

L'ITS-27 fu parzialmente aggiornata nel 1948 e maggiormente nel 1968, con l'adozione della Scala Pratica Internazionale delle Temperature o IPTS-68 (International Practical Temperature Scale). L'anno 1975 vide un riallineamento con la temperatura termodinamica attraverso alcuni cambiamenti numerici, mentre nel 1976 fu introdotta una scala provvisoria delle temperature (Echelle provisoire de température) da 0,5 a 30 K, denominata EPT-76.

La scala attuale, l'ITS-90 è stata adottata il 1 gennaio 1990. Come sensore di riferimento la termocoppia al platino-rodio (tipo S) è stata sostituita con una più precisa termoresistenza. Le termocoppie di tipo S e le varianti al platino-rodio di tipo R e B sono ora utilizzate soltanto come campioni secondari.

STATI DI EQUILIBRIO	t_{90} [K]	t_{90} [°C]
Punto triplo dell'idrogeno	13,8033	-259,3467
Punto di ebollizione dell'idrogeno alla pressione di 33321,3 Pa	17,035	-256,115
Punto di ebollizione dell'idrogeno alla pressione di 101292 Pa	20,27	-252,88
Punto triplo del neon	24,5561	-248,5939
Punto triplo dell'ossigeno	54,3584	-218,7916
Punto triplo dell'argon	83,8058	-189,3442
Punto triplo del mercurio	234,3156	-38,8344
Punto triplo dell'acqua	273,16	0,01
Punto di fusione del gallio	302,9146	29,7646
Punto di fusione dell'iridio	429,7485	156,5985
Punto di fusione dello stagno	505,078	231,928
Punto di fusione dello zinco	692,677	419,527
Punto di fusione dell'alluminio	933,473	660,323
Punto di fusione dell'argento	1234,93	961,78
Punto di fusione dell'oro	1337,33	1064,18
Punto di fusione del rame	1357,77	1084,62

Tabella 1.1: I punti fissi adottati nella scala di temperatura ITS-90

In pratica, l'estensione delle temperature coperta dai termometri con resistenza al platino fu estesa verso l'alto fino al punto di fusione dell'argento (961,78°C) per evitare alcune anomalie derivanti dall'uso delle termocoppie Pt-10%Rh e Pt al disopra di 630°C (vedi figura 1.1). Si superarono così gli errori di interpolazione che si verificavano con la scala IPTS-68, e la discontinuità della derivata prima, a quelle temperature. In altre parole, per gli standards dei nostri giorni, una semplice termocoppia non è considerata sufficientemente ripetitiva per essere usata come strumento di definizione, poiché la sua precisione è al massimo di $\pm 0,2^\circ\text{C}$. I termometri con resistenza al platino, invece, possono essere più precisi di un ordine di grandezza in più.

Altri cambiamenti riguardarono l'adozione di valori più precisi per i punti fissi; la revisione dei primi punti fissi con l'esclusione dei punti di ebollizione del neon, dell'ossigeno e dell'acqua; l'estensione della scala verso temperature molto basse (fino a 0,65 K) e la revisione delle formule di interpolazione della temperatura tra i punti fissi.

Inoltre, furono introdotti dei sotto-intervalli per permettere di calibrare termometri con resistenza al platino su una parte ridotta della scala, in modo da potere effettuare tarature soddisfacenti anche senza sottoporre inutilmente lo strumento di misura alle temperature estreme.

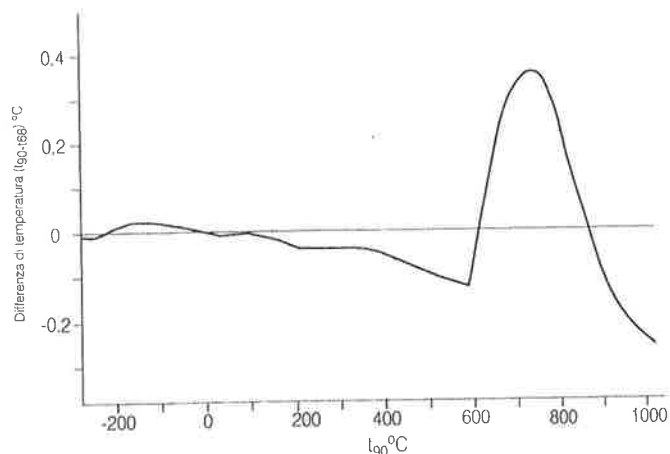


Figura 1.1: Differenze tra le scale ITS-90 e IPTS-68

Oggi, la scala ITS-90 definisce una scala di temperature suddivisa in cinque sotto-intervalli che si sovrappongono in parte. I cinque sotto-intervalli sono i seguenti: il primo da 0,65 a 5 K utilizza la tensione di vapore dell'elio; il secondo da 3 a 24,5561 K utilizza un termometro a interpolazione con gas a volume costante; da 13,8033 a 273,16 K (pari a 0,01°C) si utilizzano termometri con resistenza al platino qualificati precalibrati a diversi punti tripli. Quindi da 0 a 961,78°C si utilizzano di nuovo termoresistenze tarate a punti fissi di fusione e congelamento. Infine, sopra il punto di fusione dell'argento, si ricorre alla legge di Planck sulla radiazione.

La ITS-90 segnò il culmine di un sforzo enorme, teorico e pratico, presso il National Physical Laboratory e in altri laboratori. Questa scala non è considerata perfetta ma è un'approssimazione abbastanza vicina al mondo reale della temperatura termodinamica e può resistere per almeno altri 20 anni.

L'obiettivo di una scala internazionale della temperatura è di fornire una definizione esatta dello stato fisico, misurabile e rilevabile in modo continuo, che chiamiamo temperatura. Si tratta di un obiettivo fondamentale per gli accademici e gli scienziati, ma lo è molto meno per i tecnici operativi. In tutti i casi, l'importanza della ITS-90 sulla termometria non va sottovalutata.

2.0 TERMOCOPPIE: GENERALITÀ

Se un conduttore elettrico è soggetto ad un gradiente termico, un flusso di energia (calore) si associa al flusso di elettroni lungo il conduttore e genera una forza elettromotrice (f.e.m.). Il valore e la direzione della f.e.m. prodotta dipendono dal valore e dalla direzione del gradiente di temperatura e dal materiale del conduttore. La tensione è funzione della differenza di temperatura agli estremi del conduttore. Questo fenomeno fu scoperto da T.J. Seebeck nel 1822.

La tensione che risulta alle estremità del conduttore è la somma di tutte le f.e.m. generate al suo interno. Perciò, a parità di differenza complessiva di temperatura $T_1 - T_2$ pur essendo possibili differenti distribuzioni del gradiente lungo il conduttore, tutte generano la stessa tensione totale E (fig. 2.1 a,b,c) ipotizzando che il conduttore abbia caratteristiche termoelettriche uniformi lungo tutta la sua lunghezza.

La tensione in uscita da un singolo conduttore non è normalmente rilevabile perché la somma di tutte le f.e.m. interne lungo un circuito chiuso è pari a zero, a qualsiasi temperatura. Perciò nei normali

termometri a termocoppia, si uniscono tra di loro due materiali aventi diverse caratteristiche f.e.m. termoelettriche/temperatura per produrre un flusso netto di elettroni utilizzabile e una tensione in uscita rilevabile.

In altre parole, due conduttori di materiale diverso A e B collegati insieme, esposti agli stessi gradienti di temperatura rappresentati nella figura 2.1 generano alle loro estremità uscite come quelle rappresentate nella figura 2.2. Attraverso la giunzione si forma un flusso netto di elettroni dovuto alle diverse f.e.m., che a loro volta dipendono dall'interazione del gradiente con i due diversi conduttori. Da qui il termine di "termocoppia".

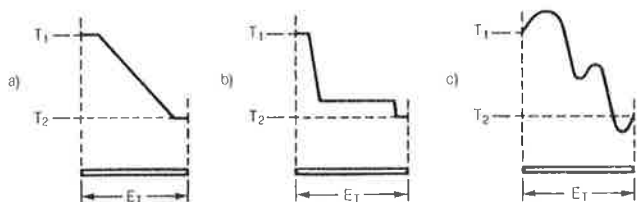


Figura 2.1 a,b,c: Distribuzioni diverse del gradiente di temperatura danno origine alla stessa f.e.m.

Va osservato che la f.e.m. termoelettrica si genera nella zona del gradiente termico, non nella giunzione. Questo è un punto importante da capire perché ne derivano conseguenze pratiche nella termometria effettuata tramite termocoppie: per esempio assicurarsi che i conduttori della termocoppia siano fisicamente e chimicamente omogenei se immersi in un gradiente termico. Inoltre, le giunzioni stesse devono trovarsi in una zona isoteramica. Se una di queste condizioni non è soddisfatta, possono sorgere f.e.m. parassite.

Per inciso, un numero qualsiasi di conduttori può essere aggiunto in un circuito termoelettrico senza alterare l'uscita, purché le due estremità si trovino alla stessa temperatura e che sia garantita l'omogeneità. Questo ci porta al concetto dei cavi di estensione e di compensazione, che consentono di prolungare le lunghezze dei conduttori contenuti nelle sonde. (Vedi parte 2, sez. 3)

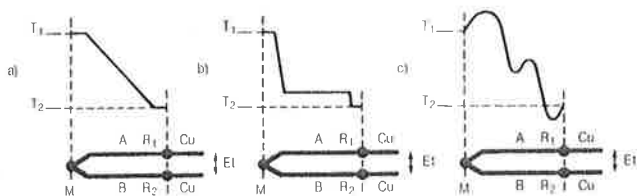


Figura 2.2 a,b,c: F.e.m. termoelettriche generate da gradienti di temperatura

Ritornando alla figura 2.2, si vede che la f.e.m. in uscita E_t è la stessa per qualsiasi distribuzione del gradiente termico a parità di differenza di temperatura $T_1 - T_2$, nell'ipotesi che i conduttori abbiano caratteristiche termoelettriche uniformi lungo tutta la loro lunghezza. Poiché le giunzioni M, R1 e R2 rappresentano le estremità dei conduttori che generano la f.e.m., se i conduttori che collegano lo strumento di misura sono in filo di rame uniforme, l'uscita dalla termocoppia è effettivamente unicamente funzione delle temperature in corrispondenza delle due giunzioni principali. E questo costituisce nella sua essenza la base della termometria con termocoppie.

Le giunzioni rilevanti prendono il nome di giunzione di misura o giunto caldo (M) da una parte, mentre le giunzioni dei conduttori di materiali diversi con i prolungamenti in rame (normalmente due giunzioni) sono chiamati giunto di riferimento o giunto freddo (R nella figura 2.2). Se il

giunto di riferimento R è mantenuto ad una temperatura nota e costante, la temperatura del giunto di misura M può essere dedotta dalla tensione in uscita dalla termocoppia. Le termocoppie possono pertanto essere considerate come apparecchi di misura della temperatura differenziali, piuttosto che sensori di temperatura assoluta.

Riassumendo, ci sono quattro punti importanti da ricordare. Il primo è che le termocoppie generano un segnale in uscita solo quando si trovano all'interno di una zona con un gradiente di temperatura, non al di là. Il secondo è che l'accuratezza e la stabilità si possono ottenere soltanto se le caratteristiche termoelettriche dei conduttori della termocoppia sono uniformi su tutta la lunghezza. Il terzo è che solo un circuito formato da materiali diversi, all'interno di un gradiente termico, genera un segnale in uscita. Infine nonostante gli effetti termoelettrici siano rilevati in corrispondenza delle giunzioni, essi non sono dovuti ad una particolare proprietà delle giunzioni.

2.1 TABELLE DI TARATURA

Un altro punto molto importante da considerare è che la sensibilità termoelettrica della maggior parte dei materiali, oltre un dato intervallo di temperatura, non è lineare. Nel mondo non tutto è perfetto, e la termometria con termocoppie non è diversa dal resto. Perciò, la tensione in uscita, pur dipendendo dalla temperatura, non è una sua funzione lineare. Non potendo perciò effettuare una lettura diretta della tensione, si rende necessaria un'interpolazione, a meno che si consideri un intervallo di temperatura molto ridotto e non si pretenda un'elevatissima precisione.

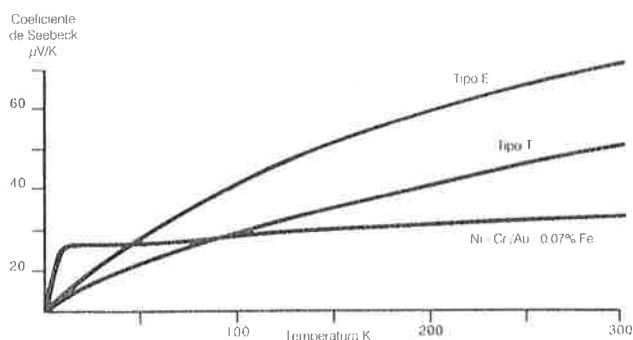


Figura 2.3: Coefficienti di Seebeck per termocoppie di tipo E, T e Nichel Cromo/Au-0,07%Fe

A questo scopo esistono tabelle di taratura che mettono in relazione il valore della f.e.m. con la temperatura nel giunto di misura, per ciascun tipo di termocoppia (Parte 1, sez. 3).

In tutta la termometria effettuata tramite termocoppie si deve chiaramente fare riferimento a queste tabelle per collegare la tensione dei segnali di uscita dei sensori alla corrispondente temperatura.

2.2 COMPENSAZIONE DEL GIUNTO FREDDO

È anche importantissimo sapere che a parità di differenza di temperatura tra il giunto di misura e quello di riferimento potrebbero esserci tensioni diverse in uscita: questo avviene se varia la temperatura del giunto di riferimento. Perciò, le tabelle di taratura sopra descritte si riferiscono sempre espressamente alla temperatura di 0°C in corrispondenza del giunto di riferimento.

Questa condizione si può realizzare praticamente immergendo i giunti di rame nel ghiaccio fondente, protetti da tubi di vetro isolati o in una



camera a temperatura controllata (come un contenitore isotermico con adeguati sensori di temperatura). Oggigiorno, tuttavia, e per misurazioni industriali, questa situazione è normalmente simulata tramite correzioni elettroniche della temperatura; tramite la linearizzazione elettronica (generalmente digitale) che ricorre a tecniche di adattamento di curve, si cerca poi di compensare le mancanze intrinseche di linearità. Ulteriori dettagli si trovano nella Parte 1 sez. 5.

Concettualmente, le variazioni di temperatura che interessano il giunto di riferimento sono rilevate da un dispositivo come un termistore, posto il più vicino possibile al giunto di riferimento stesso. Si induce una f.e.m. che varia con la temperatura, tale da compensare le variazioni di temperatura che si verificano alle terminazioni di riferimento.

2.3 MATERIALI PER TERMOCOPPIE

Quasi tutti i materiali conduttori possono produrre un segnale termoelettrico. Ma non appena si prendono in considerazione fattori come l'ampiezza dell'intervallo di temperatura, la qualità del segnale in uscita, linearità e ripetibilità (cioè la relazione tra il segnale in uscita e la temperatura), la scelta si riduce sensibilmente. La selezione di materiali adeguati è stata oggetto di molti studi per varie decine di anni da parte dei fornitori e dei principali laboratori di taratura e certificazione e delle università. Così, l'intervallo di temperature coperto oggi tra metalli e leghe adatte, sotto forma di filo o di sensore, si estende complessivamente da -270°C a 2600°C.

Naturalmente, non tutto l'intervallo può essere coperto con un solo tipo di termocoppia. Sono stati riconosciuti e designati diversi tipi a livello internazionale, ciascuno con i propri vantaggi. Le norme internazionali IEC 60584 (International Electrotechnical Commission) si riferiscono a termocoppie standardizzate e le identificano con una lettera, sistema che era stato proposto inizialmente dalla Instrument Society of America (vedi Parte 1, sez. 3).

Le termocoppie possono essere ripartite in due categorie principali: quelle a base di metalli preziosi (principalmente platino con platino-rodio) e quelle con metalli comuni, come nichel-cromo con nichel-alluminio, o ferro con rame-nichel (costantana). Le termocoppie a base di platino tendono ad essere le più stabili, ma sono anche le più costose. Il loro intervallo utile di utilizzo si estende dalla temperatura ambiente a circa 2000°C ma può essere molto più esteso limitatamente a brevi esposizioni (da -270°C a 3000°C). L'intervallo di funzionamento delle termocoppie con metalli comuni è più ridotto, in genere da 0°C a 1200°C, ma anche in questo caso può essere maggiore per un uso non prolungato. I segnali che si ottengono con i metalli preziosi sono però più deboli di quelli ottenuti con i metalli comuni.

Un altro aspetto riguarda l'instabilità termoelettrica intrinseca delle termocoppie di metallo comune più diffuse, quelle di tipo K, sia in funzione del tempo che della temperatura, benché anche i tipi E, J e T non siano esenti da critiche (vedi Parte 1, sez. 3). Da qui l'interesse per le termocoppie di tipo N (Nicrosil con Nisil), che si propongono di abbinare le migliori caratteristiche dei metalli preziosi al minore prezzo dei metalli comuni, con i livelli di segnale dei metalli comuni, ma con un intervallo di funzionamento leggermente più esteso.

2.4 IL TIPO N

Nelle termocoppie, le instabilità possono manifestarsi in varie forme. La prima consiste in una deriva nel lungo termine, in seguito all'esposizione a temperature elevate. È dovuta principalmente a cambiamenti di composizione causati dall'ossidazione o al bombardamento di neutroni nelle applicazioni nucleari. Nel primo caso, al disopra degli 800°C nell'aria gli effetti dell'ossidazione sulle termocoppie di tipo K possono causare alterazioni nell'omogeneità dei conduttori e generare errori di vari punti percentuali. E quando i sensori sono montati all'interno di guaine con una limitata quantità di aria, si può produrre una particolare forma di deterioramento (chiamata "green rot"), dovuta all'ossidazione preferenziale del contenuto di cromo. Nel caso di bombardamento nucleare si pone il problema della trasmutazione, con effetti simili.

In secondo luogo, si verificano cambiamenti ciclici di breve termine delle f.e.m. termiche (isteresi) dovuti ai successivi riscaldamenti e raffreddamenti delle termocoppie a metallo comune, specialmente (e di nuovo) per il tipo K nell'intervallo da 250°C a 600°C, dovuti a disomogeneità magnetiche e strutturali. Errori di 5°C e più sono comuni in questo intervallo di temperature, con picchi nell'intorno dei 400°C.

In terzo luogo, con termocoppie a isolamento minerale (vedi Parte 2, sez. 2.3) possono prodursi variazioni di f.e.m. in funzione del tempo, dovute a effetti magnetici e dipendenti dalla composizione, in livelli di temperatura che dipendono dai materiali stessi. Questo è dovuto essenzialmente alla trasmutazione di elementi ad elevata tensione del vapore (principalmente manganese ed alluminio) dal conduttore K negativo attraverso l'isolante di ossido di magnesio fino al conduttore K positivo. Anche in questo caso, le variazioni nella composizione danno origine ad una f.e.m. termica di deriva.

Con il tipo N si evitano o riducono notevolmente queste instabilità grazie alla struttura più regolare delle leghe progettate per i materiali di queste termocoppie. I miglioramenti sono nel fattore tempo, nel ciclo d'isteresi termica, negli effetti magnetici e nucleari.

Infatti, la resistenza all'ossidazione è superiore grazie alla combinazione ad un più alto livello tra cromo e silicio nel conduttore NP (Nicrosil), e ad un più alto livello tra silicio e magnesio nel conduttore NN (Nisil): si forma così una barriera alla diffusione e si migliora la resistenza alla deriva nel lungo termine. Inoltre, l'assenza di manganese, alluminio e rame nel conduttore NN aumenta la stabilità del tipo N nei confronti dei suoi rivali a metalli comuni nelle applicazioni nucleari.

Per quanto riguarda il problema della trasmutazione nelle termocoppie a isolamento minerale, anche questo problema è virtualmente eliminato perché entrambi i conduttori di tipo N contengono solo tracce di manganese e alluminio. Infine, anche le instabilità dovute a isteresi termica sono estremamente ridotte grazie all'elevato contenuto di cromo (nel conduttore NP) e di silicio (nel conduttore NN). Di fatto, l'ampiezza del ciclo è compresa tra 200°C e 1000°C con una punta vicino ai 750°C, e si riscontrano escursioni massime tra 2°C e 3°C.

2.5 CRITERI DI SCELTA DI UNA TERMOCOPPIA

Per orientarsi nella scelta del tipo di termocoppia più adatto alle proprie esigenze, si devono prendere in considerazione diversi fattori: le condizioni dell'ambiente circostante, la durata dell'esposizione, la durata attesa della vita della sonda e il livello di accuratezza richiesto. Inoltre, per le termocoppie con metalli comuni, si aggiungono fattori di sensibilità e di compatibilità con gli strumenti di misura preesistenti. Ulteriori dettagli sui tipi e criteri di selezione sono riportati più avanti nella Parte 1 sez. 3 e nella Parte 3 sez. 1.

3.0 TERMOCOPPIE: TIPI, MATERIALI, APPLICAZIONI

Sono state sperimentate numerose coppie di materiali per produrre termocoppie accettabili, ciascuna con un proprio particolare campo di applicazione. Ma il vantaggio di avere componenti intercambiabili e l'economia derivante dalla produzione di massa hanno portato ad una standardizzazione di un numero ridotto di tipi, oggi facilmente disponibili sul mercato e in grado di coprire di gran lunga la maggior parte delle esigenze, sia come temperature che come condizioni ambientali.

Queste termocoppie sono costruite conformemente alla relazione f.e.m. / temperatura specificata in forma di tabelle già richiamate, con i valori della f.e.m. (espressi in μV) in funzione della temperatura (in $^{\circ}\text{C}$) e viceversa. Queste tabelle di riferimento sono pubblicate nella IEC 60584 Parte1.

È interessante osservare che queste norme non affrontano aspetti relativi alla fabbricazione, all'isolamento dei cavi, o ad altri criteri di rendimento. Con tutte le diversità che ne conseguono, occorre basarsi per questi aspetti sugli standard dei produttori.

Le norme definiscono gli otto tipi maggiormente utilizzati di termocoppie, riferendosi ad essi con la loro denominazione fatta di un carattere alfabetico riconosciuta a livello internazionale e fornendo le tabelle di riferimento di ciascuno di essi. Queste tabelle sono state riportate nel Compendio.

È utile dare un'occhiata a ciascuna di esse, esaminando valori, proprietà e ambito di applicazione. Si ricorda che il conduttore positivo è sempre indicato per primo. La temperatura massima di esercizio indicata, in particolare per le termocoppie con materiali comuni, non va presa come limite assoluto. Nelle applicazioni reali, va commisurata al diametro dei conduttori, alle condizioni ambientali e alle necessità di durata della termocoppia.

A titolo di promemoria, si riportano nelle tabelle 3.1 e 3.2 i materiali utilizzati e i limiti di temperatura per ciascun tipo di termocoppia. La prima tabella si riferisce a termocoppie di metalli preziosi (a base di platino), la seconda a termocoppie di metalli comuni.

Tipo (denominazione Internazionale)	Materiale dei conduttori	Intervallo di lavoro
R	Pt-13%Rh (+)	da 0 a +1600°C
	Pt (-)	
S	Pt-10%Rh (+)	da 0 a +1500°C
	Pt (-)	
B	Pt-30%Rh (+)	da +100 a +1600°C
	Pt-6%Rh (-)	

Tabella 3.1: Termocoppie a base di platino di normale utilizzo

Tipo (denominazione Internazionale)	Materiale dei conduttori	Intervallo di lavoro
K	Ni-Cr (+)	da 0 a +1100°C
	Ni-Al (-)	
T	Cu (+)	da -185 a +300°C
	Cu-Ni (-)	
J	Fe (+)	da +20 a +700°C
	Cu-Ni (-)	
E	Ni-Cr (+)	da 0 a +800°C
	Cu-Ni (-)	
N	Ni-Cr-Si (+)	da 0 a +1250°C
	Ni-Si (-)	

Tabella 3.2: Termocoppie di metalli comuni di normale utilizzo

3.1 TIPO S - PLATINO-10%RODIO E PLATINO (IEC 60584-1:1995 PARTE 1)

Questo tipo di termocoppia si può utilizzare in ambienti ossidanti o inerti fino a 1600°C in modo continuo, e fino a 1700°C per brevi esposizioni. Per impieghi nella fascia alta delle temperature, si utilizzano isolanti e guaine in allumina ricristallizzata ad elevata purezza. In tutte le applicazioni, tranne quelle in condizioni di elevatissima pulizia, l'elemento deve essere protetto con una guaina ceramica affinché piccole quantità di vapore metallico non provochino il deterioramento e perciò la riduzione della f.e.m. prodotta.

L'uso continuo ad elevata temperatura può causare deterioramento. Potrebbe infatti verificarsi una diffusione di rodio nel conduttore in platino puro, con conseguente riduzione anche in questo caso del segnale di uscita.

3.2 TIPO R - PLATINO-13%RODIO E PLATINO (IEC 60584-1:1995 PARTE 2)

Questo tipo di termocoppia è simile al precedente tipo S ma ha il vantaggio di avere un segnale di uscita leggermente più forte e migliore stabilità. In genere, le termocoppie di tipo R sono preferite a quelle del tipo S per applicazioni in gran parte identiche.

3.3 TIPO J - FERRO E RAME-NICKEL (IEC 60584-1:1995 PARTE 3)

Comunemente chiamato ferro/costantana, questo tipo di termocoppia è uno dei pochi che si possono utilizzare in modo sicuro negli ambienti riducenti. In ambienti ossidanti sopra 550°C si degrada velocemente. La temperatura massima di utilizzo continuo è di circa 800°C, anche se per brevi esposizioni si possono raggiungere fino a 1000°C. La temperatura minima è di -210°C, ma sotto la temperatura ambiente bisogna fare attenzione alla condensa: si potrebbe formare ruggine sul conduttore in ferro, e potrebbe esserci fragilità alle basse temperature.

3.4 TIPO K - NICKEL-CROMO E NICKEL-ALLUMINIO (IEC 60584-1:1995 PARTE 4)

Generalmente chiamato Chromel-Alumel, questo tipo di termocoppia è tuttora quello più diffuso in campo industriale. Si presta principalmente agli ambienti ossidanti. In tutti gli altri ambienti, il sensore va protetto con molta cura! Il limite massimo di temperatura con uso continuativo è di circa 1100°C, anche se da 800°C l'ossidazione è causa progressiva di deriva termica e perdita di taratura. Per brevi esposizioni, si può comunque arrivare a 1200°C. L'elemento è adatto per applicazioni criogeniche fino a -250°C.

Il tipo K, benché largamente adoperato per via del suo ampio intervallo di funzionamento e del suo basso costo, non è così stabile come altri sensori a metalli comuni di uso corrente. A temperature comprese tra 250°C e 600°C, e in particolare a 300°C e 550°C, l'isteresi termica può provocare errori di diversi gradi.

Infine, benché il tipo K sia molto adoperato nelle applicazioni nucleari per via della sua relativa resistenza alle radiazioni, il tipo N rappresenta oggi una scelta migliore.