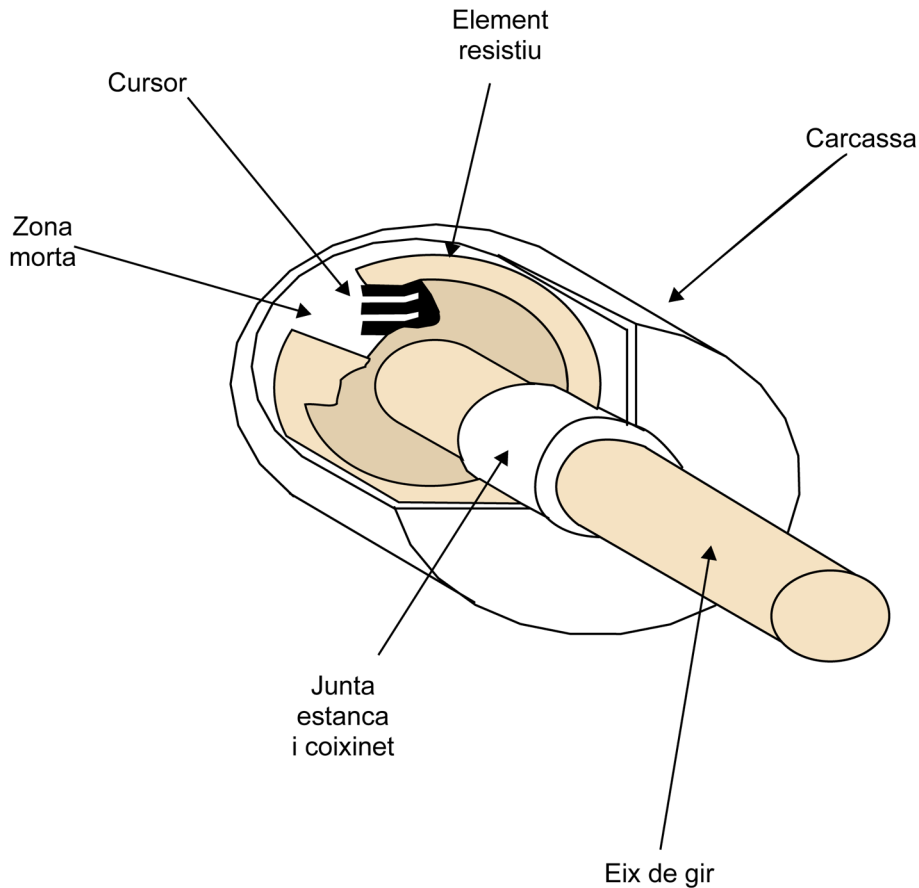
2.2.1. Potenciòmetres

Tal com s'ha comentat sobre el **potenciòmetre** lineal, aquest dispositiu constitueix en si mateix un bon element per a mesurar la posició angular, tot i que també presenta problemes que cal tenir en compte.

El potenciòmetre és un divisor resistiu la sortida del qual és proporcional al seu angle de gir. El canvi en la resistència és el que s'utilitza per a mesurar els desplaçaments angulars d'una peça acoblada al cursor.

En la figura 41 es mostra un esquema d'un **potenciòmetre** per a mesurar petits desplaçaments de posició angular.

Figura 41. Esquema d'un potenciòmetre per a mesuraments de desplaçaments angulars



D'acord amb una classificació general dels diferents tipus de potenciòmetres més habituals, podem resumir els tipus existents en tres grups:

- De fil bobinat.
- De plàstic conductiu (no bobinats).
- Híbrids (no bobinats).

1) Els potenciòmetres de **fil bobinat** tenen com a element resistiu un fil enrotllat sobre un suport. Aquest fil acostuma a ser un compost d'un dels aliatges següents:

- Níquel-crom.
- Or-platí.
- Coure-níquel.

La seva característica principal és l'excel·lent estabilitat tèrmica i la capacitat per a treballar amb nivells de potència importants.

2) Els potenciòmetres de **plàstic conductiu** s'elaboren amb resines plàstiques com les poliamides, els polièsters i l'epoxi, i són molt utilitzats gràcies a la seva baixa fricció, als nivells de soroll baix i a la seva resolució considerada "il·limitada". En la pràctica, aquesta resolució és limitada per aspectes com el soroll de la resistència de contacte o l'estabilitat de la tensió d'alimentació.

3) Els potenciòmetres **híbrids** combinen les prestacions dels de fil bobinat i els de plàstic conductiu i són força utilitzats per a mesuraments que requereixen precisió, tot i que el seu component plàstic limita la potència que poden dissipar. S'anomenen *híbrids* perquè combinen el fil bobinat amb el plàstic conductiu i aquesta disposició especial ajuda a millorar-ne les prestacions.

Veiem en la taula 5, un quadre de resum de les característiques principals d'aquests tipus de potenciòmetres.

Taula 5. Característiques principals dels potenciòmetres

| | Fil bobinat | Plàstic conductiu | Híbrids |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Resolució | Limitada | Infinita | Infinita |
| Potència | Alta | Baixa | Baixa |
| Estabilitat tèrmica | Excel·lent | Pobra | Molt bona |
| Soroll | Baix | Molt baix | Baix |
| Vida mitjana | 10^5 – 10^6 cicles | 10^6 – 10^8 cicles | 10^5 – 10^6 cicles |
| Comportament en alta freqüència | Pobre | Bo | Bo |

Com s'ha pogut observar, el funcionament del potenciòmetre és força senzill. Tot i així, la necessitat que porta associada el potenciòmetre de tenir contacte físic permanent entre el cursor i la superfície conductora del sensor provoca un desgast progressiu del dispositiu.

Adicionalment, el seu angle mort se suma als problemes anteriors i origina que el potenciòmetre vagi quedant cada vegada més desplaçat del camp de mesura de posició angular i que s'utilitzin altres solucions més avantatjoses.

2.2.2. Sensors electromagnètics rotatius de posició angular

Els sensors electromagnètics rotatius de posició angular, coneguts com a *resolvers*, són els més difosos per la gran robustesa i precisió que tenen.

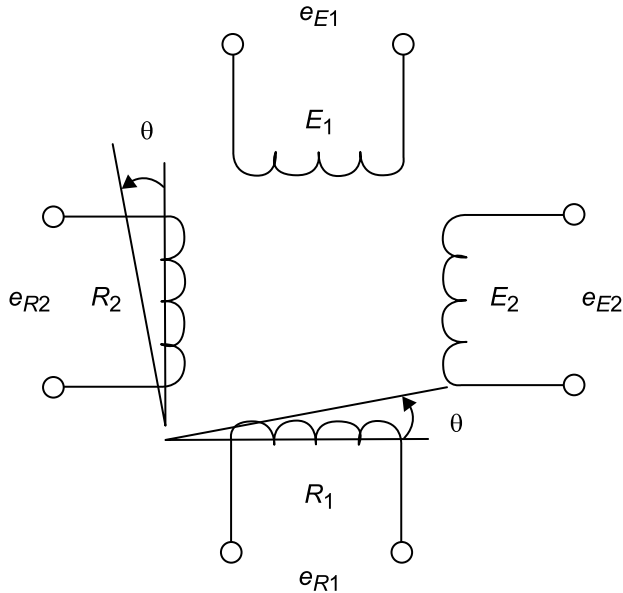
Tenen una gran fiabilitat en conservar la integritat de les seves característiques amb gran independència de la temperatura. Poden treballar en ambients poc nets i a pressions altes i molt baixes.

Angle mort

Angle en el qual el potenciòmetre no arriba a mesurar la posició per limitacions mecàniques de la seva construcció.

Estan formats per transformadors variables rotatius amb dos debanats en l'estator (E_1 i E_2) disposats a 90° i dos més en el rotor (R_1 i R_2) també a 90° . Podem veure aquesta disposició en l'esquema de la figura 42:

Figura 42. Disposició dels transformadors en un *resolver*



Fixem-nos que si un dels debanats de l'estator, E_1 , és excitat amb un senyal de tensió sinusoidal de freqüència f , i l'altre, E_2 , no és excitat o es posa en curtcircuit, per la disposició dels debanats hi ha una posició en la qual la tensió sinusoidal induïda en el secundari del rotor R_1 és màxima, mentre que la tensió del secundari R_2 és nul·la.

Veiem que en trobar-se el debanat E_2 perpendicular a l' E_1 , la força electromotriu induïda en E_2 teòricament és nul·la. En la pràctica, s'acostuma a curtcircuitar per tal d'evitar possibles tensions residuals induïdes.

Si fem un desplaçament del rotor fins a un angle θ en les condicions anteriors, les tensions induïdes en els secundaris seran expressades per les equacions:

$$e_{R1} = e_{E1} \cos \theta \quad (22)$$

$$e_{R2} = e_{E1} \sin \theta \quad (23)$$

De les equacions anteriors observem que aquest tipus de sensor ofereix tensions en les sortides, l'amplitud de les quals depèn de l'angle de posició de l'eix del rotor respecte a la posició de referència.

També, si a partir d'una posició angular concreta es fa girar l'eix del rotor, en tot moment el senyal de sortida conté informació de la posició angular de l'eix i la quantitat de voltes que ha fet, la qual cosa possibilita l'increment de la precisió del posicionament si s'utilitzen engranatges reductors, com és el cas del posicionament d'antenes de radar.

A manera d'exemple, en el quadre següent de la taula 6 es presenten les característiques dels *resolvers* de la firma Vernitron MAGTECH:

Taula 6. Exemple de característiques d'un *resolver* comercial

| Paràmetre | Magnitud |
|-------------------------------|--|
| Diàmetre exterior | 20 ÷ 300 mm |
| Freqüència d'excitació | 60 ÷ 10.000 Hz |
| Velocitat angular, ω_R | Fins a 20.000 rpm |
| Tensió nul·la de sortida | 1 ÷ 3 mV/V |
| Exactitud | $\pm 10 \text{ arcseg}^9 \div \pm 4 \text{ arcmin}^{10}$ |

⁽⁹⁾Abreviatura d'*arcsegon*. Equivalent a una seixantena part d'un arcminut.

⁽¹⁰⁾Abreviatura d'*arcminut*. Unitat de mesura angular equivalent a una seixantena part d'un grau.

Els *resolvers* es comercialitzen en una gran varietat de mides i amb un ampli ventall de velocitats angulars de rotor.

El seu àmbit principal d'utilització el podem trobar en la robòtica, en electrònica marina, en aplicacions aeronàutiques i espacials en què no és possible utilitzar altres tècniques de cost més baix.

Com s'ha comentat, els *resolvers* presenten els avantatges inherents dels sensors de tipus electromagnètic, per tant, una gran robustesa davant sobrecàrregues i nivells de senyal elevats, per la qual cosa tenen una bona capacitat de treball en ambients amb una abundància profusa d'interferències.

En contrapartida, tenen com a desavantatges el cost, un pes elevat i la presència de contactes mòbils que comporten un desgast inevitable i el cost derivat per manteniment.

2.2.3. Sensors inductius

Un altre mètode que serveix per a mesurar la posició angular és el cas dels **sensors inductius**. Aquest tipus de sensors es basen en la tensió generada en una bobina, en un nucli magnètic i/o imant quan són sotmesos a una variació d'un camp magnètic.

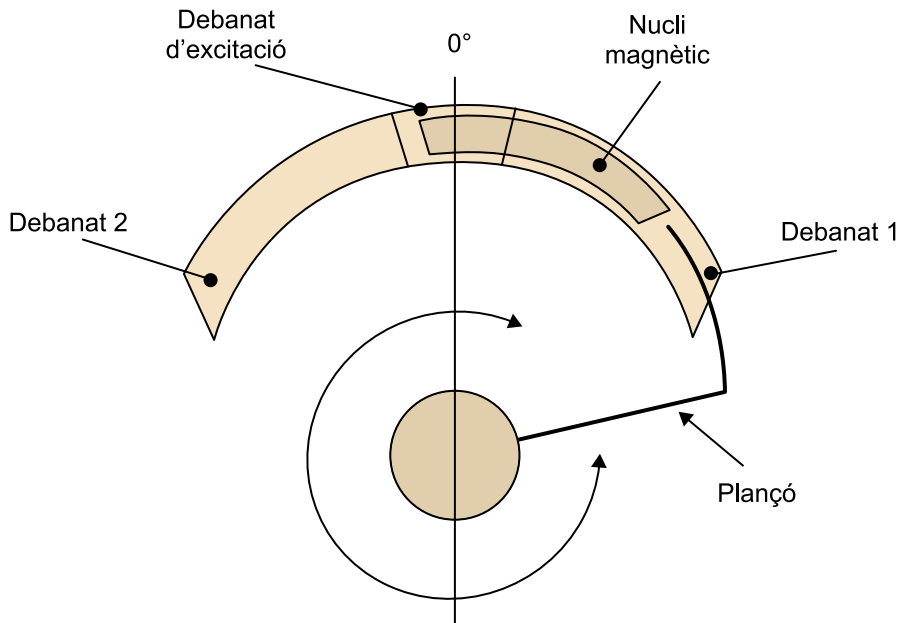
Tot i que hi ha una llarga llista de sensors inductius comercials per a mesurar la posició angular, hi ha un parell de sensors força útils per a efectuar aquest mesurament, atès que no tenen contactes mòbils. Són l'**RVDT** i el **magnesyn**.

1) D'una banda, el sensor **RVDT**⁽¹⁾ és un transductor electromecànic que proporciona una variable de corrent altern, la tensió de sortida de la qual és linealment proporcional al desplaçament angular del seu eix d'entrada.

⁽¹⁾De l'anglès, *rotary variable differential transformer*.

El funcionament del sensor RVDT és similar a l'LVDT, sensor que hem vist anteriorment, malgrat que la seva forma geomètrica és diferent segons podem veure en la figura 43:

Figura 43. *Rotary variable differential transformer (RVDT)*

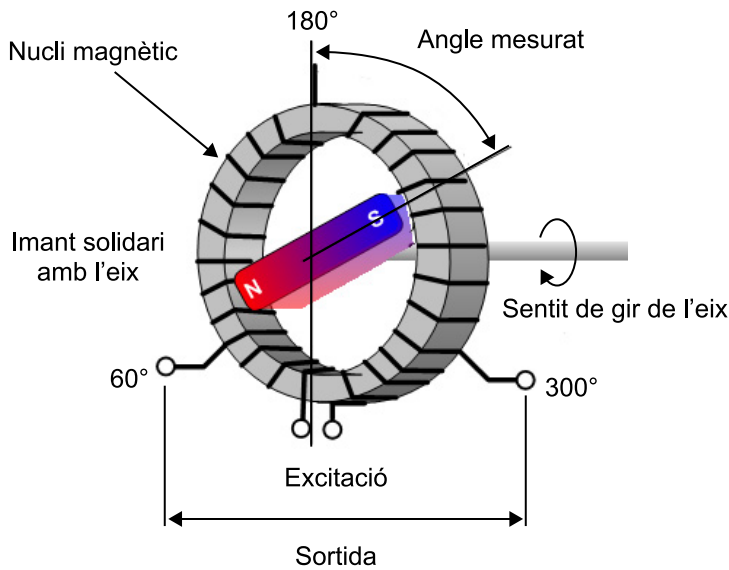


Aquest tipus de sensor presenta els avantatges dels LVDT si parlem de sensibilitat i precisió, i també presenta un cost baix, robustesa i una mida petita. No obstant això, presenten l'inconvenient obvi que podem observar en la figura 43: l'angle de gir està limitat a un petit arc.

2) De l'altra, el **magnesyn** és un imant solidari amb l'eix la posició del qual volem mesurar. Consta d'un estator bobinat sobre un nucli magnètic amb forma de toroide i d'alta permeabilitat magnètica. El sistema té distribuïdes tres posicions a diferents tensions situades a 60° , 180° i 300° . La diferència de potencial entre les preses ubicades a 60° i 300° és proporcional al cosinus de l'angle de l'imant respecte del punt ubicat a 180° .

Podem observar la disposició especial del **magnesyn** en la figura 44.

Figura 44. Magnesyn



Els avantatges i inconvenients d'aquest tipus de sensor són similars als que presenta un sensor electromagnètic. No obstant això, el magnesyn presenta com a principal avantatge l'absència de contactes mòbils.

En conjunt, els **sensors inductius** són força utilitzats en l'àmbit de l'automoció per a mesurar velocitats de rotació o detectar la posició angular d'un element determinat. El seu avantatge principal és el cost reduït i la seva simplicitat.

2.2.4. Codificadors de polsos

Dins del grup de **codificadors de polsos** o *encoders* s'inclou una àmplia varietat de sensors amb tipologies i tecnologies molt diferents que presenten, en general, un tret comú: **una sortida digital que informa sobre la posició d'un eix.**

Segons el tipus de tecnologia amb què s'ha elaborat l'*encoder*, trobem els codificadors de polsos següents:

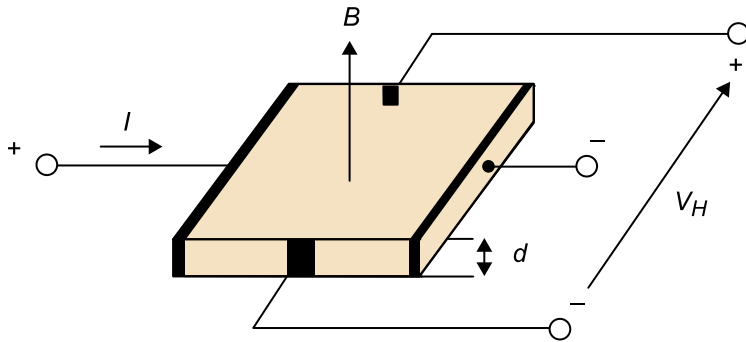
1) **Sistemes inductius.** Són els sistemes que utilitzen un detector de proximitat per a comptar les dents metàl·liques d'una roda dentada solidària a l'eix.

2) **Sistemes basats en l'efecte Hall.** Aquests sistemes produeixen polsos cada vegada que un imant passa pel davant d'un sensor Hall. L'efecte "Hall" va ser descobert el 1879 per Edwin Herbert Hall mentre treballava en la seva tesi doctoral.

En síntesi, Hall va descobrir que quan un conductor pel qual circula un corrent elèctric se situa en un camp magnètic, es genera una tensió perpendicular a aquests dos.

Podem veure l'equació matemàtica i el principi bàsic que defineix l'efecte Hall en l'equació (24) i en la figura 45, respectivament:

Figura 45. Principi bàsic de l'efecte Hall



$$V_H = R_H \cdot I \cdot B / d \quad (24)$$

en què V_H és la diferència de potencial en la sortida, tensió Hall.

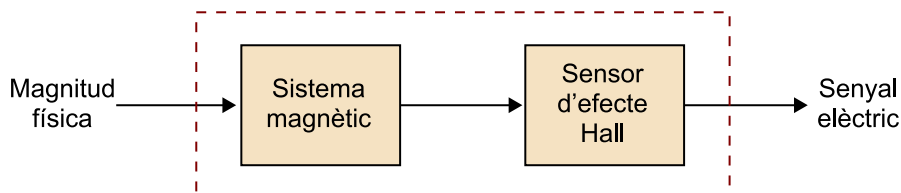
R_H és la constant de Hall.

I és el corrent elèctric que circula per la làmina de material metàl·lic o del semiconductor, de gruix d .

B és el camp magnètic en què se situa la làmina o el semiconductor i resulta directament proporcional al corrent elèctric i inversament proporcional al gruix d de la làmina.

En la figura 46 veiem un diagrama de blocs amb els diferents elements que conformen un dispositiu de mesura de la posició angular basat en l'efecte Hall.

Figura 46. Elements d'un dispositiu de mesura de posició angular basat en l'efecte Hall



3) Sistemes òptics. En els sistemes òptics, el mesurament de la posició angular es basa en un feix de llum entre un LED i un fotodíode que és tallat per una roda dentada o amb forats. Alternativament, també es pot produir o no reflexió sobre un disc en la superfície del qual té dibuixades línies clares i fosques.

Fins aquí ens hem referit a una classificació dels *encoders* o **codificadors de polsos** segons la tecnologia.

Si pel contrari, fem una segona classificació dels *encoders* des del punt de vista de l'aplicació, podem agrupar aquests tipus de sensors en dos grups:

a) **Sensors absoluts.** La immensa majoria dels sensors absoluts són de tipus òptic per reflexió sobre un disc en el qual es dibuixa el codi Gray.

No tenen una resolució molt gran però són útils per a aplicacions senzilles. En aquest tipus de sensors, per a una mateixa posició sempre tindrem la mateixa sortida.

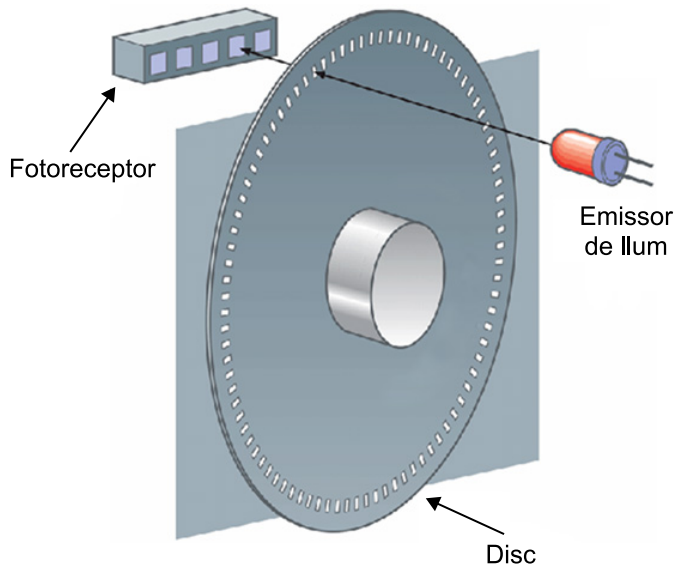
b) **Sensors relatius.** Com el seu nom avança, donada una posició de referència, la sortida ens informarà d'un canvi de posició respecte d'aquesta. A diferència dels sensors absoluts, els relatius es poden construir amb qualsevol de les tecnologies esmentades anteriorment per als *encoders*, malgrat que la majoria siguin també de tipus òptic. El seu funcionament bàsic és molt senzill atès que comptabilitzen polsos a partir d'una posició determinada i el total indica la posició.

En general, a l'hora d'escollir un sensor de posició angular, l'elecció acostuma a passar per escollir un dispositiu de tipus *encoder*, i generalment òptic.

El motiu de fer aquesta elecció és perquè els *encoders òptics* són econòmics, de petites dimensions i pes (aspecte important per no haver de carregar molt l'eix la velocitat de gir del qual es vol mesurar), i per tant tenen una àmplia oferta comercial.

Veiem un exemple gràfic senzill d'un *encoder* òptic en la figura 47.

Figura 47. *Encoder* òptic



El funcionament d'aquest conjunt és ben senzill. Quan el sistema fa girar l'eix solidari amb el disc, el disc comença un moviment rotatori i la llum passa a través de cadascun dels forats que s'interposen davant seu en el moviment de

Codi Gray

Codi binari, la principal característica del qual és que, donats dos números consecutius qualssevol del codi, la diferència entre ells és només d'un sol bit.

Codi de Gray de 3 bits

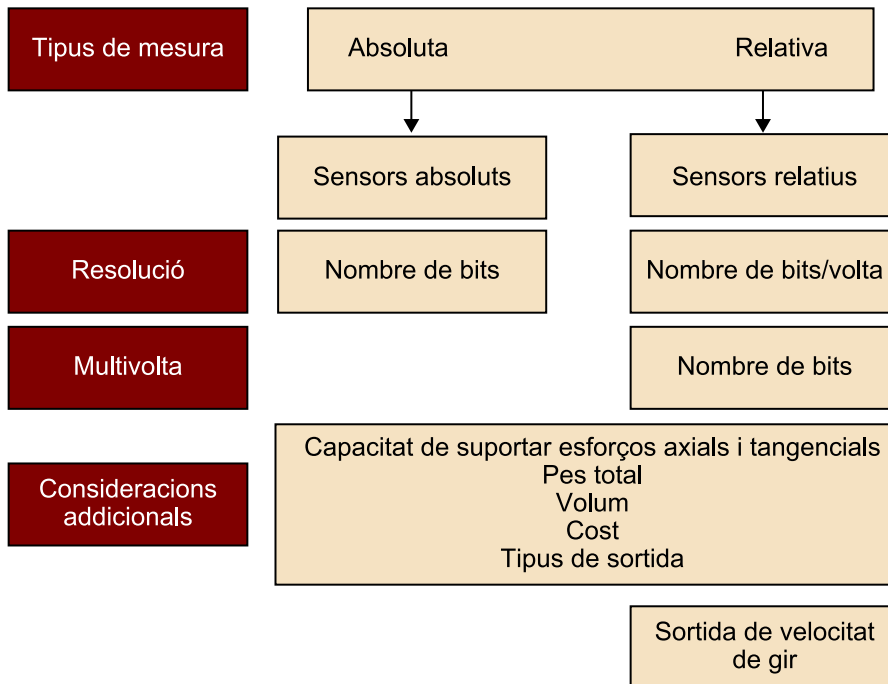
| b ₂ | b ₁ | b ₀ |
|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |

gir. El fotoreceptor generarà un senyal elèctric cada cop que hi incideixi llum i un sistema comptador podrà determinar el nombre de polsos lluminosos en funció dels senyals elèctrics generats.

Aquesta informació és enviada a un microprocessador que determinarà les voltes que ha donat el disc a partir del nombre de polsos, i també la longitud recorreguda, la velocitat i la nova posició, que serà proporcional al radi del disc. Seria el cas d'un *encoder* capaç de comptar un nombre superior al nombre de polsos totals que és capaç de produir en una sola volta, és a dir, 360° , ja que es tracta d'un dispositiu multivolta.

A tall de resum, i des de l'òptica instrumental, la selecció d'un *encoder* des del punt de vista de seleccionar un sensor de posició angular per a una aplicació concreta és molt senzilla, atès que la seva sortida és sempre de tipus digital. Podem observar aquest resum en la figura 48.

Figura 48. Resum dels criteris que cal tenir en compte per a seleccionar un *encoder*



Resum

En aquest mòdul hem fet un repàs als principals sensors de temperatura i posició, ja que són dues de les variables físiques més importants per mesurar en el camp de la instrumentació electrònica.

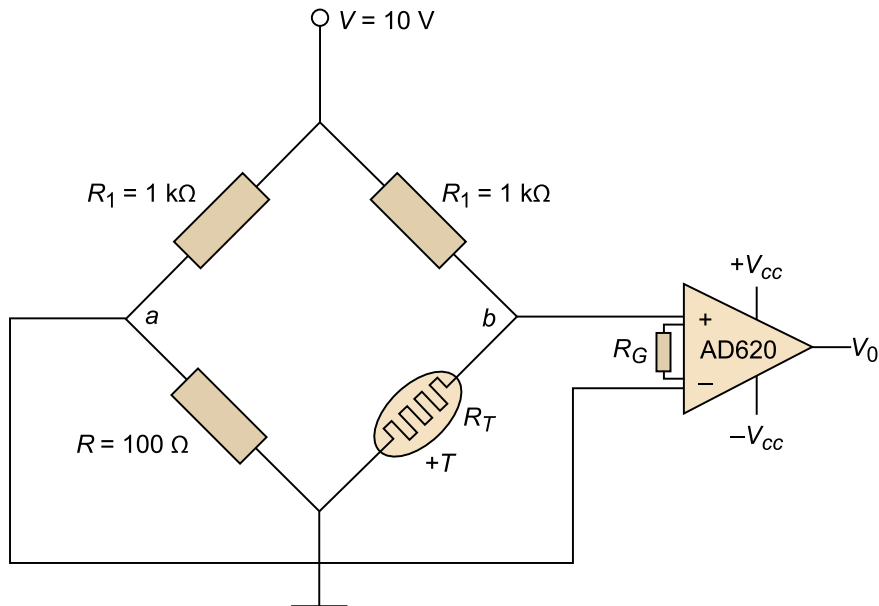
Al llarg del mòdul s'han presentat els diferents tipus de sensors, l'efecte en el qual es basen per al seu funcionament, el seu model matemàtic, les seves característiques més importants i el seu camp d'aplicació.

El camp dels sensors és un camp molt extens i obert, per la qual cosa encoratgem els estudiants interessats en el tema a llegir la bibliografia del mòdul.

Exercicis d'autoavaluació

1. Suposem que tenim el circuit de la figura 49, que és un exemple de sistema de mesurament de temperatura basat en una RTD.

Figura 49. Esquema d'un sistema de mesura de temperatura basat en una RTD



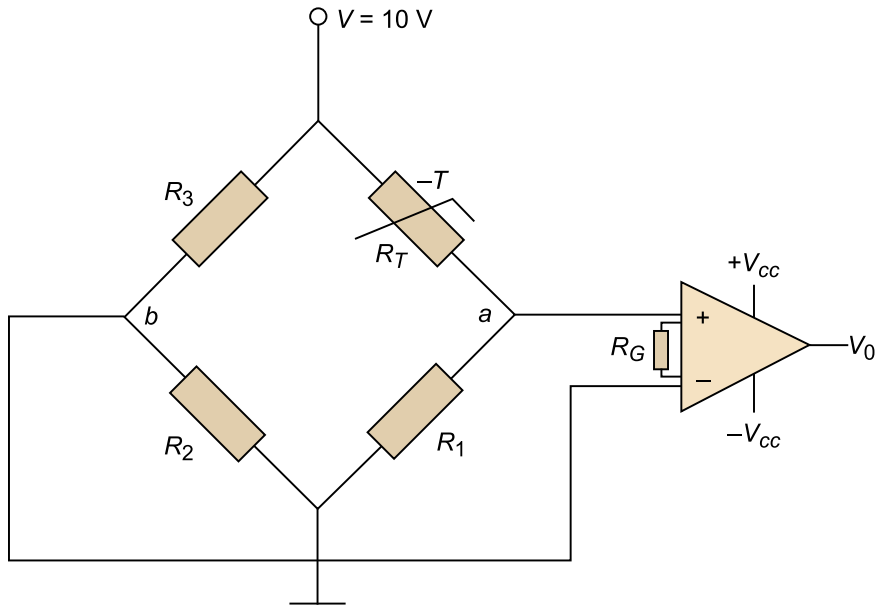
Si disposem d'una RTD de platí que té un coeficient tèrmic de $\alpha = 0,00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ i valor de resistència nominal (a $0 \text{ }^\circ\text{C}$) de $R_0 = 100 \text{ } \Omega$, i volem que el nostre sistema proporcioni una tensió d'entre 0 i 5 V quan la temperatura varii entre 0 i $100 \text{ }^\circ\text{C}$, determineu l'expressió del valor de la tensió de sortida del sistema. Representeu la corba V_0 en funció de la temperatura i discutiu-ne la linealitat.

2. Es vol dissenyar un termòmetre clínic que sigui capaç de mesurar la temperatura corporal des de $32 \text{ }^\circ\text{C}$ fins a $42 \text{ }^\circ\text{C}$, utilitzant un NTC de $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ de la casa Vishay BCcomponents.

Utilitzant una topologia en pont com la presentada en la figura 51, determineu els valors per a tots els elements del circuit per tal de tenir valors de sortida d'entre -5 V i $+5 \text{ V}$. Considereu que l'amplificador és el mateix que en l'exercici d'autoavaluació anterior i que la sensibilitat, en el punt d'equilibri, és determinada per l'equació següent:

$$S(T) = \frac{V}{B} \left(\frac{B^2}{4T^2} - 1 \right) \quad (32)$$

Figura 51. Esquema d'un termòmetre clínic basat en un NTC



Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. Primerament, analitzem qualitativament el circuit que ens proposen, per entendre el perquè dels seus valors. Fixem-nos que ens proposen la utilització d'un pont de Wheatstone per a dissenyar el sistema de mesura, en el qual observem que la resistència de compensació R és igual a R_0 per al valor de temperatura en el qual el pont ha d'estar equilibrat, és a dir, a 0°C . Per tant, $R = 100\ \Omega$.

Per a escollir les resistències R_1 del pont, si volem tenir un error de linealitat petit, és necessari que siguin força superiors a la resistència R . Observem que en el circuit proposat el valor de R_1 és deu vegades superior al valor de R : $R_1 = 10 R = 1\ \text{k}\Omega$.

Amb referència a l'amplificador que ens presenten, l'AD620 és un amplificador d'instrumentació monolític que presenta les característiques mostrades en el *datasheet* següent: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/105505445AD620_e.pdf.

Observem en el *datasheet* que el seu guany és determinat pel valor de la resistència R_G i, per tant, l'hauré de determinar nosaltres convenientment a partir de l'expressió que se'ns indica i que reproduïm en l'equació (25):

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \quad (25)$$

a) Seguidament, calcularem el valor de la tensió de sortida V_0 . Recordem que el valor de R_T és:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) = 100(1 + \alpha(T - 0)) = 100(1 + \alpha T) \quad (26)$$

Segons l'equació (4), tenim:

$$V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha T)}{R_0(1 + \alpha T) + R_1} - V \cdot \frac{R}{R_1 + R} \quad (27)$$

Fixem-nos que com que el pont ha d'estar equilibrat a $T = 0^\circ\text{C}$, llavors a aquesta temperatura tindrem $V_b - V_a = 0$ i, per tant, es compleix que $\frac{R_0}{R_0 + R_1} = \frac{R}{R_1 + R}$ tal com passa en el nostre circuit.

Si en l'equació anterior, per tant, considerem que $R = R_0$ i recordem que $R_1 = 10 R$, arribem a:

$$V_b - V_a = V \cdot \frac{10\alpha T}{(10 + 1)(10 + 1 + \alpha T)} = V \cdot \frac{0,0385 T}{11 \cdot (11 + 0,00385 T)} = \frac{0,385 T}{11 \cdot (11 + 0,00385 T)} \quad (28)$$

L'amplificador d'instrumentació amplificarà amb un guany G aquesta tensió diferencial, per la qual cosa la tensió final de sortida serà:

$$V_0 = G(V_b - V_a) = \left[1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \right] \left[\frac{0,385 T}{11 \cdot (11 + 0,00385 T)} \right] \quad (29)$$

Per a aconseguir els valors de tensió demanats a la sortida V_0 , necessitarem que per a $T = 100^\circ\text{C}$ tinguem $V_0 = 5\ \text{V}$. Per tant, el valor de R_G el trobarem com a:

$$5 = \left[1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \right] 0,307 \quad (30)$$

És a dir:

$$R_G \approx 3.200\ \Omega \quad (31)$$

b) Per poder parlar de l'error de linealitat, hem de veure com de bé l'expressió de V_0 s'aproxima a una recta. Utilitzant per exemple el Matlab per a representar-ho, farem:

```
% Paràmetres del sistema:
G = 16.4375;      % guany amplificador
a = 0.00385;     % coeficient alfa

comptador = 0;
for T = 0:0.1:100
    comptador = comptador+1;
    Vo(comptador)=G*100*a*T/(11*(11+a*T)); % equació de la sortida Vo
end

% representació gràfica
figure
plot(0:0.1:100,Vo,'.')

% ajustem ara una recta als punts de la gràfica
T = 0:0.1:100;
p = polyfit(T,Vo,1); % polinomi de primer ordre

% calculem ara els punts de la recta
f = polyval(p,T);
figure
plot(T,Vo, '.r',T,f, '.b')

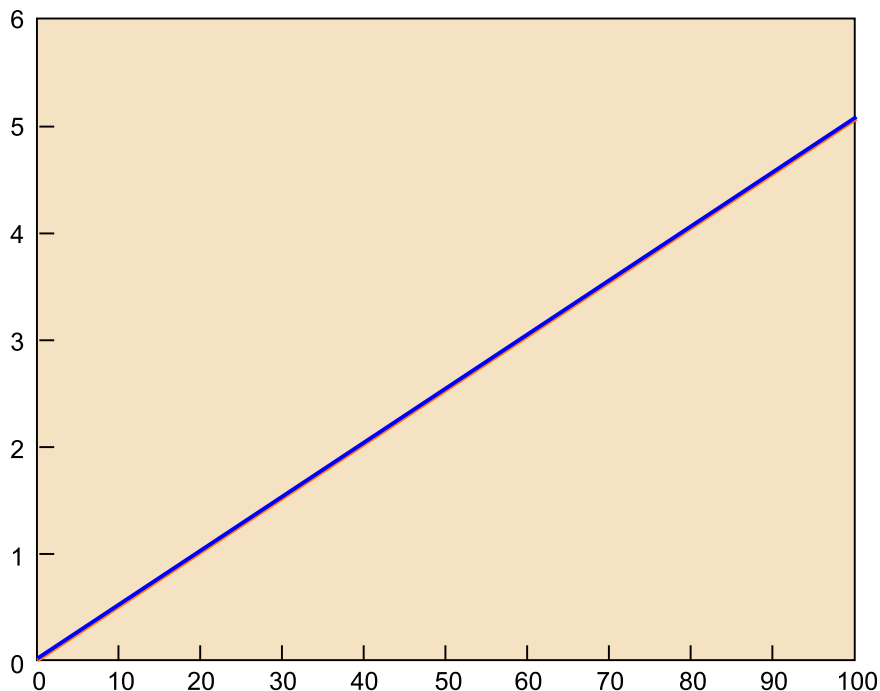
% calculem la correlació entre les dues gràfiques
c = corr(Vo',f');
% calculem l'error quadràtic mitjà
error = mean((Vo-f).^2);

% error de linealitat
[valor, posicio] = max(abs(Vo-f)); % busquem el punt en què l'error és més gran
err_lin = 100*valor/(Vo(end)-Vo(1)); % posem l'error en % sobre el marge
```

L'error de linealitat, calculat com a $\text{err_lin} = |V_{o_real} - V_{o_lineal}|_{\max}$, expressat en tant per cent sobre el marge de valors de V_0 : $\text{err_lin} = 100 \cdot |0 - 0,0292| / 5,0532 = 0,58\%$.

La relació és pràcticament lineal, amb un coeficient de correlació de valor 1 i un error quadràtic mitjà de $1,6853 \cdot 10^{-4}$. Les representacions gràfiques, pràcticament idèntiques, es mostren en la figura 50:

Figura 50. Representació de la relació temperatura-tensió. En vermell, la corba mesurada. En blau, la recta de regressió



2. La idea del disseny mitjançant una estructura de pont de Wheatstone és la de dimensionar el valor de R_1 per tal de garantir la màxima linealitat, i les R_2 i R_3 per determinar el zero del sistema de mesura (el punt en el qual $V_a = V_b$).

Per aconseguir la linealitat màxima (vegeu el criteri de linealització de la corba R/T del subapartat 1.3.2 d'aquest mòdul didàctic), haurem de situar el punt de la corba d'inflexió de la tensió V_a al centre del camp de mesura. Com que mesurem entre 32 °C i 42 °C, aquest punt serà en 37 °C = 310 K. Perquè això sigui així, necessitarem que la resistència R_1 valgui:

$$R_1 = \frac{B}{B} - \frac{2T}{2T} R_T = \frac{B}{B} - \frac{2T}{2T} R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (33)$$

Posant-hi valors, alguns dels quals extrets del *datasheet*, tindrem:

$$R_1 = \frac{3.977}{3.977} - \frac{2}{2} \cdot \frac{310}{310} \cdot 10.000 \cdot e^{3.977\left(\frac{1}{310} - \frac{1}{298}\right)} = 4.360 \quad \Omega \quad (34)$$

Per calcular els valors de les resistències R_2 i R_3 hem d'aconseguir que produeixin la mateixa tensió que l'altra branca del pont quan la temperatura arribi a un valor determinat de temperatura. Escollim aquesta temperatura, un cop més, com la temperatura mitjana del marge que volem cobrir, és a dir, 37 °C, de manera que a aquesta temperatura tindrem el pont en equilibri i $V_0 = 0$ V:

$$R_2 = R_1 = 4.360 \quad \Omega \quad (35)$$

$$R_3 = R_T|_{37^\circ\text{C}} = 5.970 \quad \Omega \quad (36)$$

La sensibilitat del sistema en el punt d'equilibri la calcularem amb l'equació que ens han donat:

$$S(T) = \frac{V}{B} \left(\frac{B^2}{4T^2} - 1 \right) = \frac{10}{3.977} \left(\frac{3.977^2}{4 \cdot 310^2} - 1 \right) \approx 101 \quad \text{mV/K} \quad (37)$$

Per tant, a la temperatura de 310 K = 37 °C, tenint en compte el resultat anterior per a la sensibilitat, tindrem:

$$V_a - V_b = 0,101 (T - 310) \quad (38)$$

La tensió més alta de sortida la tindrem per a $T = 42$ °C = 315 K, en què:

$$V_a = 10 \frac{R_1}{R_1 + R_T} = 10 \frac{4.360}{4.360 + 10.000 \cdot e^{3.977\left(\frac{1}{315} - \frac{1}{298}\right)}} = 4,726 \quad \text{V} \quad (39)$$

i podem calcular la tensió

$$V_b \quad (40)$$

a aquesta temperatura a partir de l'equació anterior:

$$V_b = V_a - 0,101 (T - 310) = 4,726 - 0,101(315 - 310) = 4,221 \quad \text{V} \quad (41)$$

En aquest cas, la tensió de sortida serà:

$$V_0 = G(V_a - V_b) = G(4,726 - 4,221) = G \cdot 0,505 \quad (42)$$

en què G és el guany de l'amplificador monolític que fixarem a partir de la resistència externa R_G al valor que ens interressi.

La tensió més baixa de la sortida la tindrem per a $T = 32$ °C = 305 K:

$$V_a = 10 \frac{4.360}{4.360 + 10.000 \cdot e^{3.977 \left(\frac{1}{305} - \frac{1}{298} \right)}} = 3,720 \text{ V} \quad (43)$$

$$V_b = 3,720 - 0,101(305 - 310) = 4,225 \text{ V} \quad (44)$$

En aquest cas, la tensió de sortida serà:

$$V_0 = G(3,720 - 4,225) = -G \cdot 0,505 \quad (45)$$

Per tant, i suposant que l'amplificador monolític és el mateix de l'exercici anterior, determinarem el valor del guany G i de la resistència R_G a partir de l'expressió:

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \quad (46)$$

Com que hem de tenir $G \cdot 0,505 = 5$, el valor de G serà:

$$G = \frac{5}{0,505} = 9,901 \quad (47)$$

I per tant:

$$R_G = \frac{49400}{8,901} = 5.550 \text{ } \Omega \quad (48)$$

Glossari

atmosfera inerta *f* Atmosfera que conté gasos inerts, que no reaccionen amb altres substàncies.

sin. **atmosfera neutra**

atmosfera neutra *f* sin. **atmosfera inerta**

atmosfera oxidant *f* Atmosfera que conté predominantment molècules d'oxigen, fet que provoca que ocorri l'efecte d'oxidació.

atmosfera reductora *f* Atmosfera amb manca d'oxigen. Qualsevol procés que passi en aquestes condicions implica que alguns components poden perdre oxigen mentre que d'altres de més afinitat l'incorporen.

bolòmetre *m* Termòmetres de resistència (RTD o NTC) configurats per mesurar radiació d'una manera similar a la de les termopiles.

codificador axial *m* sin. **codificador rotatiu**

codificador rotatiu *m* Dispositiu electromecànic que s'utilitza per a convertir la posició angular d'un eix a un codi digital.

en *encoder*

sin. **codificador axial** o **generador d'impulsos**

efecte piroelèctric *m* Efecte anàleg al piezoelèctric, però en lloc d'aparèixer càrregues elèctriques quan es deforma un material apareixen càrregues superficials en una direcció determinada quan el material experimenta un canvi de temperatura.

emissivitat *f* Quocient entre l'energia radiada per un cos a una certa temperatura T i l'energia radiada per un cos negre a la mateixa temperatura T .

encoder *m* Vegeu **codificador rotatiu**.

equilibri tèrmic *m* Situació en què la temperatura dins d'un sistema és uniforme.

fotodíode *m* Semiconductor construït amb una junció pn, sensible a la incidència de llum visible o infraroja.

fotoresistència *f* Component electrònic que té la característica de disminuir la seva resistència en funció de la intensitat de la llum incident.
sigla LDR

generador d'impulsos *m* sin. **codificador rotatiu**

inèrcia tèrmica *f* Propietat que indica la quantitat de calor que pot conservar un cos i la velocitat amb què la cedeix o absorbeix de l'entorn.

instrumentació industrial *f* Grup d'elements que serveixen per a mesurar, convertir, transmetre, controlar o registrar variables d'un procés per tal d'optimitzar els recursos que s'hi utilitzen.

LDR *f* Vegeu **fotoresistència**.

LVDT *m* Vegeu **transformador lineal variable diferencial**.

potenciòmetre lineal *m* Transductor de distància i posició amb contacte i fregament.

resistència metàl·lica *f* Detector de temperatura resistiu.
sigla RTD

resistivitat *f* Capacitat que té un material per a oposar-se a la circulació del corrent elèctric.

RTD *f* Vegeu **resistència metàl·lica**.

sensor de radiació *m* Sensor que efectua els mesuraments a partir de l'energia que emeten tots els materials, en funció de la seva temperatura, en la regió de l'espectre electromagnètic infraroig.

sensor de silici *m* Sensor basat en la relació entre la tensió base-emissor (V_{BE}) i el corrent de col·lector (I_C) d'un transistor bipolar de junció, BJT.

sensor piroelèctric *m* Sensor que basa el seu funcionament en l'efecte piroelèctric.

sinterització *f* Procés que permet d'unir, per difusió en estat sòlid, partícules petites d'un material.

telèmetre làser *m* Dispositiu que permet mesurar distàncies des d'un observador a un objectiu. El seu funcionament es basa a mesurar el temps que triga un pols làser a arribar a un objectiu i tornar-ne. Els telèmetres làser permeten mesures molt precises de distàncies no excessivament llargues (de l'ordre del centímetre fins a distàncies de 20 metres) i amb condicions de poca visibilitat.

termistor *m* Sensor de temperatura de tipus resistiu. Se'n distingeixen dos tipus: els NTC (*negative temperature coefficient*), que es caracteritzen perquè tenen un coeficient de temperatura negatiu, és a dir, la seva resistència disminueix en augmentar la temperatura, i els PTC (*positive temperature coefficient*), que es caracteritzen perquè tenen un coeficient de temperatura positiu, és a dir, la seva resistència augmenta en augmentar la temperatura.

termoparell *m* Sensor de temperatura constituït per dos metalls diferents. Produeix una tensió proporcional a la diferència de temperatures entre els punts d'unió d'ambdós metalls. Els termoparells són utilitzats com a sensors de temperatura en sectors tan diversos com ara l'automoció, la indústria aeroespacial, la biotecnologia o l'electrònica.

termopila *f* Agrupació de desenes de termoparells connectats en sèrie per augmentar la sensibilitat de tot el conjunt i poder mesurar la temperatura d'un objecte.

transformador lineal variable diferencial *m* Sensor electrònic basat en efectes electromagnètics utilitzat per a mesurar desplaçaments. Presenta unes bones característiques de linealitat, sensibilitat, ràpida resposta i gran resolució.
sigla LVDT

Bibliografia

Dunn, W. C. (2005). *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. Nova York: McGraw-Hill.

Fischer-Cripps, T. (2002). "Transducers – Temperature". A: *Newnes interfacing companion: Computers, transducers, instrumentation and signal processing* (part 1, punt 1.2). Oxford: Newnes, Elsevier Science.

Luecke, J. (2004). "Sensors". A: *Analog and digital circuits for electronic control system applications: Using the TI MSP430 microcontroller* (cap. 3). Oxford: Newnes, Elsevier.

McMillan, G. K.; Considine, D. M. (1999). "Process variables-Field instrumentation." A: *Process/industrial instruments and controls handbook* (secció 4). Nova York: McGraw-Hill.

Park, J.; Mackay, S. (2003). "Analog and digital signals". A: *Practical data acquisition for instrumentation and control systems* (cap. 2). Oxford: Newnes, Elsevier.

US Department of Energy (2010). *DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and Control: Volumes 1 and 2*.

Webster, J. G. (1999). "Spatial Variables Measurement". A: *Measurement, instrumentation and sensors handbook CRCnetBASE 1999* (secció II). Boca Raton, FL.: CRC Press.

Wilson, J. (2004). *Sensor technology handbook*. Oxford: Newnes, Elsevier.

