

Misure di portata nelle emissioni atmosferiche
Norma UNI EN ISO 16911-1:2013.

Scopo ed applicazioni:

La norma descrive dei metodi per la determinazione periodica della velocità assiale e della portata volumetrica in condotti e camini di emissione, con lo scopo di verificare la conformità legislativa o di fornire un riferimento nell'ambito della taratura di strumentazione fissa (SME).

La norma descrive un metodo principale basato su misure puntuali multiple di velocità, nonché metodi alternativi basati sull'utilizzo di traccianti o sul calcolo a partire dal consumo di energia.

Il metodo principale descritto nella norma (misure multiple di velocità puntuale) si applica a condotti a sezione circolare o rettangolare con siti di misura conformi alla UNI EN 15259:2008.

Nella norma sopra riportata sono presenti delle imprecisioni per cui è in itinere la predisposizione di un TECHNICAL REPORT (Stationary Sources Emissions – Guidance on the application of EN 16911 – 1:3013 CEN TC 264) il cui scopo è quello di fornire chiarimenti e specificazioni in merito alla applicazione della UNI EN ISO 16911-1:2013.

Al momento il documento è allo stato di draft, ed in quanto tale i relativi contenuti potrebbero subire variazioni ed aggiustamenti nella versione definitiva.

Il TR-Draft raggruppa gli obiettivi del monitoraggio in maniera diversa rispetto alla UNI EN ISO 16911- 1:2013, come di seguito riportato:

5.7.1 Measurement objective

This Technical Report adopts a slightly different grouping for measurement objectives than EN 16911-1. This is in order that objectives are grouped based on the proposed quality control that will be recommended throughout this Technical Report. The grouping of measurement objectives is as follows:

1. Periodic monitoring for compliance purposes according to EN 15259 or pollution inventory reporting which involves the determination of mass emissions and for the control of isokinetic conditions during manual sampling.
2. Calibration of flow AMS under EN 14181 and EN 16911-2 and/or Flow profile characterisation either to meet the requirements of the EU ETS Directive or any other regulatory requirements.
3. Any other periodic measurements under the requirements of the EU ETS Directive.

For simplicity any reference throughout this Technical Report to measurement objective 1, 2 or 3 refers to the above list.

I requisiti di incertezza richiesti dal TR-Draft in funzione dell'obiettivo del monitoraggio, sono differenti.

La norma definisce per l'applicazione dei contenuti della stessa i seguenti riferimenti:

- ISO 20988 – Qualità dell'aria – Linee guida per la stima delle incertezze di misura;
- ISO/IEC Guida 98-3 – Incertezza di misura – Parte 3: Guida alla espressione delle incertezze di misura;
- EN 14789 - Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in volume di ossigeno (O₂);
- EN 14790 - Emissioni da sorgente fissa - Determinazione del vapore acqueo in condotti;
- EN 15259:2007 - Qualità dell'aria - Misurazione di emissioni da sorgente fissa. Requisiti delle sezioni e dei siti di misurazione e dell'obiettivo, del piano e del rapporto di misurazione;

Determinazione puntuale della velocità assiale per mezzo di misure di pressione differenziale (Tubi di Pitot): Pitot S (Darcy).

In tutti i casi la misura è basata sul principio secondo cui una sonda munita di due o più fori viene immersa nel flusso gassoso in opportuna posizione, con un foro esposto al flusso gassoso ed almeno un foro esposto alla pressione statica; la velocità locale dell'effluente gassoso è direttamente proporzionale alla radice quadrata della differenza di pressione che si rileva tra i due rami.

Il calcolo della velocità dell'effluente gassoso effettuato a partire dalla misura di pressione differenziale richiede la conoscenza della densità dell'effluente stesso.

Questa viene determinata partendo dalla pressione assoluta nel condotto, dalla temperatura e dalla massa molare dell'effluente gassoso.

Ai fini della determinazione della massa molare è necessario conoscere:

- il tenore di umidità;
- il tenore di ossigeno;
- la concentrazione di anidride carbonica.

Questi dati devono essere determinati mediante i rispettivi metodi di riferimento o, in alternativa, prelevati dallo SME (se presente e sottoposto a procedure di gestione in qualità).

Nel caso di aria secca (umidità < 1%), la massa molare può essere assunta pari a 29 g/mol (1,294 kg/m³).

Misura delle dimensioni del condotto:

La misura dell'area interna del condotto deve essere eseguita mediante rilevazioni dimensionali dirette.

Non è ammesso il ricorso a disegni senza che le dimensioni in questi riportate, siano verificate.

Particolare attenzione deve essere posta nel caso si vogliano utilizzare misure esterne per quantificare quelle interne.

Questo approccio dovrebbe essere utilizzato solo se si è certi della costanza dello spessore delle pareti del condotto (coibentazioni interne od esterne aumentano il grado di incertezza).

Devono essere misurati la profondità dei bocchelli di accesso e lo spessore delle pareti del condotto, in corrispondenza di ogni bocchello di misura.

Per la misura diretta delle dimensioni interne del condotto possono essere utilizzati un misuratore laser o un'asta rigida (in questo secondo caso si dovrà tenere nel giusto conto l'effetto di dilatazione termica).

Le misure devono essere effettuate su almeno due assi del condotto.

Sopralluogo preliminare è necessario per:

Ottenere informazioni relative all'accesso alla sezione di misura, al numero, alla disposizione e alla tipologia di flange disponibili, alle condizioni della postazione di lavoro ed alla disponibilità dei servizi necessari;

Definire, sulla base di quanto sopra, un programma delle attività, con numero delle prove, durata, ora di inizio e ora di fine di ogni prova, individuando la strumentazione da utilizzare (l'area occupata dalla strumentazione deve essere inferiore o uguale al 5% dell'area della sezione di misura);

informare il gestore della necessità di disporre di tutte le informazioni necessarie e relative alla gestione del processo, durante tutto il periodo relativo all'esecuzione delle prove (procedura di comunicazione con sala controllo);

discutere con il gestore in merito alla finalità delle prove ed alla relativa necessità di esercire l'impianto per quanto possibile in condizioni stazionarie;

definire con il gestore eventuali assetti impiantistici da realizzare nel corso delle prove (cambio di combustibile o variazioni di portata), in funzione della finalità delle prove stesse;

discutere con il gestore in merito alla eventuale presenza di periodicità nelle emissioni (variazioni da picco a picco >10%), in modo da poter programmare durate delle misure che permettano di mediare tali periodicità.

Requisiti della piattaforma di lavoro (UNI EN 15259:2008):

- il numero e la tipologia di bocchelli di accesso deve essere tale da permettere la misura di tutte le grandezze necessarie, dovendo altresì permettere, se necessario, l'esplorazione di tutto il condotto di misura (per distanze tra bocchello di misura e parete opposta oltre i 2 metri è conveniente avere due bocchelli di accesso in posizione diametralmente opposta);
- la capacità di carico della piattaforma di lavoro (fissa o mobile) deve essere sufficiente (fino a 6 persone e ad un massimo di 300 kg di strumentazione); nel caso di piattaforme temporaneamente installate, queste dovranno essere assicurate alle strutture fisse e verificate secondo i requisiti di legge;
- la piattaforma di lavoro dovrà essere tale da assicurare sufficiente altezza ed area di lavoro; deve essere previsto spazio sufficiente per manipolare tutti i dispositivi necessari, con particolare riferimento all'inserimento/estrazione delle sonde;

Requisiti del sito di misura (UNI EN 15259:2008):

- disponibilità di alimentazione elettrica, opportunamente dimensionata;
- accesso facile e sicuro al sito di misura;
- mezzi di sollevamento della strumentazione (montacarichi o ascensori), per siti non al livello del terreno;
- non vi devono essere sorgenti di emissione improvvisa (dischi di rottura, valvole di sfiato o scarichi di vapore);
- nel condotto non vi deve essere pressione positiva;
- deve essere previsto un sistema di comunicazione in base al quale allertare le figure che eseguono le misure, di eventuali situazioni potenzialmente pericolose per esse;
- area di lavoro protetta da calore e polvere;
- protezione dalle intemperie e più in generale protezione da condizioni ambientali che possono avere influenza significativa sulla operatività di coloro che effettuano le misure e sulla strumentazione utilizzata.

Individuazione del numero dei punti di misura:

Dal diametro interno è possibile procedere alla determinazione del numero e della posizione dei punti di misura. Il numero (minimo) di punti di misurazione dipende dalle dimensioni e dalla forma del condotto.

Per condotti circolari il numero minimo di punti di misura è riportato di seguito.

del piano di misura [m ²]	Diametro del condotto [m]	Minimo numero di linee di misura	Minimo numero di punti di misura del piano
< 0.1	< 0.35	-	1 ^a
Da 0.1 a 1	Da 0.35 a 1.1	2	4
Da 1.1 a 2	Da 1.1 a 1.6	2	8
> 2	>1.6	2	Almeno 12 e 4 per m ^{2b}

^a Un solo punto di misura può portare ad un aumento delle incertezze di misura rispetto a quelle stimate nel metodo
^b Per condotti di grandi dimensioni 20 punti di misura sono generalmente sufficienti

La norma specifica che nel caso i requisiti minimi per il piano di misura non siano soddisfatti, un miglioramento della rappresentatività del campionamento può essere ottenuto aumentando il numero di punti di misura oltre quello indicato.

Per condotti rettangolari il numero minimo di punti di misura è riportato di seguito.

Area del piano di misura [m ²]	Minimo numero di divisioni del lato ^a	Minimo numero di punti di misura
< 0.1	-	1 ^b
Da 0.1 a 1	2	4
Da 1.1 a 2	3	9
> 2	≥3	Almeno 12 e 4 per m ^{2c}

^a Se il rapporto tra la lunghezza del lato maggiore e quella del lato minore è > 2 , può essere necessaria una ulteriore suddivisione del lato di lunghezza maggiore.
^b Un solo punto di misura può portare ad un aumento delle incertezze di misura rispetto a quelle stimate nel metodo
^c Per condotti di grandi dimensioni 20 punti di misura sono generalmente sufficienti

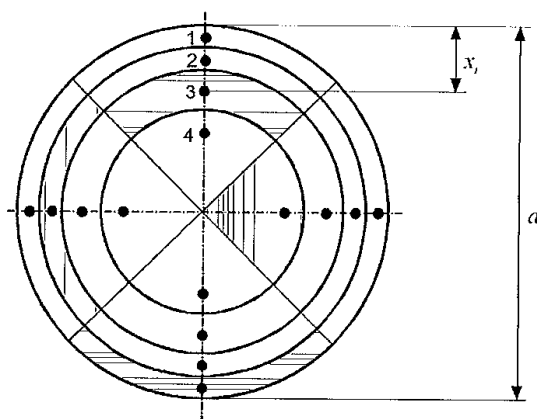
Una volta individuato il numero di punti di misura è possibile determinarne la posizione.

Per condotti circolari la UNI EN 15259:2008 prevede due metodi.

Nel metodo generale la sezione è suddivisa in aree uguali, i punti di misura sono posizionati sulle due linee di misura ed uno al centro del condotto.

La UNI EN 16911-1:2013 esclude l'uso di questo metodo in quanto nel punto centrale si rileva una velocità che è la massima e non la media della corrispondente porzione di sezione.

Nel metodo tangenziale la sezione è suddivisa in aree uguali, i punti di misura sono posizionati sulle due linee di misura ed è escluso il centro del condotto.



$$X_i = \frac{d}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{n_d}} \right] \quad i \leq \frac{n_d}{2}$$

$$X_i = \frac{d}{2} \left[1 + \sqrt{\frac{2i-1}{n_d} - 1} \right] \quad i \geq \frac{n_d}{2}$$

con

$n_d =$ è il numero di punti su un diametro.

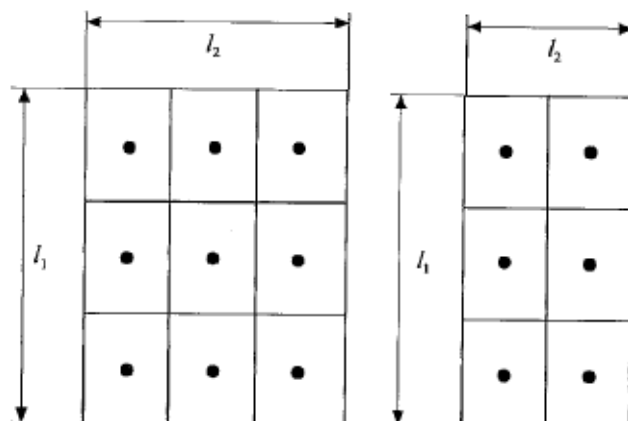
$i =$ è l'indice del punto di misura su un diametro.

Per condotti rettangolari la UNI EN 15259:2008 prevede due casistiche:

La sezione è suddivisa in aree uguali, i punti di misura sono posizionati al centro delle aree.

In generale (caso a)) i due lati sono divisi nello stesso numero di segmenti, replicando per ogni porzione la forma del condotto.

Nel caso il rapporto tra la lunghezza del lato lungo e quella del lato corto sia maggiore di 2 (caso b)), il lato lungo può essere suddiviso in un numero maggiore di segmenti.



a) $\frac{l_1}{l_2} \leq 2$

b) $\frac{l_1}{l_2} > 2$

Prima di dare inizio ad una serie di misure o ogni volta che il sistema viene disconnesso (in funzione di quale evento è più frequente) dovrebbe essere effettuato un test delle perdite.

Test di tenuta:

Questo si effettua pressurizzando i due rami del Tubo di Pitot ad un valore almeno pari alla pressione statica presente nel condotto sul quale si effettuano le prove e chiudendo il Tubo. La lettura di pressione dovrebbe rimanere stabile per almeno 5 minuti.

Test di stagnazione:

Se si utilizza un Tubo di Pitot S, una volta che questo è stato posizionato perpendicolarmente alla direzione del flusso gassoso. Utilizzando i due rami per la misura della pressione statica, la differenza tra i due valori deve essere inferiore a 10 Pa.

Una volta individuati i punti di misura è opportuno procedere (specialmente nel caso non siano mai state effettuate misure su quella sezione di misura) ad una ispezione preliminare.

Ispezione Preliminare:

- In particolare deve essere verificato che ad ogni punto di misura l'angolo tra la direzione del flusso gassoso e l'asse del condotto sia inferiore a 15° (UNI EN 13284-1:2003, Appendice B);
- Non vi siano flussi negativi locali;
- La velocità minima sia superiore al limite di quantificazione del metodo utilizzato (per tubi di Pitot una pressione differenziale superiore a 5 Pa);
- Il rapporto tra la velocità locale più alta e quella più bassa sia inferiore a 3:1.

Se i risultati di precedenti misure o la geometria della sezione di misura sono tali da far ipotizzare la presenza di flussi tangenziali o di vortici, è necessario procedere alla quantificazione degli stessi, per ognuno dei punti definiti.

Nel caso l'angolo del flusso tangenziale rispetto all'asse del condotto (angolo di swirl) superi in almeno un punto i 15°, allora questo ha una influenza significativa sulle misure da effettuare.

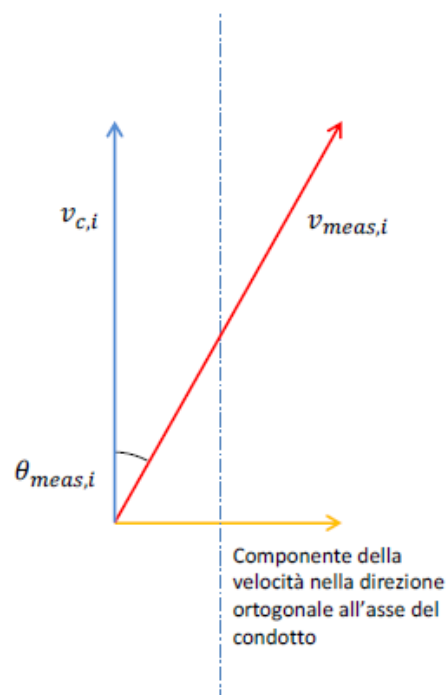
In tali casi, la velocità relativa all'*i*-esimo punto, corretta per la direzione del flusso è data da:

$$v_{c,i} = \cos\theta_{meas,i} v_{meas,i}$$

dove:

$\cos\theta_{meas,i}$: è il coseno dell'angolo di swirl rilevato sull'*i*-esimo punto

$v_{meas,i}$: è la velocità rilevata in corrispondenza della direzione corrispondente all'angolo θ_{mis}



Effettuazione delle misure:

Nel caso di utilizzo di tubi di Pitot, per ogni punto di misura determinare il valore medio della pressione differenziale per almeno un minuto, come media di almeno tre letture istantanee nel corso del minuto.

Solitamente i manometri elettronici di uso comune dedicati, forniscono direttamente la lettura del valore medio.

Nel caso siano utilizzati due dispositivi registrare le letture da entrambi.

Per ognuno dei punti occorre inoltre registrare, ove necessario, la temperatura, ossigeno, umidità e CO₂.

Tali dati servono per la determinazione della densità dell'effluente gassoso.

Registrare la pressione atmosferica durante le prove.

Al termine della procedura di misurazione si disporrà dunque dei seguenti dati:

- $\Delta P_i, \Delta P_j$: nel caso di utilizzo dei tubi di Pitot;
- $\Delta P_{R,i,j}$: nel caso di utilizzo dei tubi di Pitot;
- θ_i, θ_j : angolo di disallineamento (ove sia stato verificato) tra flusso e asse del condotto (swirl);
- $T_i, T_j, T_{R,i,j}$: temperatura assoluta dell'effluente gassoso nei diversi punti di affondamento e nel punto fisso;
- $\varphi_{O_2,w}, \varphi_{CO_2,w}, \varphi_{H_2O}$: frazioni volumetriche percentuali medie (con riferimento alla durata della misura) di O₂, CO₂, H₂O, presenti nell'effluente;
- P_{atm} : pressione atmosferica media nel sito di misurazione (con riferimento alla durata della misura);
- $P_{stat,i}, P_{stat,j}$, pressione statica nel condotto (almeno un misura per diametro esplorato).

In prima battuta si procede (nel caso di utilizzo di tubi di Pitot) alla determinazione delle velocità sui singoli $v_i, v_j \in R, i, j$ (non necessario se utilizzato uno SME) per mezzo delle:

$$v_i = k \sqrt{\frac{2\Delta p_i}{\rho}}$$

Dove:

$\overline{\Delta p_i}$ è la media temporale della pressione differenziale misurata in corrispondenza dell'iesimo punto, espresso in Pa;

k è il coefficiente del Tubo di Pitot utilizzato, che comprende il fattore di taratura nonché correzioni derivanti dallo specific design;

ρ è la densità dell'affluente gassoso espresso in Kg/m³ alle condizioni presenti nel condotto .

$$p = \frac{MP_c}{RT_c}$$

Dove:

M è la massa molare dell'affluente gassoso umido in Kg/mol;

P_c è la pressione assoluta nel condotto in Pa;

R è la costante dei gas (8.31J/K*mol);

T_c è la temperature dell'effluente gassoso nel condotto in K.

La pressione assoluta nel condotto P_c è data dalla somma della pressione atmosferica nel sito P_{atm} e della pressione static nel condotto $\overline{P_{stat}}$

$$P_c = P_{atm} + \overline{P_{stat}}$$

La pressione statica è la media dei valori rilevati in uno o più punti nel piano di misura.
La massa molare dell'effluente gassoso, espressa in Kg/mol, si calcola come di seguito:

$$M = 10^{-5} x \sum_{B=1}^q (M_B \varphi_B)$$

Dove:

M_B è la massa molare del B-esimo componente, in Kg/mol;

φ_B è la frazione volumetrica del B-esimo componente espresso in termini percentuali.

Nei casi in cui non siano presenti componenti in termini percentuali, oltre O₂, H₂O, CO₂ e N₂, la massa molare, espressa in Kg/mol, si determina con buona approssimazione, secondo la seguente formula:

$$M = 10^{-5} x [32\varphi_{O_{2,w}} + 44\varphi_{CO_2} + 18\varphi_{H_2O} + 28(100 - \varphi_{O_{2,w}} - \varphi_{CO_2} - \varphi_{H_2O})]$$

Individuati i valori puntuali di velocità eventualmente corretti secondo quanto sopra, è possibile procedere al calcolo della velocità media nel condotto, secondo la:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

Per semplicità di presentazione con "n" si intende la somma dei punti individuati sulla totalità dei diametri esplorati.

Occorre sempre tenere presente che la formula sopra riportata è valida solo nel caso si sia fatto riferimento, nella definizione dei punti trasversi, alla regola tangenziale della UNI EN 15259:2008, la quale suddivide la sezione di misura in aree uguali, intendendo la velocità rilevata in ogni punto quella media relativa alla singola porzione di area.

La portata volumetrica $q_{v,w}$ nelle condizioni dell'effluente gassoso nel condotto (tal quali) è data da:

$$q_{v,w} = \bar{v} A_I$$

Dove:

\bar{v} è la velocità media all'interno del condotto in m/s, eventualmente corretta secondo quanto riportato in precedenza

A_I è l'area del piano di misura, in m².

I risultati delle misure potrebbero essere espressi come «tal quali» o riportati a condizioni di riferimento.

La scelta su quali siano le condizioni cui riferire i risultati dipende dallo scopo delle misure e dalla disponibilità dei dati.

Dunque se lo scopo delle misure è quello di tarare uno SME, le misure dovranno essere espresse nelle stesse unità nelle quali lo SME le rileva.

Analogamente se lo scopo è quello di determinare il flusso di massa di un determinato inquinante, entrambe (portata e concentrazione) dovrebbero essere espresse con riferimento alle stesse condizioni.

La logica da seguire è comunque quella di evitare calcoli diconversione, non necessari, che immancabilmente comportano un aumento delle incertezze di misura associate.

Stante quanto sopra, la portata volumetrica a condizioni normali (273,15 K e 101,325 kPa), su base secca e ad un tenore di ossigeno di riferimento è calcolata partendo dal valore tal quale secondo la:

$$q_{v,0,d,o_2} = q_{v,w} \times \frac{p_c}{101.325} \times \frac{273.15}{T_c} \times \frac{100 - \varphi_{H_2O}}{100} \times \frac{21 - \varphi_{O_{2,d}}}{21 - \varphi_{O_{2,ref}}}$$

Dove:

$\varphi_{O_{2,d}}$ è il tenore di ossigeno misurato nel condotto durante le prove, espresso come %(v/v) e su base secca;

p_c è la pressione assoluta misurata nel condotto durante le prove, espresso in kPa;

T_c è la temperature misurata nel condotto durante le prove, espresso in K;

φ_{H_2O} è il contenuto di umidità presente nell'effluente durante le prove, espresso come %(v/v).