

I VUOTOMETRI

dr. JORIS CINQUETTI

**L'UNITÀ DI MISURA DEL VUOTO
GENERALITÀ SUI MISURATORI DELLE BASSE PRESSIONI
MANOVACUOMETRI
SENSORI CAPACITIVI
SENSORI PIEZORESISTIVI
MCLEOD
SENSORI PIRANI
SENSORI A TERMOCOPPIA
SENSORI PENNING
SENSORI AD IONIZZAZIONE
SPINNING ROTORS
SENSORI ATTIVI, SENSORI PASSIVI E WIDE RANGE
IL MONTAGGIO DEI SENSORI PER BASSE PRESSIONI
LA TARATURA DEI SENSORI PER BASSE PRESSIONI**

Il “vuoto” generato ogni giorno nelle varie tecnologie utilizzanti le basse pressioni s'estende dalla pressione atmosferica (10^{+3} mbar) fino a 10^{-11} mbar, ma in alcuni laboratori di ricerca si dichiara di raggiungere, con serie difficoltà di misura, 10^{-14} mbar. La misura del “vuoto” deve quindi coprire almeno quattordici ordini di grandezza. Allo stato attuale non esiste un sensore in grado di misurare il vuoto in tutto l'intervallo di pressione sopra considerato, e sembra che non ne esisterà mai uno, dato che non si conosce ancora un singolo effetto fisico che valga per tutto il campo conosciuto delle basse pressioni.

Gli strumenti che misurano le basse pressioni sono chiamati “**misuratori di vuoto**” o “**vacuometri**”. Spesso sono identificati con il nome dell'inventore o con quello della casa costruttrice che per prima ha messo a punto il sensore. Le società che costruiscono apparecchiature per misurare il vuoto offrono una gamma di strumenti, rispondenti a principi fisici differenti, che in genere operano in poche decadi e che sono abbinati ai diversi “tipi di vuoto” che debbono misurare. Questo volumetto non intende esaurire la strumentazione per misurare il vuoto, ne intende essere un trattato di tecnologia del vuoto; semplicemente vuole presentare in una forma agevole agli utilizzatori del vuoto i vuotometri comunemente reperibili sul mercato con l'ambizione d'aiutarli a scegliere correttamente il sensore più adatto al loro utilizzo.

L'UNITÀ DI MISURA DEL VUOTO

Per vuoto s'intende tutto l'intervallo di pressione che da zero arriva all'atmosfera.

L'unità di misura del vuoto coincide con quello della pressione e quindi, coerentemente al Sistema Internazionale (S.I.), è il **Pascal (Pa)**. Un Pascal corrisponde ad un Newton al metro-quadro.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Data la sua praticità, molto comune è l'ettopascal o **millibar**, che corrisponde circa ad un millesimo d'atmosfera.

Ancora molto usati, ma non più accettabili perché non coerenti con il sistema S.I., sono il **torr**, il **micron** ed i **metri di colonna d'acqua**.

La misura del vuoto è da considerarsi **sempre** assoluta e qualora ci si riferisca all'atmosfera bisogna espressamente dichiararlo. Espressioni del tipo "un vuoto di 300 mbar" **devono significare** che la pressione residua è di 300 mbar e non che si è vuotato un recipiente di 300 mbar perciò la pressione residua è di 700 mbar.

La tabella 1 riporta i fattori di conversione tra le principali unità di misura delle pressioni. La pressione esercitata da un gas dipende dalla temperatura. I fattori di conversione della tabella sono validi per una temperatura di 0°C.

	Pa	mbar	torr mm Hg	Lusec	Kgf/cm ²	atm.	mm H ₂ O	inch Hg
1 Pa	1	0,01	$7,5 \cdot 10^{-3}$	7,5	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	0,1	$0,29 \cdot 10^{-6}$
1 mbar	100	1	0,75	750		$9,87 \cdot 10^{-4}$	10	
1 torr 1mm Hg	133	1,33	1	1000	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	13,3	$3,49 \cdot 10^{-2}$
1 lusec	0,133	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	1	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,49 \cdot 10^{-5}$
1Kgf/cm ²	$98,1 \cdot 10^3$	981	736	$7,36 \cdot 10^5$	1	0,968	$7,36 \cdot 10^3$	29
1 ATM	$1,013 \cdot 10^5$	1013	760	$7,6 \cdot 10^5$	1,033	1	$1 \cdot 10^4$	29,92
1mm H ₂ O	10	0,1	$7,5 \cdot 10^{-2}$	75	$10,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$0,29 \cdot 10^{-6}$
1inch Hg	$3,39 \cdot 10^3$	33,863	25,4	$2,54 \cdot 10^4$	$34,5 \cdot 10^{-3}$	$33,4 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^2$	1

Tabella 1: - Fattori di conversione delle principali unità di pressione

GENERALITÀ SUI MISURATORI DELLE BASSE PRESSIONI

I misuratori di basse pressioni si dividono in due classi: **vacuometri diretti** (impropriamente chiamati assoluti) e **vacuometri indiretti**.

I **misuratori diretti** sono vacuometri che misurano direttamente la “forza su unità di superficie” generata da un flusso incidente, e forniscono un valore di pressione che è indipendente dalla natura del gas di cui si vuole conoscere la pressione.

I **misuratori indiretti** di pressione non misurano la pressione, ma ne ottengono il valore derivandolo, con una legge fisica, dalla misura di una specifica proprietà dei gas che varia in modo conosciuto con la densità del gas come la viscosità, la conducibilità termica o la probabilità di ionizzazione. Queste proprietà dipendono, tra l'altro, dalla massa molecolare e dalla pressione. Il valore della pressione dipende quindi dal tipo di gas considerato. I vacuometri sono tarati per specifici gas e la scala del lettore è data normalmente per aria o per azoto. Per letture accurate bisogna conoscere la composizione del gas di cui si vuole conoscere la pressione, in pratica questo è possibile solo con una certa approssimazione.

Oltre ai vacuometri diretti ed indiretti, che sono misuratori di pressione totale o che comunque forniscono un'indicazione rapportabile alla pressione totale, cioè la pressione esercitata contemporaneamente da tutte le specie di gas presenti, esistono misuratori capaci di misurare le **pressioni parziali** delle singole specie gassose che contribuiscono a generare la pressione totale.

La scelta di un vacuometro viene fatta in relazione agli intervalli di vuoto che si pensa di coprire. Se si opera in alto od in ultra alto vuoto si utilizzano due o più vacuometri.

I vacuometri, come in generale i misuratori di altre grandezze, possono essere suddivisi in base all'effetto fisico cui rispondono che è riconducibile al tipo di energia che è necessario fornire dall'esterno per l'effettuazione stessa della misura.

I misuratori di basse pressioni sono suddivisibili in diverse famiglie; riferendosi alla norma ISO 3529 esse sono:

Vacuometri di tipo meccanico

In essi viene fornita energia meccanica, che può essere la forza esercitata, a causa dell'agitazione termica, su una superficie dallo stesso gas del quale si vuole misurare la pressione o da una sorgente esterna, sotto forma di lavoro meccanico addizionale (vacuometri a compressione).

Appartengono a questa famiglia di vacuometri, tra gli altri: manovacuumetri ad ago, vacuometri di Bourdon, tubi ad U, manovacuumetri a capsula, manovacuumetri piezoresistivi (strain gauges), membrane capacitive, McLeod, Kammerer.

Vacuometri che utilizzano fenomeni di trasporto del gas

In questi vacuometri l'energia fornita è trasformata in calore (**vacuometri a conducibilità termica**) o si calcola la densità delle molecole interagenti con un corpo in movimento (**vacuometri a viscosità**)

Appartengono a questa famiglia di vacuometri, tra gli altri: vacuometri Pirani, vacuometri a termocoppia, spinning-rotors.

Vacuometri a ionizzazione

In questi vacuometri l'energia fornita viene utilizzata per ionizzare il gas e viene misurata la corrente ionica. La probabilità di ionizzazione dipende dal tipo di gas.

Appartengono a questa famiglia di vacuometri, tra gli altri: tubi a scarica, vacuometri Penning, vacuometri a ionizzazione convenzionali- triodi, vacuometri a ionizzazione Baiard-Alpert, vacuometri a ionizzazione Baiard-Alpert con modulatore (Redhead), vacuometri magnetron, vacuometri ad estrazione di elettroni.

(mbar)

10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ⁺²	10 ⁺³
← MANOMETRI AD U →													
						← MC LEOD →							
										← BOURDON →			
												← STRAIN GAUGE →	
				← MEMBRANE CAPACITIVE →									
						← PIRANI →							
							← TERMOCOPPIE →						
			← SPINNING ROTOR →										
		← PENNING →											
				← CATODO CALDO TRIODO →									
← IONIZZAZIONE BAIARD-ALPERT →													
ULTRA-ALTO VUOTO			ALTO VUOTO				MEDIO VUOTO			BASSO VUOTO			

Tabella 2: - Intervalli di vuoto generalmente coperti dai comuni sensori da vuoto

MANOVACUOMETRI (VACUOMETRI AD AGO)

- **Famiglia: sensori meccanici.**
- **Intervallo di misura: 1000 mbar - 1 mbar**
- **Si trovano facilmente manovacuumetri dalla seguenti scale: 1000 -1 mbar, 100-1 mbar, 50 -1 mbar, 25 -1 mbar.**
- **Accuratezza: tipicamente $\pm 5\%$ fondo scala negli strumenti barometricamente compensati**
- **Accuratezza: tipicamente $\pm 10\%$ fondo scala negli strumenti non barometricamente compensati**

Un elemento elastico a parete sottile viene sottoposto a pressioni differenti tra la sua parte esterna e la sua parte interna. La variazione della forma dell'elemento elastico al variare della pressione differenziale a cui è sottoposto, viene trasmesso da un appropriato meccanismo e convertito nel movimento di un ago sovrapposto ad una scala calibrata. I sensori più precisi sono barometricamente compensati in modo che la pressione atmosferica non influenzi la lettura. In pratica la pressione indicata è la differenza tra la pressione misurata ed una pressione di riferimento sigillata all'interno del sensore stesso. Sensori capaci di operare a pressioni inferiori ad 1 mbar esistono ma sono di difficile reperibilità poiché al di sotto di questo valore l'energia disponibile per produrre deformazioni è così ridotta che il meccanismo di trasduzione del segnale diventa estremamente delicato e costoso. Nel tempo l'elasticità dell'elemento sensibile si modifica ed il sensore non è più in grado di operare in modo corretto.

VACUOMETRO DI BOURDON

Un'estremità di un tubo semicircolare, l'elemento sensibile, è collegato al sistema da vuoto. Quando il tubo viene messo in vuoto, la pressione esterna flette il tubo proporzionalmente al valore della pressione da misurare. Un sistema integrato di leve ed ingranaggi con un indicatore evidenzia la variazione di curvatura. La scala è lineare e la lettura della pressione viene influenzata dal valore dell'atmosfera.

VACUOMETRI A DIAFRAMMA

Il vacuometro consiste di una capsula sigillata con un vuoto interno migliore di 10^{-3} mbar, posta in un contenitore a tenuta che viene collegato al sistema da vuotare. Al diminuire della pressione, il diaframma della capsula tende ad espandersi. Un opportuno meccanismo converte l'elongazione in un movimento dell'ago su una scala graduata.

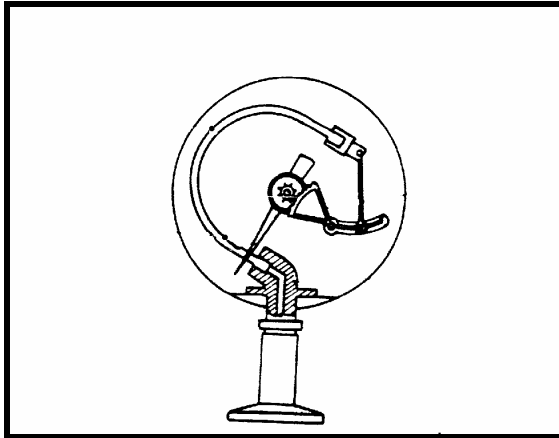


Fig. 1 Vacuometro di Bourdon

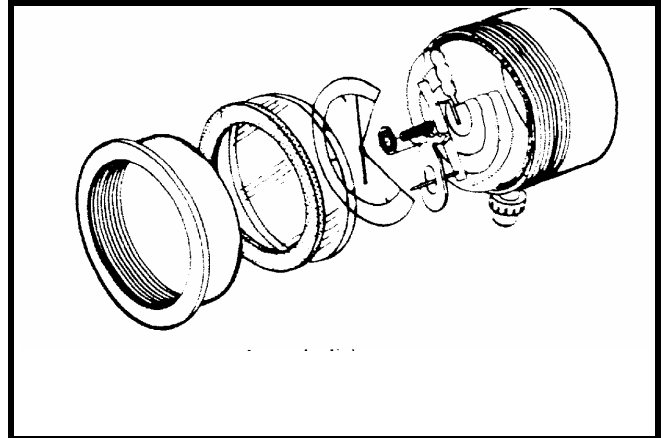


Fig. 2 Vacuometro a diaframma

VANTAGGI

- la lettura della pressione non dipendente dal tipo di gas
- utilizzo di materiali compatibili con processi chimici (acciaio, inconel, leghe al nickel, spirali di quarzo, etc)

SVANTAGGI

- lettura locale non remotizzabile

MANUTENZIONE:

Normalmente questi sensori operano in basso vuoto in applicazioni altamente "sporche"; se il sistema da vuoto è fortemente inquinato, il sensore essendo parte del sistema viene contaminato e la sua accuratezza può venire influenzata. Lo stesso effetto può derivare da olio proveniente dalla pompa da vuoto.

Se la pressione viene ripristinata troppo spesso e troppo velocemente l'ago indicatore può perdere il suo posizionamento originale

Pulire accuratamente il sensore rimuovendo le tracce di contaminanti

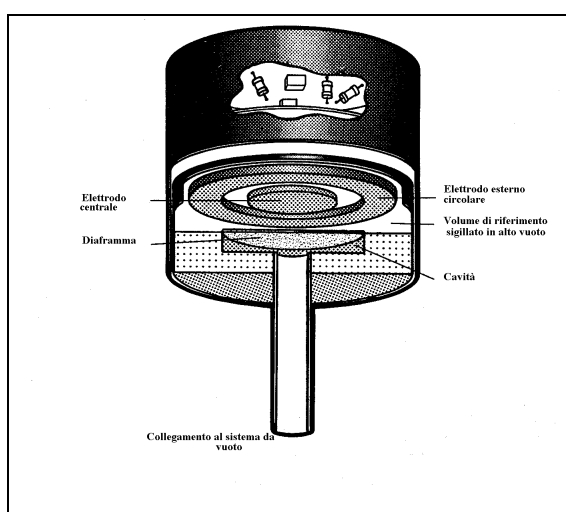
Rimuovere l'ago e riposizionarlo in atmosfera (od alla massima pressione del sensore) seguendo le istruzioni del costruttore

SENSORI CAPACITIVI (VACUOMETRI A MEMBRANA CAPACITIVA)

- **Famiglia: sensori meccanici.**
- **Intervallo di misura: 1000 mbar - 10^{-5} mbar**
- **Esistono vari tipi di sensori capacitivi. I più comuni, di tipo assoluto, hanno una risoluzione di 1 parte in 10^4 , altri, sia assoluti che differenziali, di 1 parte in 10^5 altri di 1 parte in 10^6 .**
- **Accuratezza : tipicamente migliore di $\pm 1\%$ della lettura per i modelli più comuni; $\pm 0,05\%$ per i modelli più avanzati.**

Un manometro capacitivo è semplicemente un sensore a diaframma (membrana), di solito in inconel, in cui la deflessione è misurata osservando la variazione di capacità tra la membrana (sottoposta ad una pressione differenziale) ed uno o più elettrodi fissi. Questa variazione genera un segnale elettronico che converte la posizione della membrana in un segnale lineare. La deflessione della membrana può essere anche solo dell'ordine di 10^{-9} cm, quindi la temperatura può essere fonte di errori significativi nella lettura. Per letture in medio vuoto esistono dispositivi che mantengono la temperatura del sensore costante attorno ai 50 °C. qualunque sia la temperatura ambiente. Altri sensori possono operare a temperature più elevate ma in questo caso bisogna considerare la presenza di errori introdotti dalla traspirazione termica.

Ne esistono di tre tipi, assoluti a camera singola, assoluti a camera doppia e differenziali.



VACUOMETRI A SINGOLA CAMERA

La figura 3 mostra un manometro capacitivo di tipo assoluto che utilizza i due elettrodi di riferimento nella camera sigillata in vuoto. Un elettrodo è centrale mentre il secondo ha una forma circolare ed è posto attorno all'elettrodo centrale. Quando non vi è deflessione lo strumento si intende azzerato. La deflessione della membrana genera un segnale lineare di tensione proporzionale

alla pressione. Questo tipo di sensori pur essendo meno preciso dei vacuometri a doppia camera, ha il vantaggio di **Fig. 3 Vacuometro capacitivo a camera singola** un'estrema semplicità di utilizzo e, se viene

realizzato con materiali opportuni, può essere impiegato per applicazioni con gas corrosivi o comunque pericolosi dato che la superficie esposta non ha parti elettriche o altri dispositivi ma pareti metalliche.

VACUOMETRI A DOPPIA CAMERA (ASSOLUTI O DIFFERENZIALI)

La figura 4 mostra una tipica configurazione di un manometro a doppia camera. La membrana è saldata tra due elettrodi fissi. Variazioni di pressione nel sensore deflettono il diaframma, la deflessione varia la capacità nella coppia di elettrodi fissi posti ad entrambi i lati della membrana. Il trasduttore può operare come lettore assoluto o differenziale. Se usato come lettore differenziale la pressione P_x viene misurata come differenza dalla pressione P_r (pressione di riferimento).

Se viene usato come lettore assoluto, la pressione P_r deve essere ridotta a valori molto bassi (circa 10^{-7} mbar) rispetto alla pressione che si aspetta di misurare. Esistono modelli che hanno la seconda camera evacuata ad una pressione P_r e sigillata dal costruttore: questi vacuometri possono operare solo come sensori assoluti.

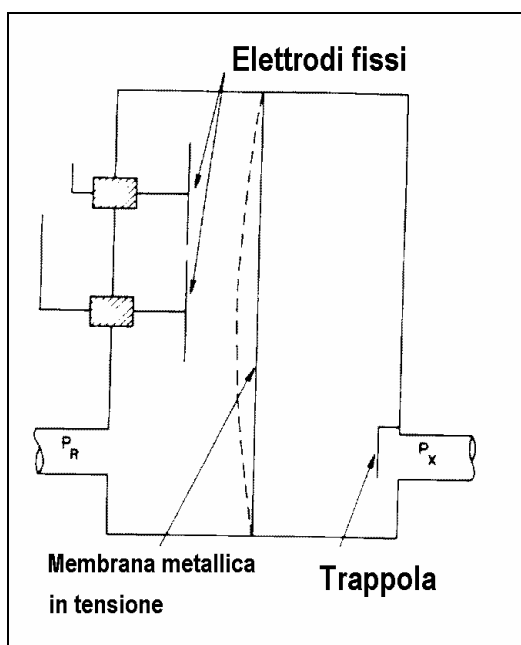


Fig. 4 - Schema di un capacitivo a singola camera

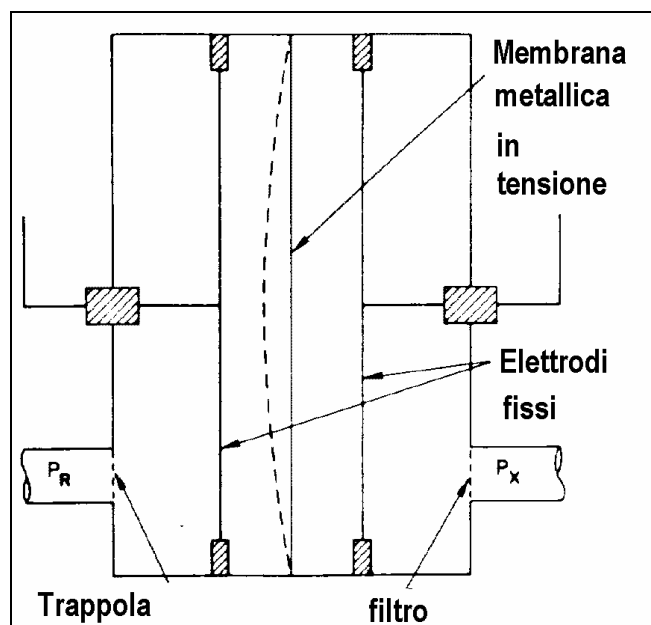


Fig. 5 - Schema di un capacitivo a doppia camera

VANTAGGI

- la lettura della pressione non dipende dal tipo di gas
- utilizzo di materiali compatibili con processi chimici (acciaio)
- tempo di risposta molto rapido
- segnale uscita lineare
- lettura remotizzabile

SVANTAGGI

- costo elevato
- instabilità dello zero nei sensori che non leggono dall'atmosfera
- dipendenza dalla temperatura

MANUTENZIONE:

L'unica manutenzione periodica consigliata è la taratura. La frequenza di taratura dipende dalla durezza

verifica della taratura.

dell'applicazione.

SENSORI PIEZORESISTIVI (*STRAIN GAUGE*)

- **Famiglia:** sensori meccanici.
- **Intervallo di misura:** 2000 mbar - 1 mbar
- **Si trovano facilmente sensori dalle seguenti scale:** 2000-1 mbar, 1000-1 mbar
- **Accuratezza:** tipicamente $\pm 1\%$ fondo scala

Un diaframma flessibile, normalmente di acciaio inossidabile separa una zona sigillata in alto vuoto e l'atmosfera. Variazioni di pressione nel sensore deflettono il diaframma, la deflessione viene trasferita attraverso un accoppiamento rigido ad un ponte piezoresistivo provocando variazioni elettriche. La tensione generata, o la corrente risultante da una tensione costante applicata al ponte, è correlabile alla pressione. Il ponte può essere aggiustato alla pressione atmosferica ed in alto vuoto.

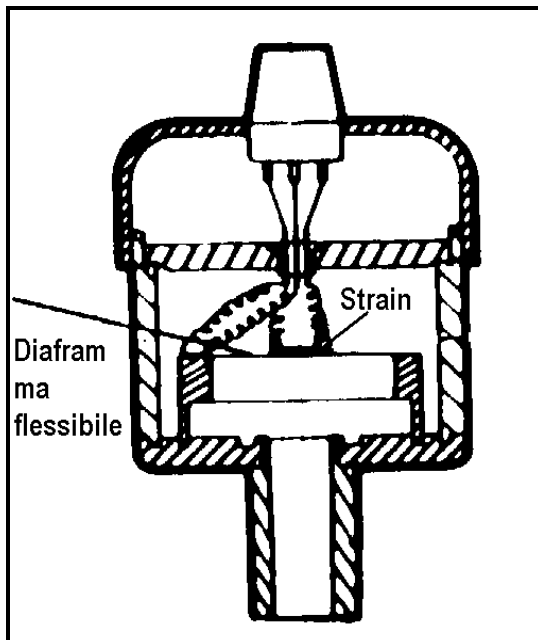


Fig.6 Sensore Piezoresistivo

VANTAGGI

- la lettura della pressione non dipende dal tipo di gas
- utilizzo di materiali compatibili con processi chimici (acciaio)
- tempo di risposta molto rapido
- lettura remotizzabile

SVANTAGGI

- scala di lettura limitata

MANUTENZIONE:

L'unica manutenzione periodica consigliata è la verifica della taratura.
Se non si riesce ad ottenere lo zero per eccesso di condensato nel sensore

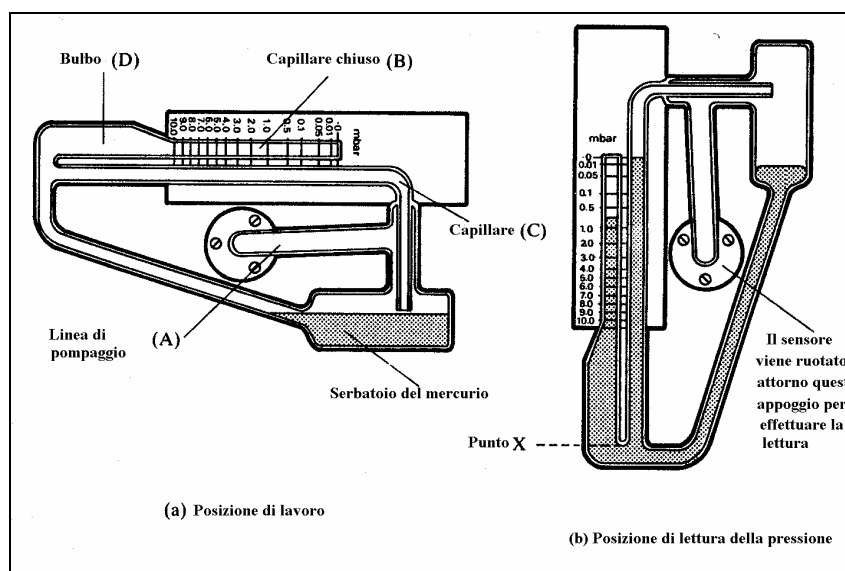
La frequenza di taratura dipende dalla durezza dell'applicazione.
Lasciare il sensore acceso al massimo valore di vuoto ottenibile. Lavare la cella con solventi compatibili con i materiali.

MC LEOD (VACUOMETRI A COMPRESSIONE)

- **Famiglia:** sensori meccanici.
- **Intervallo di misura:** 10 mbar - 10^{-4} mbar
- **Esistono vari tipi di sensori. Le scale più comuni sono:** $10^{-10^{-2}}$ mbar; $1-10^{-3}$ mbar
- **Accuratezza:** tipicamente $\pm 10\%$

Il vacuometro di McLeod, la cui prima versione risale al 1874, utilizzando la legge di Boyle-Mariotte, $PV = \text{COSTANTE}$, permette di misurare pressioni troppo basse per essere lette con un normale tubo ad U. Esistono varie versioni di questo strumento che, nei modelli più perfezionati e rispettando certi parametri al contorno, come la purezza del mercurio, la costanza della temperatura, un aiuto alla lettura della pressione, permettono d'utilizzarlo come strumento primario per tarare altri strumenti da vuoto.

Il sensore è formato da un sistema di colonne di vetro e da un bulbo contenente mercurio. Un volume noto di gas viene compresso in un volume minore per opera di una colonna di mercurio che sale. La differenza in termini di livello di mercurio tra il gas compresso e quello esposto al sistema da testare è funzione della pressione del gas in misura. Una scala opportunamente calibrata correla la pressione in funzione dell'altezza della colonna di mercurio. Dato che la misura dipende dal volume, ben noto, di gas intrappolato, dal volume finale del gas compresso e dalla pressione in questo volume finale, tutti parametri misurabili direttamente, il sensore si può considerare assoluto.



**Fig.7-
Vacuometro
McLeod**

La figura 7 mostra una versione comune del McLeod.

Una linea di pompaggio (A) collegabile al sistema da vuoto, un capillare

chiuso (B) ed un capillare parallelo (C) un bulbo (D) ed una scala graduata. La lettura viene eseguita ruotando lentamente di 90 gradi in senso antiorario l'intero blocco attorno al suo giunto rotabile. Il mercurio scende verso il capillare e quando viene raggiunto il punto X un campione di gas è intrappolato all'interno del sensore. Il mercurio viene fatto risalire fino a raggiungere il punto di riferimento posto sul

capillare C. Questo punto di riferimento coincide con la chiusura del capillare B. Il mercurio, che fluisce dal bulbo nel capillare B, comprime il gas isolato riducendolo in un volume di quantità nota; questa riduzione di volume ha come effetto l'aumento proporzionale della pressione del gas (purché la riduzione avvenga a temperatura costante). La lettura viene presa sulla scala graduata.

Dopo la lettura il blocco sensore viene riportato alla sua situazione di partenza con i capillari orizzontali.

Un errore frequente nell'utilizzo dei McLeod viene introdotto quando il gas campionato comprende un'alta percentuale di vapori condensabili, questi durante la compressione possono condensare in liquido occupando un volume non trascurabile e la lettura può essere pesantemente falsata.

Un altro errore, spesso involontario, viene introdotto nella lettura della pressione nei casi dove il McLeod viene utilizzato con trappole fredde ad azoto liquido. L'utilizzo delle trappole avviene sia per isolare il vacuometro dall'ambiente di misura evitando che il medesimo venga inquinato da mercurio sia per salvaguardare il mercurio da solventi o dall'olio delle pompe. La trappola agisce come pompa e il MCLEOD quindi misura solo la pressione parziale totale dei gas permanenti contenuti nella miscela in misura.

VANTAGGI

- la lettura della pressione, diretta, non dipende dal tipo di gas

SVANTAGGI

- permette solo misure statiche, una misura ogni uno/due minuti
- fragilità
- presenza di mercurio, possibilità di contaminazioni
- non usabile per automazioni
- complessità della misura, richiede operatori qualificati
- non può misurare vapori condensabili

MANUTENZIONE:

<p>In funzione dell'applicazione, dopo un certo periodo di tempo, il vetro del sensore può venire contaminato da tracce d'olio, di grasso, da composti di mercurio, etc. Queste contaminazioni influenzano la lettura. Il mercurio può variare il suo volume nel tempo sia inglobando condensabili, sia evaporando nei sistemi d'alto vuoto. La lettura dipende dalla carica di mercurio</p>	<p>Pulire chimicamente il vetro seguendo le istruzioni del costruttore. Controllare periodicamente che la carica sia quella consigliata dal costruttore</p>
--	--

SENSORI PIRANI (VACUOMETRO A CONDUCEBILITÀ TERMICA TIPO PIRANI)

- **Famiglia:** sensori che sfruttano i fenomeni di trasporto (conducibilità termica) nei gas.
- **Intervallo di misura:** 1013 mbar - 10^{-4} mbar
- **Si trovano facilmente sensori dalla seguenti scale:** 1000- 10^{-3} mbar, 1000- 10^{-4} mbar, 50 - 10^{-3} mbar
- **Accuratezza:** tipicamente $\pm 10\%$ lettura tra 1 e 10^{-2} mbar

Il sensore Pirani è costituito da un filamento sottile, di solito tungsteno, che è un braccio di un ponte di Wheastone riscaldato dal passaggio di una corrente elettrica. Il ponte raggiunge l'equilibrio con il filamento ad una data temperatura che dipende dalla potenza elettrica, dalle perdite per conduzione, irraggiamento e convezione nel gas che lo circonda, oltre che dai suoi supporti. (fig.8) L'influenza della convezione è elevata per pressioni elevate ma diventa nulla al decrescere della pressione. Per pressioni inferiori a 10^{-3} mbar l'irraggiamento diventa la fondamentale fonte di perdita del calore.

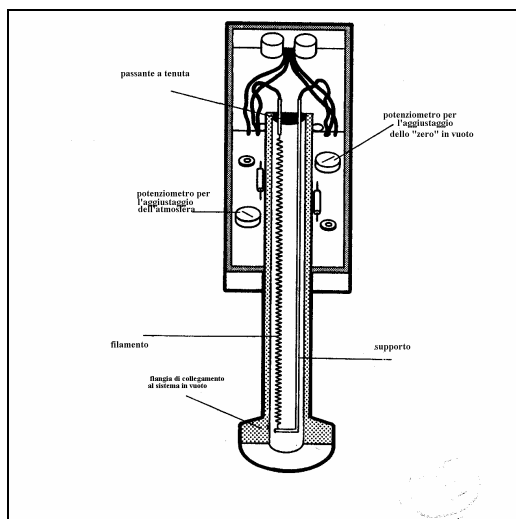


Fig.8-Sensore Pirani

Il filamento è esposto alla pressione che deve essere misurata. Se la pressione è elevata ci saranno frequenti collisioni tra le molecole del gas ed il filamento, le molecole prenderanno calore dal filamento e lo perderanno nelle successive collisioni con le pareti del sensore. Se la pressione è ridotta, ci sono meno molecole e quindi meno collisioni con il filamento. L'energia

rimossa dallo stesso è inferiore e quindi la temperatura del filamento tende ad aumentare modificando il valore della propria resistenza. La variazione di resistenza comporta lo sbilanciamento del ponte di Wheastone, il cui bilanciamento viene di solito fatto a pressione di 10^{-4} mbar (zero set). Il ponte può venire bilanciato agendo sulla corrente (Pirani a resistenza variabile o a tensione costante) o agendo sulla tensione in modo che la temperatura del filamento rimanga costante, (Pirani a temperatura costante), qualunque sia la perdita di energia. Nei primi la corrente di bilanciamento è correlata alla pressione e l'intervallo di lettura è tra 10 e 10^{-3} mbar,

nei secondi la tensione di bilanciamento è il parametro di lettura e l'intervallo di utilizzo e tra l'atmosfera ed i 10^{-4} mbar.

I tempi di risposta dei Pirani, cioè i tempi di bilanciamento del ponte di Wheastone, sono molto rapidi e questo li rende molte utili nei cicli industriali di controllo.

Normalmente i sensori Pirani sono **calibrati per azoto**. Quando altri gas predominano nel processo bisogna ricorrere a curve di correzione come quelle di figura 9.

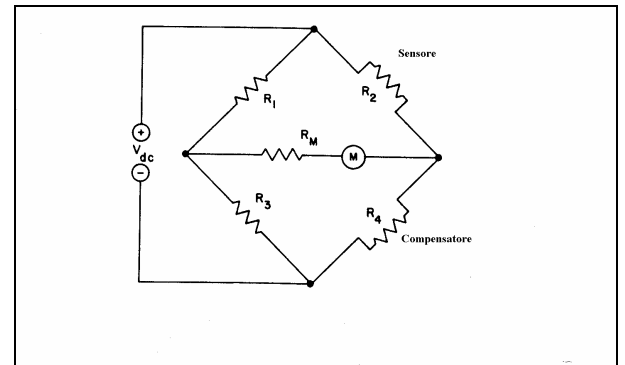
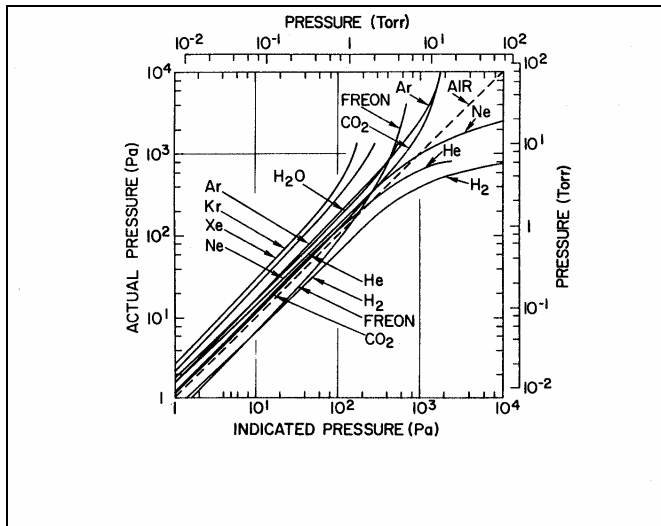


Fig.9-Curve di correzione per i vari gas

Fig.10-Schema tipico di sensore Pirani

VANTAGGI

- tempo di risposta rapido
- costruzione robusta
- possibilità di effettuare misure da vuoti remotizzabili
- uscita convertibile in segnali digitali registrabile

SVANTAGGI

- dipendenza della lettura dal gas
- possibilità di ossidazioni sul filamento caldo con effetti memoria

MANUTENZIONE:

La sensibilità dipende dallo stato del filamento. Se questi è contaminato da olio o vapori organici, la lettura può essere falsata verso	Lasciare il filamento acceso in vuoto pulito per degassarlo se non basta pulire il filamento con tricloroetilene o acetone cercando di non danneggiare
--	--

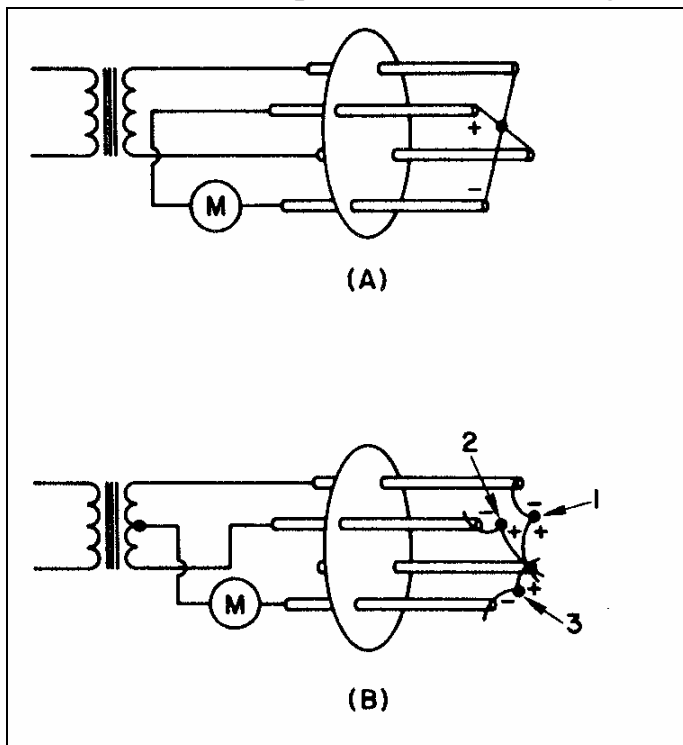
pressioni superiori

il sensore. La testa deve essere perfettamente asciutta prima di essere nuovamente accesa.

SENSORI TERMOCOPPIE (VACUOMETRO A CONDUCEBILITÀ TERMICA TIPO A TERMOCOPPIA)

- **Famiglia:** sensori che sfruttano i fenomeni di trasporto (conducibilità termica) nei gas, indiretti.
- **Intervallo di misura:** tipicamente $50 - 10^{-3}$ mbar
- **Si trovano facilmente sensori dalla seguente scala:** $50-10^{-2}$ mbar, $1-10^{-3}$ mbar
- **Accuratezza:** tipicamente $\pm 10\%$

La termocoppia opera essenzialmente come un Pirani con la particolarità che la temperatura del filamento è misurata direttamente con una termocoppia. La termocoppia è un termometro elettrico che opera secondo il principio di Seebeck, per il quale tra due metalli posti in contatto si genera una piccola tensione, da 5 a 15



mvolt. Questa tensione dipende dai tipi di metallo e dalla temperatura della giunzione. La giunzione della termocoppia, ferro o rame costantana, è saldata o comunque fissata al centro del filamento attraversato da corrente in modo da assicurare un buon trasferimento della temperatura. Il circuito di controllo consiste nell'alimentatore del filamento e di un millivolmetro tarato direttamente in unità di pressione per misurare l'uscita della termocoppia.(versione a tre fili)

Fig.11 Schemi di sensori a termocoppia

Altri modelli utilizzano due termocoppie come rami di un ponte di Wheastone mentre le altre due armi sono normali resistenze ohmiche.(versione compensata a quattro fili).

Nella termocoppia viene fatta passare una corrente alternata costante. Per una data corrente la temperatura dipende dalla conducibilità termica e dalla pressione del gas che circonda le termocoppie.

Temperature tipiche del filamento sono 40° C a 5 mbar e 450° C a 10⁻³ mbar. Sopra i 5 mbar la temperatura rimane praticamente costante. Sotto i 10⁻⁴ mbar il principio della conducibilità termica dei gas diventa inutilizzabile dato che l'unico fattore

operante è l'irraggiamento e questo non dipende dalla pressione.

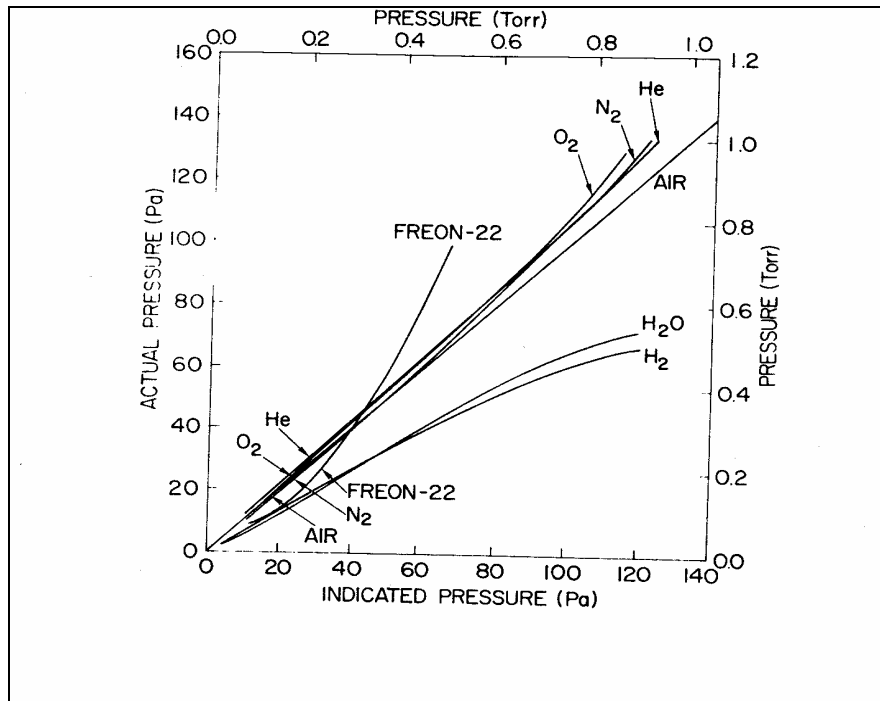


Fig.12-Curve di correzione per i vari gas

VANTAGGI

- tempo di risposta rapido
- costruzione robusta ed affidabile
- possibilità di effettuare misure da vuoti remotizzabili
- uscita convertibile in segnali digitali registrabile
- possibilità di sensori alimentati a batteria

SVANTAGGI

- dipendenza della lettura dal gas
- possibilità di ossidazioni sul filamento caldo con effetti memoria
- lettura inaccurata

MANUTENZIONE:

La sensibilità dipende dallo stato del filamento. Lasciare il filamento acceso in vuoto pulito per

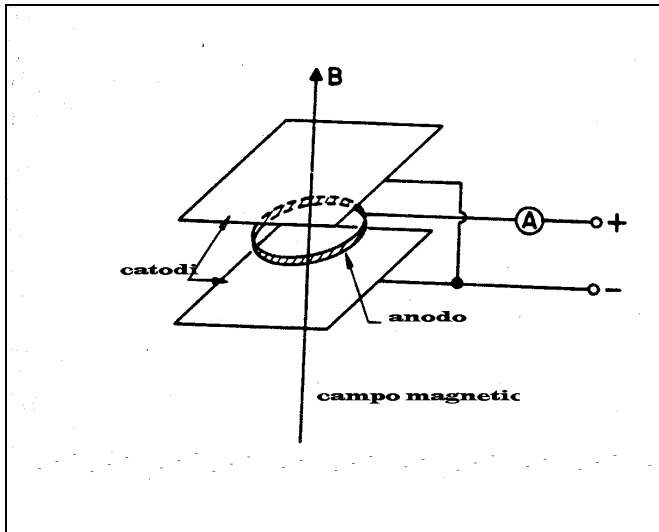
filamento. Se questi è contaminato da olio o vapori organici, la lettura può essere falsata verso pressioni superiori	degassarlo se non basta pulire il filamento con tricloro etilene o acetone cercando di non danneggiare il sensore. La testa deve essere perfettamente asciutta prima di essere nuovamente accesa
---	--

SENSORE PENNING (*VACUOMETRO A IONIZZAZIONE A CATODO FREDDO, VACUOMETRO PHILIPS*)

- **Questo gruppo di trasduttori di pressione appartiene alla famiglia dei sensori che sfruttano fenomeni di ionizzazione dei gas.**
- **Intervallo di misura: 1^{0-2} mbar - 10^{-8} mbar**
- **Il Penning non è uno strumento preciso ma un mero indicatore di vuoto**
- **Accuratezza: tipicamente +100/-50%**

I diversi modelli di vacuometri a catodo freddo, o a campi incrociati, hanno in comune di non aver elettrodi incandescenti e di avere un campo elettrico ed un campo magnetico tra loro perpendicolari con la funzione di prolungare la traiettoria degli elettroni tra l'anodo ed il catodo, aumentando la probabilità di ulteriori ionizzazioni del gas, portando la corrente ionica ad un livello misurabile. La scarica fredda viene indotta dalla tensione continua (dell'ordine di 1-2 kV) applicata su due elettrodi, le linee di forza del campo magnetico costringono gli elettroni su un'orbita ipocicloidale fino alla collisione con una molecola del gas. Dopo l'urto l'elettrone inizia una nuova orbita cicloidale più vicino all'anodo. Le due cariche, positiva e negativa vanno verso i due elettrodi formando la scarica che viene misurata. Il valore della scarica dipende dalla natura del gas. Il valore superiore della pressione attorno ai 10^{-2} mbar è limitato dal fatto che per pressioni superiori la scarica assume le caratteristiche di una scarica molto luminosa la cui intensità di corrente dipende solo limitatamente dalla pressione e quindi è inadatta alla sua determinazione. Inoltre l'intensità della scarica potrebbe vaporizzare gli elettrodi. Il limite inferiore è dovuto al fatto che il libero cammino medio degli elettroni è molto superiore alla distanza tra gli elettrodi e quindi vi è l'incapacità degli ioni di innescare una scarica.

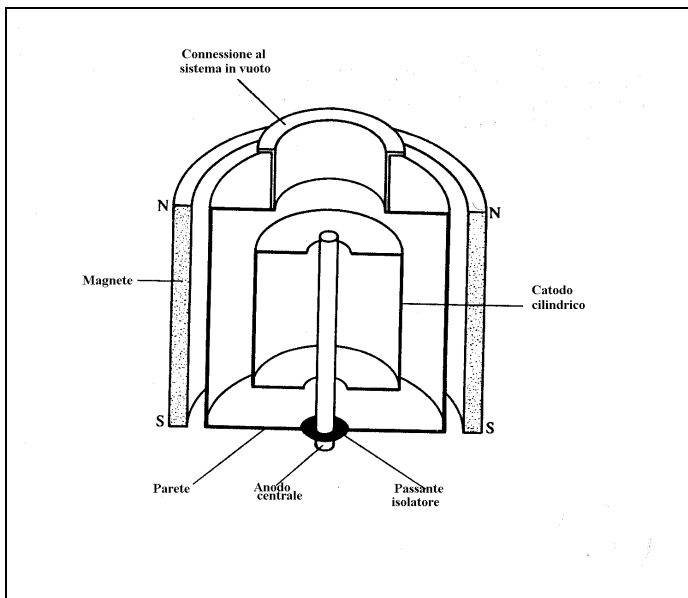
Il Penning opera come una pompa da vuoto, con portate molto basse, circa 0,1 l/s per questo motivo il Penning utilizza una flangia di larga sezione e non deve essere connesso alla camera attraverso una piccola conduttanza.



PENNING CLASSICO

Il vacuometro è costituito da un anodo anulare e da due dischi connessi elettricamente agenti come catodo. Un magnete permanente è situato con il campo parallelo all'asse di simmetria del vacuometro. La tensione tra gli elettrodi è di qualche kilovolt (tipicamente 2000 V) ed il campo magnetico tra 500 e 1000 Gauss. (Fig.13)

Fig. 13 Vacuometro Penning



PENNING COASSIALE

Un asta sottile (anodo) alimentata da alcuni kvolt è posta come asse di un cilindro (catodo). Un magnete cilindrico circonda il tutto. Questa geometria garantisce che il campo magnetico è parallelo all'anodo e in ogni punto perpendicolare al campo elettrico. (Fig.14)

Fig. 14 Vacuometro Penning

coassiale

VANTAGGI

Sopportano repentini sbalzi di pressione, immissione d'aria e vibrazioni
Strumenti robusti adatti ad applicazioni industriali
Economico
Semplice da gestire (on/off)

SVANTAGGI

Si stacca facilmente

Ritardo all'accensione alle basse pressioni

MANUTENZIONE:

Quando il Penning lavora a pressioni elevate ($>10^{-3}$ mbar), le correnti ioniche sono elevate e si innescano fenomeni di

Il sensore Penning è di solito facilmente smontabile. Rimuovere meccanicamente con una sottile carta smeriglio lo strato di deposito.

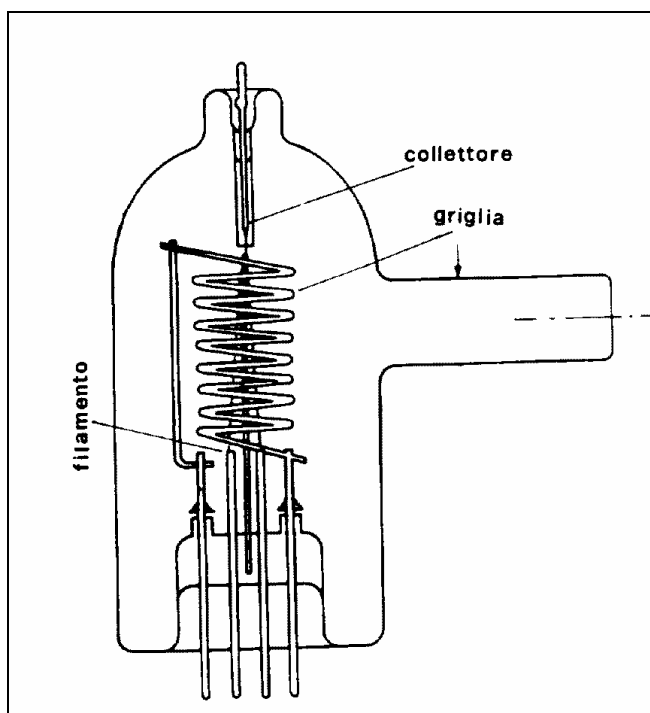
sputtering catodico. Le pareti vengono contaminate dalla deposizione di materiale metallico

Pulire accuratamente con acetone per togliere residui da idrocarburi e rimontare, secondo le istruzioni d'uso originali, utilizzando guanti.

SENSORE A IONIZZAZIONE (VACUOMETRO A IONIZZAZIONE A CATODO CALDO TRADIZIONALE, VACUOMETRO BAYARD-ALPERT)

- Questo gruppo di trasduttori di pressione appartiene alla famiglia dei sensori che sfruttano fenomeni di ionizzazione dei gas.
- Intervallo di misura: 10^{-2} - 10^{-10} mbar
- Esistono molti tipi commerciali di sensori a ionizzazione: dai triodi per alte pressioni ai sensori flangiati Conflat con electron beam per alto-ultra vuoto, dai sensori con il corpo in vetro ai sensori da inserire direttamente all'interno del sistema da vuoto.
- Accuratezza: tipicamente $\pm 10\%$ tra 10^{-4} e 10^{-7} mbar
tipicamente $\pm 20\%$ tra 10^{-5} e 10^{-9} mbar
tipicamente $\pm 100\%$ tra 10^{-10} e 10^{-11} mbar

I vacuometri a catodo caldo utilizzano gli elettroni emessi per effetto termoionico da un filamento caldo (normalmente di tungsteno), che fornisce elettroni liberi a flusso controllabile garantendo la ionizzazione anche a pressioni basse. La probabilità di ionizzazione dipende dal tipo di gas, quindi tutti i vacuometri a ionizzazione sono di tipo indiretto e necessitano di tarature per i vari tipi di gas di cui si vuole misurare la pressione. I sensori consistono di tre elettrodi, anodo, catodo (caldo) e collettore di ioni, gli elettroni sono accelerati da un campo elettrico e ricevono abbastanza energia dal campo per ionizzare il gas contenuto nel volume



contenente gli stessi elettrodi. Gli ioni positivi sono attirati dal collettore di ioni che è a potenziale negativo rispetto al catodo e cedono la loro carica positiva. La corrente ionica prodotta è una misura della densità del gas e quindi della pressione.

I vacuometri a ionizzazione agiscono come micropompe poiché la maggior parte degli ioni che cedono la carica al collettore rimangono sulla sua superficie

come atomi adsorbiti (circa 10^{-3} l/s).

Fig. 15 Vacuometro Bayard-Alpert

VACUOMETRO A IONIZZAZIONE TRADIZIONALE O TRIODO (10^{-2} mbar, 10^{-8} mbar)

Il vacuometro a ionizzazione tradizionale è un triodo composto da un filamento centrale (catodo caldo), una griglia (anodo) ed un collettore di ioni che la circonda. Gli elettroni emessi in abbondanza dal filamento centrale, vengono attirati e accelerati dalla griglia a potenziale positivo e gli ioni positivi sono raccolti dal collettore a potenziale negativo. La struttura aperta della griglia permette agli elettroni di attraversarla, di subirne l'effetto di richiamo, di riattraversarla, oscillando attraverso essa per alcune volte prima di essere definitivamente catturati. L'aumento della traiettoria degli elettroni aumenta la probabilità di ionizzazione del gas.

Il limite superiore della lettura (10^{-2} mbar) è dovuto ai forti fenomeni di ossidazione del filamento ed alla possibilità di scariche glow od ad arco tra gli elettrodi, mentre il limite inferiore (10^{-7} mbar) è dovuto ad un'apparente corrente positiva creata da raggi X molli, generati dall'urto degli elettroni provenienti dal filamento con il materiale della griglia., che incidendo sul collettore di ioni estraggono elettroni.

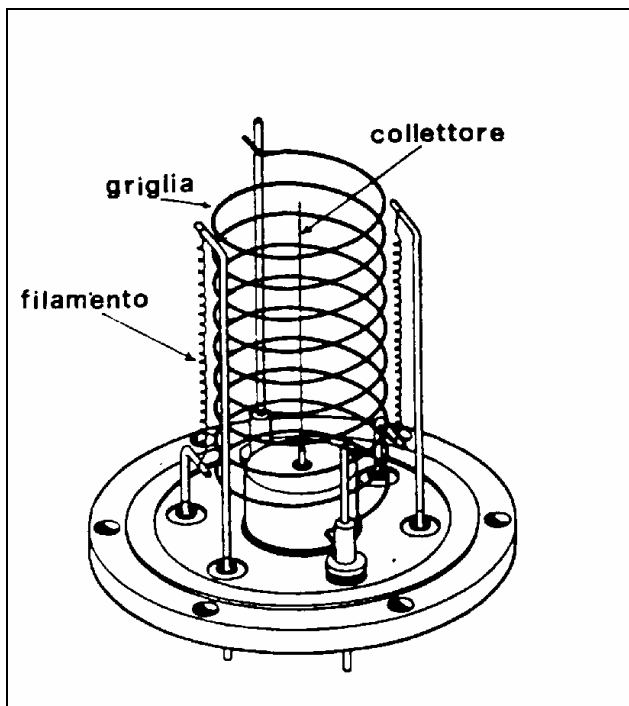


Fig.16 Vacuometro Bayard-Alpert su flangia metallica.

VACUOMETRO BAYARD-ALPERT (10^{-3} mbar, 10^{-10} mbar)

Il vacuometro a ionizzazione di Bayard-Alpert riduce fortemente l'effetto dei raggi X molli riuscendo a garantire la linearità tra corrente ionica e pressione a valori bassi. Il catodo caldo di tungsteno è esterno all'anodo, costituito da una griglia cilindrica, ed il collettore di ioni consiste di un filamento centrale

sottilissimo che coincide con l'asse del sensore. Il valore

dei raggi X è ridotto di due o tre ordini perché viene drasticamente ridotta la superficie del collettore. Per misure nel campo dell'alto ultra vuoto è consigliato usare sensori nudi in modo da ridurre l'effetto della superficie di contenimento del sensore e dalla flangia di connessione.

Sensibilità della testa a ionizzazione

La corrente ionica è proporzionale, oltre alla densità del gas (pressione) anche alla corrente elettronica e quindi alla corrente di emissione.

Si definisce **SENSIBILITA' RELATIVA** di una testa a ionizzazione come:

$$S = \frac{I^+}{I^* p} = \frac{\text{ampere}}{\text{ampere} \cdot \text{mbar}} \cdot \text{mbar}^{-1}$$

dove: p = pressione in mbar; I^+ = corrente ionica; I^* = corrente di emissione (tenuta costante)

e quindi :

$$p = 1/S * I^+ / I^*$$

La sensibilità dipende dal tipo di gas, dalla geometria degli elettrodi nel sensore e dalla corrente di emissione. Il valore del fattore "S", tipico di ogni sensore, per i vari gas viene normalmente fornito dal costruttore. In alternativa viene data la sensibilità per l'azoto e vengono forniti opportuni fattori di correzione che permettono di valutare correttamente la pressione per gas diversi dell'azoto.

GAS	FATTORE DI CORREZIONE	DI GAS	FATTORE DI CORREZIONE
Acetone	0.29	Idrogeno	2.4
Argon	0.83	Mercurio	0.303
Biossido di carbonio	0.69	Neon	4.35
Monossido di carbonio	0.92	Azoto	1.0
Krypton	0.59	Metano	0.8
Elio	6.9	Acqua	1.04

Tabella 2 Fattori di correzione di un sensore a ionizzazione per differenti gas e vapori.

(moltiplicare i valori letti per il fattore in tabella)

VANTAGGI

ampio intervallo di lettura

SVANTAGGI

dipende dal tipo di gas

si ossida facilmente

poco adatto ad applicazioni industriali

MANUTENZIONE:

Uno dei problemi più comuni nell'utilizzo delle teste a ionizzazione è la creazione di perdite di correnti dovute al depositarsi di strati conduttori all'interno del sensore. Questi strati possono essere dovuti alla evaporazione del filamento.

Il sensore può venire pulito o elettricamente (senza essere rimosso dalla camera) o chimicamente (con rimozione dalla camera, immersione in una soluzione al 20% di carbonato di sodio a 30 gradi). In ogni caso bisogna riferirsi alle istruzioni d'uso originali.

SPINNING ROTORS (VACUOMETRO A TRASFERIMENTO DELLA QUANTITÀ DI MOTO)

- Questo gruppo di trasduttori di pressione appartiene alla famiglia dei sensori che sfruttano fenomeni di trasporto nei gas.
- Intervallo di misura: 1 mbar - 10^{-7} mbar
- Accuratezza : i costruttori dichiarano un valore del ± 1 % tra 10^{-2} e 10^{-6} mbar

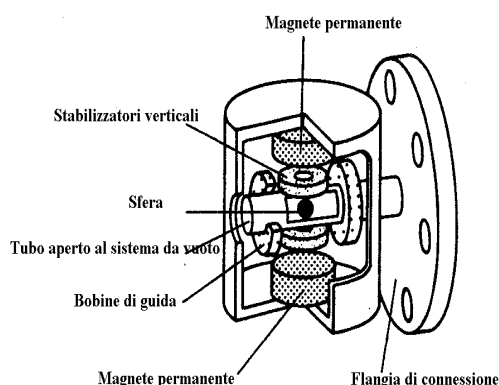
La pressione viene derivata dalla velocità di decelerazione che una pallina rotante, levitante in un campo magnetico, subisce a causa degli urti tra le molecole del gas e la superficie della sfera.

Il sensore consiste di una sferetta di acciaio del diametro di 4-5 mm, situata in un corto cilindro di acciaio saldato alla flangia di connessione con il sistema da vuoto. Il tubo cilindrico è circondato da un sistema di magneti per energizzare e stabilizzare la sfera. Due dischi magnetici permanenti mantengono la sfera verticalmente mentre

campi magnetici indotti ne garantiscono la centratura e la rotazione

Quando la velocità di rotazione della sfera ha raggiunto una data velocità di rotazione, per esempio 24000 g/m non viene più fornita energia per la rotazione ed inizia la decelerazione dovuta all'urto con le molecole di gas. Il rallentamento dipende dalla pressione, che in condizioni di flusso molecolare, dipende tra l'altro dalla temperatura del gas, dal peso molecolare del gas, dalla decelerazione angolare della sfera, dal raggio della sfera, dalla densità della

pallina e dallo stato superficiale della sfera. La rotazione della sfera induce, tramite il



suo momento magnetico una tensione alternata sincrona in una copia di filamenti che la circondano. La decelerazione viene misurata in intervalli di tempo prefissabili

Fig.17 Vacuometro Spinning Rotors

<i>VANTAGGI</i>	<i>SVANTAGGI</i>
Accuratezza	costo elevato
Riproducibilità	non sopporta vibrazioni
non produce effetti pompanti	non sopporta campi magnetici
è riscaldabile fino a 400 °C	

SENSORI ATTIVI, SENSORI PASSIVI E WIDE RANGE

Attualmente le case costruttrici di strumentazione per la lettura del vuoto offrono sensori Pirani, termocoppie, membrane piezoresistive e Penning definendoli attivi. Ciò che differenzia questi sensori dai precedenti definiti ora “passivi” è il solo fatto che l’elettronica di conversione del segnale in volt è contenuta nel corpo del sensore stesso e non nel lettore. I sensori attivi possono quindi essere alimentati direttamente dall’utente ed il segnale di trasduzione della pressione espresso in Volt può essere linearizzato, letto con un normale voltmetro o evidenziato su un computer. In questo senso anche le membrane capacitive sono attive con il vantaggio di una uscita lineare.

Il principale vantaggio delle teste attive, oltre ad evitare l’uso di un lettore dedicato, come per i sensori passivi, in tutti gli impianti dove la gestione del processo avviene tramite processore o computer, consiste nel fatto che il segnale in uscita è normalmente in Volt, tra 0 e 10, e non in milliamperes. Quindi può essere portato a grandi distanze senza perdite di segnale mantenendo la precisione di lettura con costi decisamente ridotti. Quindi riassumendo:

Sensori attivi – sono sensori con integrata la parte di elaborazione e trasduzione del segnale corrispondente alla pressione	Sensori passivi – il sensore necessita di un apposito lettore che elabora e trasduce il segnale corrispondente alla pressione
---	--

Nel sensore **wide range**, od ad ampio campo di lettura, sono integrati due sensori tradizionali in modo da poter espandere l'intervallo di lettura utilizzando un solo dispositivo.

Il wide range è un Pirani-Penning che, con un solo sensore, normalmente attivo, permette di conoscere la pressione tra l'atmosfera e i 10^{-10} mbar.

IL MONTAGGIO DEI SENSORI PER BASSA PRESSIONE

Un sensore da vuoto dovrebbe essere montato **il più vicino possibile** alla zona dove la pressione deve essere misurata. Il montaggio del sensore con tubazioni o prolunghe che comportano conduttanze aumenta la non accuratezza della lettura introducendo delle variazioni di pressione.

I sensori con filamenti caldi devono essere installati secondo le indicazioni del costruttore o la convezione del gas attorno al filamento potrebbe essere diversa da quella di progetto generando errori anche non indifferenti.

Tutti i sensori dovrebbero essere montati con l'**ingresso rivolto verso il basso** per evitare che liquidi o solidi vi entrino. La presenza di corpi estranei, oltre al possibile danneggiamento del sensore, può introdurre sensibili variazioni nella lettura della pressione.

Bisogna evitare che eventuali flussi di gas arrivino direttamente sul sensore; oltre al possibile danneggiamento di filamenti (se vi sono) la pressione letta potrebbe dare indicazioni false circa la pressione media nell'ambiente in vuoto. L'ideale sarebbe fare in modo che il flusso di gas sia diretto contro una parete e diffuso nella camera.

La lettura della pressione può venire inoltre influenzata dalla posizione del sensore nella camera. La presenza di pareti fredde o la stessa vicinanza o meno al sistema di pompaggio possono influenzare la lettura della pressione.

Quando si utilizzano più sensori montati su un unico collettore, croce o tee, bisogna isolare otticamente i sensori per evitare che i campi elettrici o magnetici presenti influenzino i sensori stessi.

La figura 18 mostra alcune di queste situazioni.

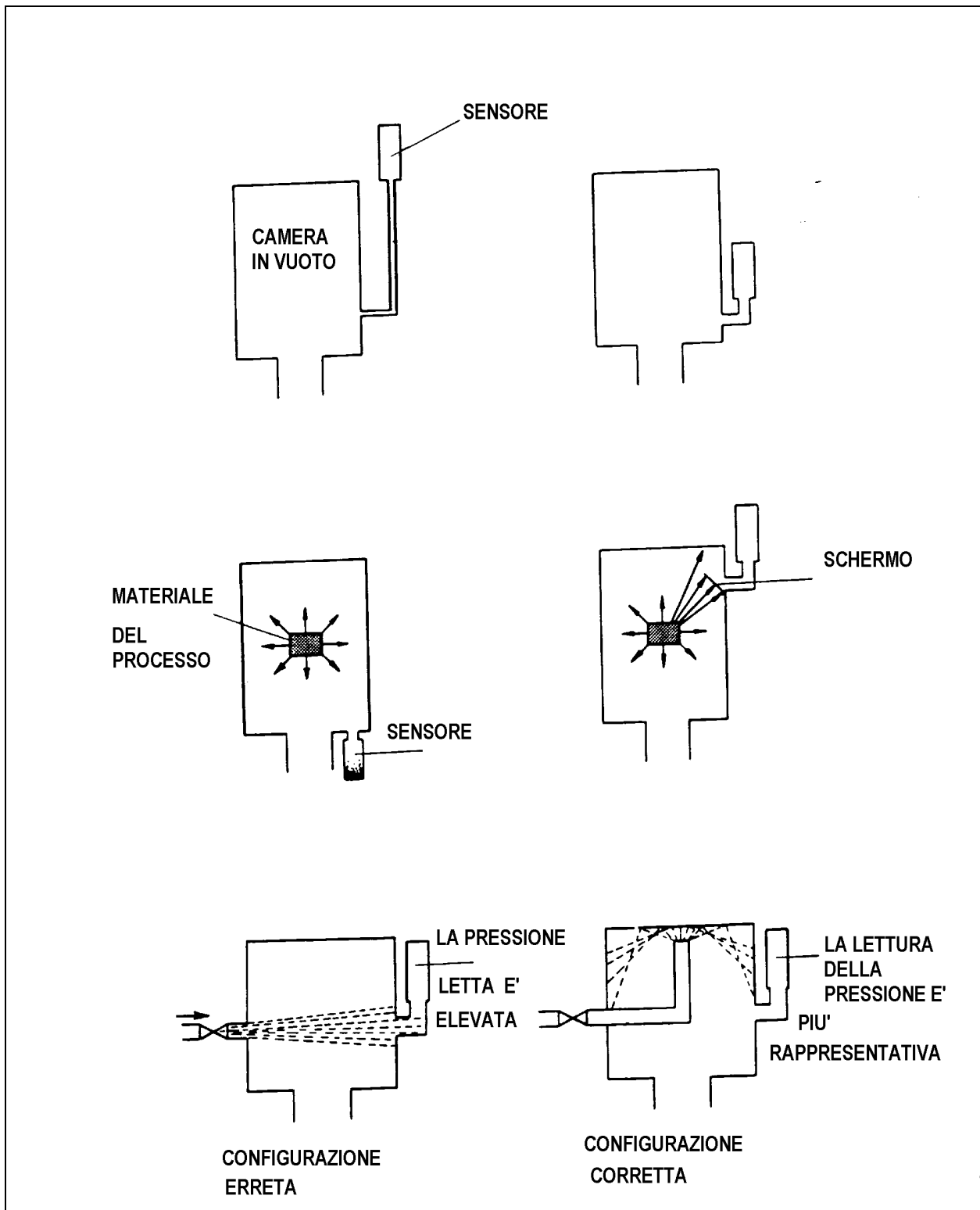


Fig.18 Esempi di montaggi con sensori da vuoto.

ATTENZIONE:

Non lasciare i sensori accesi o spenti esposti nell'ambiente di lavoro.

Non immettere aria attraverso la flangia di connessione del sensore.

I sensori devono essere protetti con gli appositi tappi di chiusura o riposti nelle loro custodie.

I sistemi da vuoto devono prevedere un apposito dispositivo per la "rottura del vuoto"

LA TARATURA DEI SENSORI PER BASSA PRESSIONE

Negli ultimi anni vi è un certo incremento per la richiesta delle tarature periodiche per gli strumenti della misura del vuoto utilizzati in industrie manifatturiere.

La maggior parte dei processi che utilizzano il vuoto lavorano con pressioni tra l'atmosfera e 10^{-2} mbar e quindi gli strumenti da tarare sono per lo più Pirani, termocoppie, manometri e membrane capacitive.

La necessità di una taratura periodica, in osservanza delle ISO 9000, (ISO 9001: 1987 SEZIONE 4.11 Ispezione, misura e strumentazione), viene riscontrata dalle industrie che hanno realizzato come la qualità del prodotto finale dipenda dalla qualità del vuoto prodotto e come una lettura credibile del vuoto sia necessaria.

La taratura di un sensore, con tracciabilità, avviene per comparazione della sua lettura con vuotometri primari che sono direttamente correlati, dal Laboratorio Nazionale, alle misure fondamentali di massa, lunghezza e tempo. Normalmente vengono utilizzati degli standard secondari che vengono tarati con regolarità verso gli standard primari.

La taratura dei vacuometri con accuratezze dell'ordine dell'1% o meno si realizzano solamente negli appositi laboratori metrologici nazionali, come l'Istituto Metrologico "Colonnetti" del CNR di Torino che realizzano ed utilizzano sistemi primari piuttosto sofisticati.

I centri SIT, utilizzando degli standard secondari o di trasferimento, possono tarare e certificare gli strumenti di riferimento per i laboratori metrologici delle aziende che li utilizzano per le tarature quotidiane dei propri vacuometri operativi.

Per queste tarature periodiche di solito non è necessaria un'accuratezza molto spinta e la taratura interna per confronto con lo strumento di riferimento, di cui è rintracciabile la catena di riferibilità, è sufficiente.

Alcuni problemi sorgono dal fatto che i sensori hanno spesso un intervallo di lettura superiore ai valori di vuoto ottenibili normalmente sulle apparecchiature dove sono utilizzati. Questo rende impossibile compiere le operazioni di aggiustaggio (setting), ove necessarie, alle quali i sensori debbono periodicamente essere sottoposte.

In questi casi le industrie utilizzano un apposito banco da vuoto posto nei propri laboratori di taratura.

L'intervallo di tempo tra due tarature successive viene determinata dall'utilizzatore in base alla applicazione. Di solito le prime tarature degli strumenti di riferimento vengono eseguite ogni sei mesi e, quando si conosce la ripetibilità nel tempo, la cadenza diventa annuale.

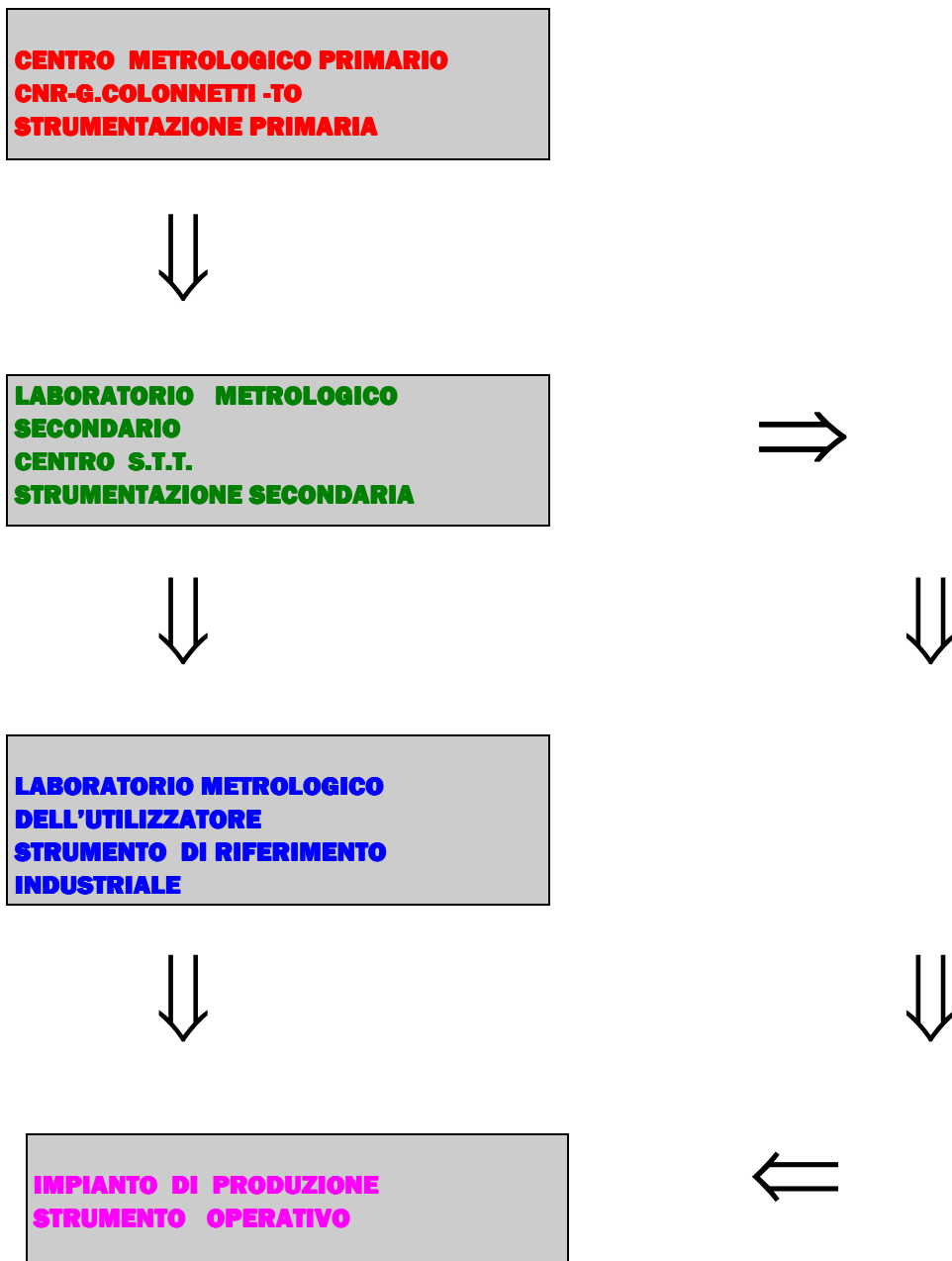
Taratura per confronto

La taratura per confronto nei laboratori metrologici delle aziende altro non è che la comparazione delle letture dei valori di pressione riportati dai sensori in taratura verso i sensori di riferimento tarati e tracciabili. Tutti i sensori sono connessi ad una camera da vuoto, vuotata per alcune ore ad una pressione di due decadi inferiori al valore minimo che si intende tarare. Le misure vengono effettuate generando “punti di pressione” in risalita mediante l'immissione di gas nella camera da vuoto attraverso una valvola a spillo. Se si usano sensori la cui lettura è influenzata dal gas, bisogna utilizzare un gas di taratura puro. Normalmente viene utilizzato l'azoto secco.

Alcuni dei fattori più comuni che influenzano l'accuratezza della taratura dei sensori sono:

- l'incertezza nella pressione assoluta generata nella camera
- i fattori ambientali (temperatura ambiente)
- la riproducibilità e la pulizia dei sensori
- l'incertezza del sensore di riferimento
- la purezza del gas

APPENDICE I



Catena della riferibilità per gli strumenti di misura del vuoto.