

ARPAE
Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia
dell'Emilia - Romagna

* * *

Atti amministrativi

Deliberazione del Direttore Generale	n. DEL-2019-66 del 20/06/2019
Oggetto	Direzione Generale. Approvazione Protocollo di indagine per lo svolgimento di campagne periodiche di misura ai fini della determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione presso l'inceneritore di rifiuti sanitari della Mengozzi S.p.A.
Proposta	n. PDEL-2019-62 del 17/06/2019
Struttura proponente	Direzione Generale
Dirigente proponente	Bortone Giuseppe
Responsabile del procedimento	Mordenti Tamara

Questo giorno 20 (venti) giugno 2019 (duemiladiciannove), presso la sede di Via Po n. 5, in Bologna, il Direttore Generale, Dott. Giuseppe Bortone, delibera quanto segue.

Oggetto: Direzione Generale. Approvazione Protocollo di indagine per lo svolgimento di campagne periodiche di misura ai fini della determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione presso l'inceneritore di rifiuti sanitari della Mengozzi S.p.A.

VISTA:

- la L.R. 19 aprile 1995, n. 44, che istituisce l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente dell'Emilia-Romagna (Arpa), quale ente strumentale della Regione Emilia-Romagna preposto all'esercizio delle funzioni tecniche per la prevenzione collettiva e per i controlli ambientali, nonché all'erogazione di prestazioni analitiche di rilievo sia ambientale che sanitario;
- la L.R. n. 13 del 30 luglio 2015, attuativa della Legge n. 56/2014, con la quale la Regione Emilia-Romagna è intervenuta sull'impianto di governo locale ridefinendo il ruolo dei diversi livelli istituzionali sul territorio regionale e delineando un sistema di governance multilivello nell'ambito del quale l'esercizio delle competenze ex provinciali in materia di ambiente ed energia è stato trasferito alla nuova Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna (Arpae);
- che la suddetta Agenzia, operativa a partire dal 1° gennaio 2016 a seguito del trasferimento di una prima parte del personale addetto allo svolgimento delle nuove funzioni, subentra ad Arpa Emilia-Romagna quale nuovo centro di competenza interistituzionale a cui la Regione ha demandato l'esercizio delle funzioni ex provinciali in materia di ambiente ed energia e svolge, per l'effetto, le funzioni di concessione, autorizzazione, analisi, vigilanza e controllo nei settori ambientali ed energetico;

PREMESSO:

- che con Deliberazione di Giunta n. 2357 del 21/12/2016 la Regione Emilia-Romagna ha approvato il provvedimento di VIA del progetto relativo alle modifiche gestionali e potenziamento trattamento fumi dell'impianto di termovalorizzazione nel sito di Via Zotti nel Comune di Forlì proposto da Mengozzi S.p.A., comprensivo dell'Autorizzazione Integrata Ambientale n. 506/2017;
- che la prescrizione n. 11 del dispositivo della suddetta D.G.R. n. 2357/2016 dispone quanto segue: *“Dovranno essere effettuate, in un punto quanto più prossimo possibile alla camera di post-combustione, e a valle di questa, campagne periodiche per la misura dei parametri di portata, temperatura, pressione e umidità del flusso gassoso al fine di procedere al calcolo e alla verifica della portata trattata in camera di post-combustione*

nelle condizioni indagate. La frequenza e la modalità di svolgimento delle campagne sono definite dall'Autorizzazione Integrata Ambientale”;

- che la prescrizione n. 2 dell'AIA dispone quanto segue: *“Il Gestore, al fine di assicurare il costante controllo delle attività di combustione e il monitoraggio delle caratteristiche dei fumi, oltre alle dotazioni già descritte dovrà:*
 - *Effettuare in un punto quanto più prossimo possibile alla camera di post combustione, e a valle di questa, campagne periodiche per la misura dei parametri di portata, temperatura, pressione e umidità del flusso gassoso al fine di procedere al calcolo e alla verifica della portata trattata in camera di post-combustione nelle condizioni indagate. La frequenza e la modalità di svolgimento delle campagne nonché il procedimento analitico che si intende seguire per ricondurre i valori misurati ai valori di portata dei fumi all'uscita della camera di post-combustione, dovranno essere oggetto di specifica Proposta di indagine avanzata dal Gestore entro sei mesi dalla data di efficacia di AIA e oggetto di specifico protocollo da definirsi successivamente da parte di Arpae, previa valutazione del Comune di Forlì.”;*

PREMESSO INOLTRE:

- che in data 24/07/2017 è pervenuta ad Arpae la “Proposta di indagine riguardante le modalità di effettuazione di campagne periodiche di misura per la determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione”, acquisita al protocollo di Arpae con n. PGFC/2017/11198 e trasmesso dall’Agenzia al Comune di Forlì in data 2/10/2017;
- che il rapporto ambientale relativo al termovalorizzatore dei rifiuti sanitari di Forlì noto come “Mengozzi” prescrive l'istituzione di un Comitato Tecnico Permanente con il compito di valutare i risultati dei monitoraggi della qualità dell'aria, dei reflui liquidi e dei rifiuti prodotti ed i risultati dei monitoraggi relativi al Piano di Monitoraggio e Controllo di VIA e AIA, anche in riferimento alle verifiche del funzionamento delle camere di post-combustione e di tutti gli altri apparati, nonché gli esiti delle visite ispettive di AIA, allo scopo di valutare i livelli prestazionali dell'impianto nelle diverse matrici ambientali;
- che la Regione Emilia-Romagna ha ritenuto che la costituzione di un Tavolo Tecnico-Scientifico (TTS), con la presenza di esperti appartenenti agli Enti di controllo o designati da questi, all’Amministrazione Comunale di Forlì, all’Università ed a Mengozzi S.p.A., potesse garantire il necessario approfondimento degli aspetti tecnici e delle valutazioni ambientali relative alle caratteristiche dell’impianto ed alle relative emissioni in atmosfera e immissioni, scarico dei reflui liquidi e produzione e smaltimento dei rifiuti prodotti dal processo d’incenerimento e ausiliari, temi di attenzione per la collettività;

- che con D.D.G. Arpae n. 24 del 10/03/2017 è stato approvato lo schema di Protocollo di intesa tra Regione Emilia-Romagna, Arpae, AUSL della Romagna, Comune di Forlì, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna e Mengozzi S.p.A., per la costituzione di un Tavolo Tecnico-Scientifico volto all'espletamento di attività di ricerca a supporto del Comitato Tecnico Permanente dell'inceneritore di rifiuti speciali sanitari di Forlì;
- che in data 21/02/2018 il Comune di Forlì ha inoltrato al TTS e ad Arpae la relazione elaborata dai consulenti TM3Ambiente, demandando gli opportuni approfondimenti al Tavolo Tecnico Scientifico istituito con D.G.R. n. 2381/2016 e di cui alla citata D.D.G. Arpae n. 24/2017;

CONSIDERATO:

- che il Comitato Tecnico Permanente, nella seduta del 8/02/2018 ha concordato *“di rimanere in attesa della comunicazione da parte del Comune di Forlì sulla valutazione della proposta di indagine redatta dal proponente e sopra menzionata, nonché gli esiti dei lavori del TTS, per convocare una nuova seduta”*;

VISTI:

- gli esiti della seduta del TTS del 29/06/2018 di seguito riportati: *“Il prof. Cozzani quindi dà seguito a quanto richiesto dal Comune di Forlì in merito alla Campagna di Monitoraggio, valutando favorevolmente la proposta, che necessita comunque di approfondimenti e precisazioni da svolgersi più opportunamente nell’ambito della stesura del protocollo di misura. Il Comune di Forlì chiede che il Tavolo valuti il protocollo. I componenti del tavolo concordano e danno mandato ad Arpae e Mengozzi SpA, con la collaborazione del DICAM, di redigere il protocollo e proporlo alla prossima seduta del tavolo, anche attraverso un sopralluogo all’impianto come già concordato”*;
- gli esiti della seduta del TTS del 16/11/2018, nella quale è stata presentata la bozza di protocollo e si sono concordate le opportune modifiche;

VISTO INFINE:

- il *“Protocollo di indagine per lo svolgimento di campagne periodiche di misura ai fini della determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione presso l’inceneritore di rifiuti sanitari della Mengozzi S.p.A.”*, allegato al presente atto sub A) quale parte integrante e sostanziale, predisposto dal Servizio Territoriale di Forlì-Cesena di Arpae congiuntamente al DICAM e al TTS;

DATO ATTO:

- che al suddetto Protocollo di indagine sono allegati i seguenti documenti:

- Allegato A: Proposta di indagine riguardante le modalità di effettuazione di campagne periodiche di misura per la determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione a cura del Gestore di AIA – Mengozzi S.p.A.;
- Allegato B: Programma di monitoraggio per la determinazione della portata in uscita dalla camera di post-combustione;
- Allegato C: Formulario di acquisizione dati di processo;

VISTO:

- il parere favorevole espresso in data 30/05/2019 dal Comune di Forlì sul Protocollo di cui trattasi (acquisito agli atti da Arpae con protocollo n. PG/2019/86692);

RITENUTO:

- pertanto, al fine di dare seguito alle prescrizioni sopracitate, di approvare il “Protocollo di indagine per lo svolgimento di campagne periodiche di misura ai fini della determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione presso l’inceneritore di rifiuti sanitari della Mengozzi S.p.A.”, allegato sub A) al presente atto quale parte integrante e sostanziale, comprensivo di allegati A, B e C;

SU PROPOSTA:

- del Direttore Generale, Dott. Giuseppe Bortone, il quale ha espresso parere favorevole in merito alla regolarità amministrativa del presente provvedimento;

DATO ATTO:

- del parere favorevole del Direttore Amministrativo, Dott.ssa Massimiliana Razzaboni, e del Direttore Tecnico, Dott. Franco Zinoni, reso ai sensi dell’art. 9 della L.R. 44/95;
- che il responsabile del procedimento, ai sensi della L. n. 241/90, è la Dott.ssa Tamara Mordenti del Servizio Autorizzazioni e Concessioni di Forlì-Cesena;

DELIBERA

1. di approvare, per le motivazioni esposte in premessa, il “Protocollo di indagine per lo svolgimento di campagne periodiche di misura ai fini della determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione presso l’inceneritore di rifiuti sanitari della Mengozzi SpA”, allegato sub A) al presente atto quale parte integrante e sostanziale, comprensivo di allegati A, B e C.

PARERE: FAVOREVOLE

IL DIRETTORE AMMINISTRATIVO

(F.to Dott.ssa Massimiliana Razzaboni)

IL DIRETTORE TECNICO

(F.to Dott. Franco Zinoni)

IL DIRETTORE GENERALE

(F.to Dott. Giuseppe Bortone)

PROTOCOLLO DI INDAGINE PER LO SVOLGIMENTO DI CAMPAGNE PERIODICHE DI MISURA AI FINI DELLA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DEI FUMI IN CAMERA DI POST-COMBUSTIONE PRESSO L'INCENERITORE DI RIFIUTI SANITARI DELLA MENGOZZI SPA

Premesso

- che con provvedimento di VIA DGR 2357 del 21/12/2016 si sono approvate modifiche impiantistiche all'inceneritore di rifiuti sanitari della Ditta Mengozzi SpA del Gruppo Ecoeridania
- che l'Autorizzazione Integrata Ambientale DET-AMB-2016-506 del 7/3/2016 contestualmente rilasciata, e s.m.i. alla Sezione D Sezione di adeguamento dell'impianto e condizione di esercizio § D1 punto 2), in recepimento della prescrizione n. 11 del provvedimento di VIA soprarichiamato, prescrive quanto segue: *“effettuare in un punto quanto più prossimo possibile alla camera di post-combustione, e a valle di questa, campagne periodiche per la misura dei parametri di portata, temperatura, pressione e umidità del flusso gassoso al fine di procedere al calcolo e alla verifica della portata trattata in camera di post-combustione nelle condizioni indagate. La frequenza e la modalità di svolgimento delle campagne nonché il procedimento analitico che si intende seguire per ricondurre i valori misurati ai valori di portata dei fumi all'uscita della camera di postcombustione, dovranno essere oggetto di specifica Proposta di indagine avanzata dal Gestore entro sei mesi dalla data di efficacia di AIA e oggetto di specifico protocollo da definirsi successivamente da parte di Arpae, previa valutazione del Comune di Forlì”*.
- che la prescrizione di cui sopra ha la finalità di pervenire ad una stima indiretta della portata in camera di post-combustione conseguente alla impraticabilità di procedere alla misura diretta a causa delle elevate temperature presenti e dei limiti tecnologici degli strumenti di misura (oltre che alle condizioni del flusso gassoso al suo interno).
- che con DGR 2381 del 21/12/2016 si è stabilita la costituzione di un tavolo tecnico scientifico (TTS), con la presenza di esperti che appartengono agli Enti di Controllo (o da questi designati) all'Amministrazione Comunale di Forlì, all'Università e da Mengozzi Spa, al fine di garantire il necessario approfondimento degli aspetti tecnici e delle valutazioni ambientali relative alle caratteristiche dell'impianto ed alle relative emissioni in atmosfera e immissioni, scarico dei reflui liquidi e produzione e smaltimento dei rifiuti prodotti dal processo d'incenerimento e ausiliari, temi di attenzione per la collettività;
- che con l'avvio dei lavori del TTS, si è intrapreso un percorso condiviso che, avvalendosi della competenza del DICAM dell'Università di Bologna, si pone altresì l'obiettivo di integrare l'indagine prescritta con l'acquisizione di altri dati al fine di pervenire alla messa a punto di modalità gestionali di carattere innovativo, in una logica di continuo miglioramento e ottimizzazione delle performances ambientali e di sostenibilità dei processi produttivi.

Vista la proposta trasmessa dalla Mengozzi SpA, in ottemperanza della prescrizione di cui in premessa, di seguito denominata **Proposta di indagine del Gestore**, come esplicitata nel Documento intitolato *Proposta di indagine riguardante le modalità di effettuazione di campagne periodiche di misura per la determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione*, del 21/7/2017, predisposta dal Dott.Ing A.Rosetti, Dott.Ing G.Bellani e dal Prof. A.Talamelli del CIRI (Professore Ordinario di Fluidodinamica dell'Università di Bologna, Direttore del Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale Aeronautica, Coordinatore del Progetto CICLoPE a Predappio (FC)), **Allegato A** al presente Protocollo.

Il documento descrive:

- le motivazioni alla base della metodologia di misura scelta
- la metodologia di misura proposta
- le regolazioni dell'impianto durante la procedura di misura
- le conclusioni delle misure preliminari eseguite al fine di definire entità e qualità delle fluttuazioni nel flusso, ottimizzazione del tempo di misura di velocità nei singoli punti della sezione, numero e distribuzione di punti in ciascuna sezione di misura
- la definizione delle misure e metodologie nelle varie sezioni
- la modalità di elaborazione dei dati ai fini della stima della portata in camera di post-combustione e della valutazione relativa all'incertezza di tale stima

Richiamati i confronti tecnici tra i docenti e collaboratori dell'Università di Bologna Prof. V. Cozzani del DICAM e Prof A. Talamelli del CIRI (quest'ultimo incaricato dalla Mengozzi SpA) che hanno convenuto di sintetizzare e formalizzare nella **Tabella Allegato B** la modalità di esecuzione dei campionamenti e le condizioni di assetto dell'impianto durante le attività di campionamento

Richiamata la valutazione del Comune di Forlì espressa con nota del 30/05/2019;

Considerato che la **Proposta di indagine del Gestore, Allegato A**, come integrata dalla **Tabella Allegato B**, è condivisa nella metodologia, nella modalità di esecuzione e nella modalità di analisi e restituzione del valore di stima della portata in camera di post-combustione.

TRA

ARPAE E DITTA MENGOZZI SPA

SI CONVIENE QUANTO SEGUE

Art 1. Obiettivi del Protocollo

Obiettivo del Protocollo è:

- la definizione puntuale della modalità di esecuzione delle campagne di misura, dell'acquisizione dei parametri di processo e di tutto ciò che si conviene necessario ai fini della determinazione del valore di portata dei fumi di combustione nelle camere di post-combustione

Art 2. Modalità di esecuzione dei campionamenti

1. La Mengozzi SpA in attuazione della prescrizione di cui al punto 2 § D1 dell'AIA DET-AMB2016-506 del 7/3/2016 e s.m.i, si impegna ad attuare campagne di misura volte a determinare, le

caratteristiche chimico-fisiche dei fumi di combustione in corrispondenza di tre sezioni del condotto a valle della camera di post-combustione, secondo le modalità definite nella **Proposta del Gestore, Allegato A**, come schematizzata ed integrata nella **Tabella Allegato B**, allegata al presente Protocollo;

2. Le campagne di misura dovranno essere attuate nel numero di almeno due, intervallate da almeno 4 mesi ed eseguite: la prima nel periodo luglio-settembre 2019, la seconda nel periodo gennaio-marzo 2020. Eventuali scostamenti dal programma saranno concordati tra le parti.
3. Ogni campagna di misura dovrà essere costituita da almeno tre misurazioni, una per ognuno dei tre assetti d'impianto (carico di rifiuti alimentati) definiti alla voce "*Assetto impianto, configurazione con generatore di vapore in esercizio*".
4. Le attività di determinazione delle grandezze fisiche indagate e delle composizioni volumetriche dei fumi dovranno essere eseguite da Laboratorio certificato e accreditato almeno per la UNI 17025:2018, 16911:2013, e da personale adeguatamente formato e abilitato, e attuate in conformità alle normative tecniche indicate al § 3.1 della Proposta del Gestore, con le eventuali modifiche delle specifiche ivi indicate. Le attività dovranno essere oggetto di Verbali di campionamento sottoscritte dal personale che effettua le misurazioni.
5. Le date di avvio delle operazioni dovranno essere concordate con Arpae - Sezione di Forlì-Cesena.
6. Durante le misurazioni dovranno essere acquisiti anche i dati riportati nella Tabella Allegato B alla voce "*Altri dati da acquisire durante le misurazioni*".
7. L'avvenuta sincronizzazione tra i dati ottenuti con i campionamenti e i dati acquisiti dalla strumentazione d'impianto e dallo SME ("*Altri dati da acquisire durante le misurazioni*") dovrà essere esplicitamente riportata mediante l'utilizzo del **formulario Allegato C**.
8. Al termine di ciascuna campagna di misura dovrà essere inoltrato ad Arpae l'Elaborato contenente i dati relativi alle misure effettuate, gli *altri dati* (carico orario dei rifiuti, parametri misurati allo SME etc.), la Scheda di sincronizzazione (Allegato C), e i dati relativi alla conduzione dell'impianto. I dati dovranno essere forniti anche in formato xls o equivalente, con appropriata denominazione (variabile e tag) e indicazione dell'orario di acquisizione.

Art 3 Stima della portata in camera di post-combustione

Entro tre mesi dalla conclusione delle attività di indagine il Gestore trasmette una bozza dell'Elaborazione dei dati effettuata secondo le modalità di calcolo di cui ai § da 3.5 a 3.7 della *Proposta del Gestore*, fornendo la stima della portata effettuata, la stima dell'incertezza di misura associata alla misura della portata a valle del generatore di vapore, la stima dell'incertezza composta associata alla stima della portata in camera di postcombustione.

A seguito della verifica del documento di Elaborazione dei dati, il Gestore si impegna a fornire gli approfondimenti richiesti da Arpae su indicazione del DICAM, al fine di pervenire nei successivi mesi due alla stesura del documento finale che verrà inoltrato ad Arpae.

Il Gestore

Il Direttore Generale di Arpae

ALLEGATO A

Proposta di indagine riguardante le modalità di effettuazione di campagne periodiche di misura per la determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione

**IMPIANTO DI TERMOVALORIZZAZIONE
MENGOZZI S.P.A.**

**PROPOSTA DI INDAGINE RIGUARDANTE LE
MODALITA' DI EFFETTUAZIONE DI
CAMPAGNE PERIODICHE DI MISURA PER LA
DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DEI
FUMI IN CAMERA DI POST-COMBUSTIONE**

Preparato da:

Alessandro Rossetti

Gabriele Bellani

Alessandro Talamelli

Approvato da:

Alessandro Talamelli

Forlì, 21 Luglio 2017



Laboratorio di
Fluidodinamica CICLoPE

Università degli studi di
Bologna



Indice

1. Introduzione	1
Obiettivo	1
1.1 Analisi dell'oggetto di indagine e motivazioni alla base della metodologia di misura scelta	1
1.2 Metodologia di misura proposta: linee guida	3
1.3 Regolazione dell'impianto durante la procedura di misura	5
2. Messa a punto del protocollo di misura – Misure preliminari	7
2.1 Motivazioni e considerazioni	7
2.2 Obiettivi delle misure preliminari	7
2.3 Specifiche delle misure preliminari	9
2.4 Risultati delle misure preliminari: analisi delle serie temporali	10
2.5 Risultati delle misure preliminari: analisi dei profili di velocità	11
2.6 Conclusioni misure preliminari	13
3. Protocollo di misura	14
3.1 Definizione delle misure e metodologie nelle varie sezioni	14
3.2 SEZIONE S1 –Uscita camera di post-combustione	15
3.3 SEZIONE S2 –Uscita generatore di vapore	16
3.4 SEZIONE S3 – Superficie distribuita generatore di vapore – ambiente esterno	20
3.5 Elaborazione dati – Integrazione del profilo di velocità	21
3.6 Stima della portata in camera di post-combustione	24
3.7 Incertezza della portata in camera di post-combustione	26
3.8 Programma di monitoraggio proposto	27
Conclusioni	28
Riferimenti bibliografici	29

1. Introduzione

Obiettivo

Il documento in oggetto propone una metodologia sperimentale per la misura e la stima della portata dei fumi in uscita dalla camera di post-combustione prodotti dal processo di combustione di rifiuti sanitari.

La metodologia, per le caratteristiche peculiari dell'impianto e dell'oggetto di indagine è stata sviluppata espressamente per caratterizzare la portata dell'impianto di termovalorizzazione di rifiuti sanitari di proprietà della Mengozzi S.p.A.

In particolare la procedura si propone di ricavare una stima della portata in uscita dalla camera di post-combustione dell'impianto, mediante la misura sperimentale della portata in una sezione a valle del generatore di vapore e a monte del sistema di filtraggio e lavaggio dei fumi.

L'approccio descritto nel documento si rende necessario a causa della difficoltà nell'effettuare una misura di portata attendibile in camera di post-combustione, zona caratterizzata da temperature dei fumi variabili tra i 1100 °C e 1200°C e da una elevata concentrazione e dimensione del particolato in sospensione nei fumi; tali caratteristiche rendono impraticabile qualsiasi misura e stima diretta del campo di moto mediante le tecniche e con le strumentazioni proposte dalle norme UNI 10169 del 2001 e successiva UNI EN-ISO 16911-1 del 2013.

1.1. Analisi dell'oggetto di indagine e motivazioni alla base della metodologia di misura scelta

La prescrizione di cui al punto 11 della Delibera della Giunta Regionale n. 2357/2016 del 21.12.2016 stabilisce che la Mengozzi S.p.A. effettui, in un punto quanto più prossimo possibile alla camera di post-combustione, e a valle di questa, campagne periodiche per la misura dei parametri di portata, temperatura, pressione e umidità del flusso gassoso al fine di procedere al calcolo e alla verifica della portata trattata in camera di post-combustione, e la prescrizione n. 2 primo punto dell'Autorizzazione Integrata Ambientale stabilisce che la Mengozzi S.p.A. presenti una proposta di indagine in cui vengano illustrate la frequenza e la modalità di svolgimento di tali campagne, nonché il procedimento analitico che si intende seguire per ricondurre i valori misurati ai valori di portata dei fumi all'uscita della camera di post-combustione.

Pertanto, al fine di ottemperare a tale prescrizione, Mengozzi S.p.A. ha incaricato il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale Aeronautica (CIRI) dell'Università di Bologna della redazione del presente *Proposta di indagine riguardante le modalità di effettuazione di campagne periodiche di misura per la determinazione della portata dei fumi in camera di post-combustione.*

Partendo da questa prescrizione la stesura della metodologia proposta parte da un'analisi critica di due possibili soluzioni di stima della portata:

1. *Misura e stima diretta* della portata massica in uscita della camera di post-combustione
2. *Misura e stima indiretta* della portata massica in una sezione a valle della camera di post-combustione, riconducibile a quella in camera di post-combustione, mediante opportuni bilanci di massa.

Entrambe le metodologie di stima presentano diverse criticità.

Nel caso di misura e stima diretta, in uscita dalla camera di post-combustione, i metodi e gli strumenti di misura tipicamente in uso nella fluidodinamica sperimentale dei processi industriali si rivelano, per questioni tecnologiche, di processo e per le peculiarità del flusso in oggetto, non in grado di effettuare una misura robusta.

Una precedente ricerca bibliografica [1], [2], effettuata per la Mengozzi S.p.A. e tesa a valutare la fattibilità di una misura in uscita dalla camera di post-combustione, ha rilevato come tra i possibili metodi candidati ad una misura in una sezione con le caratteristiche di temperatura, concentrazione e dimensione del particolato quali quelle in oggetto, nessuno rappresentasse una soluzione realmente praticabile.

Di fatto, l'elevata temperatura rende l'utilizzo di misure di velocità tramite Pitot-S, anche se realizzato in materiali adatti alle alte temperature, non praticabile a causa dei rischi legati alla deformazione della testa della sonda, strettamente connessa alla costante K di calibrazione del sensore. Allo stesso modo i misuratori di portata ad ultrasuoni, che sfruttano il calcolo dei tempi di transito di fasci ultrasonici, entrano in crisi a causa dell'elevata velocità del suono alle temperature in oggetto.

Infine i più innovativi misuratori di portata a scintillazione, già utilizzati in talune applicazioni a camino, incontrano notevoli difficoltà a causa dell'elevata concentrazione di particolato in sospensione e dei livelli tipici di luminosità.

La misura diretta in uscita dalla camera di post-combustione è quindi, a causa della severità delle condizioni del flusso e dei limiti tecnologici degli strumenti, non praticabile.

Nel caso in cui si intenda misurare e stimare indirettamente la portata in una sezione a valle della camera di post-combustione, ovvero in una zona con temperature e concentrazioni in grado di rimettere in gioco gli strumenti e i metodi appena menzionati, è necessario superare due tipi di problematiche:

- a) Ricostruzione della portata a monte (camera di post-combustione)
- b) Capacità di misurare i profili di velocità e calcolare la portata massica in una sezione circolare.

Nel primo caso il problema è legato alla complessità della stima delle infiltrazioni d'aria esterna.

Nel secondo la complessità nasce dal fatto che la sezione non garantisce, per le caratteristiche dell'impianto e il suo posizionamento, un sufficiente numero di diametri idraulici a monte e a valle del punto di misura (come prescritto dalle norme UNI: [3], [4]), e quindi non è adatta a garantire una sufficiente omogeneità spaziale e stazionarietà del profilo di velocità, che permetterebbe una stima della portata con la metodologia proposta dalla normativa.

Le due problematiche evidenziate, se opportunamente risolte, renderebbero la misura indiretta in una sezione a valle del generatore di vapore un'alternativa realistica e in grado di stimare la portata in camera di post-combustione, correggendola in maniera opportuna per considerare le infiltrazioni d'aria esterna esistenti tra le due sezioni in oggetto ed effettuando la rilevazione dei profili di velocità adattando la scelta e la disposizione dei punti di misura.

1.2. Metodologia di misura proposta: linee guida

Sulla base delle considerazioni appena esposte, analizzando i dati disponibili da precedenti campagne di misura sull'impianto, i risultati dell'analisi termo-fluidodinamica computazionale della camera di post-combustione [5] elaborati dal gruppo di ricerca, ed in seguito ai risultati di una nuova campagna di misura sul flusso gassoso dell'impianto esposti nel paragrafo 2.4, si è scelto di sviluppare una metodologia di stima della portata in camera di post-combustione, di *tipo indiretto*, articolata in 4 punti fondamentali:

- Misure di velocità puntuali con Pitot-S in una sezione S2 (fig.1) a valle del generatore di vapore su una griglia di misura ad-hoc.
- Integrazione numerica del profilo di velocità tridimensionale della griglia, $V(x,y)$.
- Stima delle infiltrazioni d'aria dalla superficie estesa S3 (rappresentativa dei punti di infiltrazione di aria dal generatore di vapore, (fig. 1)) per mezzo dell'analisi del tenore volumetrico d'ossigeno.
- Bilancio di massa per il computo della portata nella sezione S1 della camera di post-combustione.

La metodologia di stima si basa come mostrato in fig.1 sulla definizione di tre sezioni S1, S2, S3. S1 rappresenta la sezione di stima della portata in massa in uscita dalla camera di post-combustione denominata $m1$.

S2 rappresenta la sezione in uscita dal generatore di vapore, dove avviene la misura dei profili di velocità necessari per l'integrazione sul dominio circolare della griglia di misura. Dai profili di velocità verrà ricavata la portata massica $m2$ a valle del generatore di vapore.

S3 rappresenta la sezione non definibile dei punti d'infiltrazione d'aria esterna distribuiti lungo il generatore di vapore, mentre $m3$ rappresenta la portata d'aria esterna infiltrata incognita e oggetto di stima per mezzo del bilancio di massa.

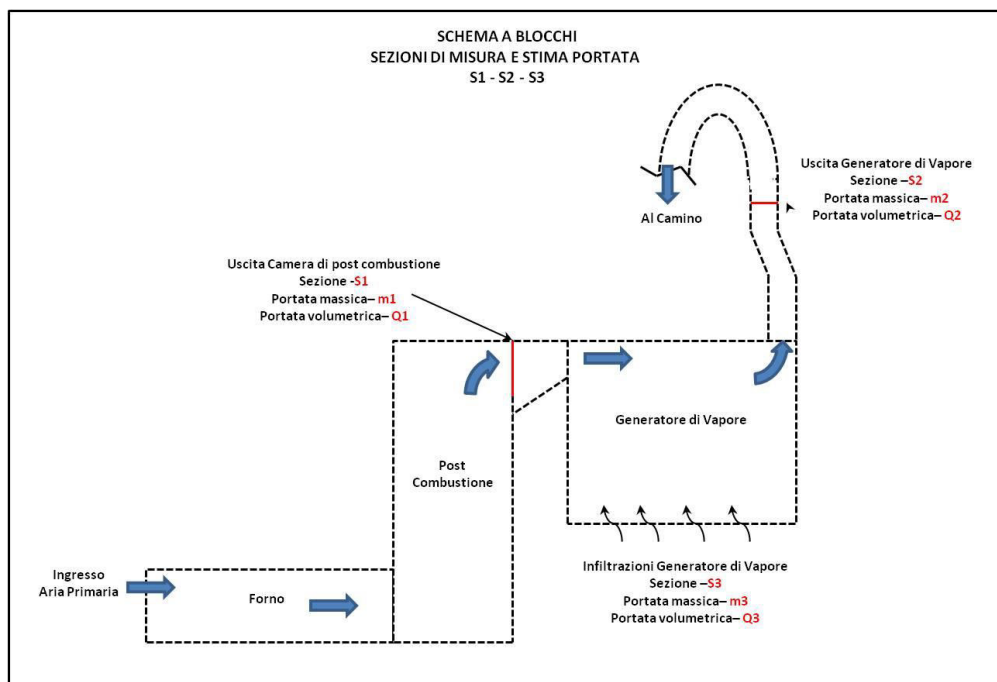


Figura1: Disposizione sezioni di misura e stima della portata.

La sezione S2 a valle del generatore di vapore è stata identificata affinché garantisca:

- a) l'accessibilità degli operatori alla misura.
- b) una forma geometrica misurabile (circolare nel caso specifico) in termini di diametro ed area.
- c) una posizione con il più elevato numero di diametri idraulici a valle e a monte dei bocchelli di inserimento delle sonde.
- d) temperature adatte all'utilizzo di un Pitot-S convenzionale.

La tabella 1 riporta le caratteristiche geometriche della sezione S2 e del flusso che tipicamente lo attraversa. Le temperature e le velocità medie del flusso gassoso, permettono la misura della velocità per mezzo di misure di pressione differenziale con Pitot-S. Anche se il numero di Reynolds è tale da far presupporre un flusso turbolento pienamente sviluppato e un profilo di velocità tipico di un condotto circolare, il ridotto numero di diametri a monte e a valle della sezione considerata e la presenza di una curva ad S che precede la sezione di misura S2, rendono i profili di velocità della sezione non assial-simmetrici e comunque non assimilabili alla forma canonica di un condotto circolare rettilineo.

Queste caratteristiche rendono la stima della portata, così come descritta dalle normative [2], [3], non adatta alla geometria del condotto in esame, rendendo necessario un approccio specifico.

A tal scopo le misurazioni preliminari descritte nel capitolo 2 hanno il fine di acquisire i dati necessari a progettare una griglia di misura ad-hoc e i periodi di campionamento dei singoli punti di misura.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DEL FLUSSO - SEZIONE S2	
Temperatura [°C]	255
Velocità media [m/s]	21
Densità [Kg/m³]	0.612
Numero di Reynolds	557000
Diametro idraulico sezione[m]	1.2
Diametri liberi a valle	1.5
Diametri liberi a monte	1.5

Tabella 1: Caratteristiche sezione S2

La nuova griglia di misura verrà utilizzata per migliorare la caratterizzazione del profilo di velocità tridimensionale sulla sezione S2, caratterizzata da una disomogeneità intrinseca indotta dai tratti non rettilinei a valle e a monte della sezione, permettendo la valutazione della portata mediante un processo di integrazione numerica, piuttosto che per mezzo di un processo algebrico, basato sulla velocità media di predeterminate aree del condotto, come suggerito in normativa.

Il periodo di campionamento dei singoli punti di misura della griglia sarà definito tramite misure preliminari effettuate vicino alla parete, a metà del raggio e sull'asse del condotto della sezione S2. L'analisi dei dati raccolti permetterà di definire un periodo di campionamento in grado di coniugare

il duplice fine di ridurre l'incertezza statistica di misura della velocità, limitando altresì il tempo totale di campionamento, in maniera da assicurare la minima variabilità della portata dell'impianto al variare del PCI del rifiuto introdotto.

La stima della portata d'aria infiltrata, m_3 , sulla sezione distribuita S3, verrà invece valutata mediante il bilancio di massa tra le sezioni S1 e S2, sulla base del tenore di ossigeno secco e del tenore di anidride carbonica rilevati nelle sezioni S1 e S2 e nell'aria ambiente.

Tale approccio risulta valido con l'ipotesi che l'unico contributo all'aumento della portata m_2 rispetto ad m_1 sia dovuto all'ingresso di aria esterna m_3 a temperatura e pressione ambiente ed ipotizzando trascurabili possibili reazioni chimiche tra post-combustione e generatore di vapore.

In tal modo, note le percentuali volumetriche tra le due sezioni S1 ed S2, è possibile computare la variazione del tenore di ossigeno secco intercorso tra le due sezioni.

A questo punto ipotizzando che ad un aumento volumetrico percentuale di ossigeno corrisponda un corrispettivo aumento percentuale di azoto, vincolato dal rispetto delle proporzioni tra i due elementi ottenuto da una misurazione di composizione volumetrica percentuale dell'aria ambiente è possibile risalire alla portata totale nella sezione S1 e quindi al valore della portata massica m_1 .

Riassumendo, il protocollo di misura proposto è articolato nei seguenti punti:

1. Sezione S2, misura dei profili di velocità tramite Pitot-S, su griglia ad-hoc, e periodi di campionamento prestabiliti.
2. Sezione S2, misura della composizione volumetrica del flusso –Tenore di ossigeno secco.
3. Computo della portata massica in m_2 mediante integrazione numerica dei profili di velocità rilevati su griglia ad-hoc.
4. Sezione S1, misura della composizione volumetrica del flusso –Tenore di ossigeno secco.
5. Sezione distribuita S3, misura in atmosfera reale delle composizioni volumetriche per stimare la percentuale di ossigeno secco dell'aria reale.
6. Computo della portata massica m_1 in camera di post-combustione, mediante bilancio di massa.

1.3. Regolazione dell'impianto durante la procedura di misura

Un aspetto determinante nel definire la metodologia di stima della portata, è la modalità di funzionamento dell'impianto durante le operazioni di misura. Tale modalità dovrà essere definita a priori e mantenuta per tutta la durata della prova, che dovrà essere progettata tenendo in considerazione come vincolo imprescindibile, un periodo di campionamento complessivo, che opportunamente definito, dovrà essere rispettato, al fine di garantire per quanto possibile una condizione di funzionamento stazionaria in termini di portata massica prodotta e composizione volumetrica dei gas.

Nelle normali condizioni operative il funzionamento del combustore viene gestito in automatico dal DCS, un sistema di supervisione, controllo e regolazione che modula:

1. La portata dell'aria immessa nel forno, funzione sia della massa sia delle "caratteristiche" (quali composizione merceologica, umidità, potere calorifico, pezzatura) dei rifiuti contenuti all'interno del forno e di quelli alimentati ad ogni carico, in modo da mantenere la percentuale di ossigeno libero nei fumi all'interno del range di valori ottimali per avere una buona combustione.
2. La portata dei fumi aspirata dalla camera di combustione necessaria a mantenere il valore ottimale della depressione all'interno del forno e in ogni sezione dell'impianto.

La modulazione di queste due portate insieme alla portata di fumi prodotta determinano istante per istante la portata in uscita dalla camera di post-combustione. La modulazione operata dal DCS avviene in funzione del controllo di due parametri:

- a) concentrazione del monossido di carbonio (CO) a camino, che deve risultare inferiore alla soglia di preallarme.
- b) temperatura in camera post-combustione che in testa deve risultare compresa tra gli 870 °C e i 1.150 °C.

In conclusione, nelle condizioni di esercizio, la portata dei fumi in uscita dalla camera di post-combustione è funzione della portata di fumi prodotta e della portata d'aria immessa appena espresse e regolate dal DCS in funzione del controllo dei due parametri. La regolazione operata dal DCS è resa necessaria dalla variabilità del carico termico immesso nel forno, cioè i chilogrammi di rifiuto alimentato moltiplicati per il potere calorifico dei singoli carichi immessi nel forno ed incogniti nei loro valori istantanei.

Alla luce del modello di funzionamento dell'impianto la procedura descritta si propone di effettuare una stima della portata in uscita dalla camera di post-combustione sul breve periodo, mediando gli effetti della variazione del PCI indotto dalla variabilità della tipologia di rifiuti ripetendo in seguito la procedura secondo un programma periodico di campionamento.

A tal fine la metodologia, il cui fine ultimo è la stima di una portata massica, deve essere condotta congelando per l'intero periodo di prova le portate d'aria coinvolte nella regolazione, quella primaria all'interno del forno e quella d'aspirazione, ipotizzando auspicabile un maggior peso della stazionarietà della misura su questo elemento, ed accettando invece come compromesso la variazione della componenti volumetriche del gas di combustione prodotto, variabilità che verrà recuperata mediando temporalmente, per tutta la durata della procedura di misura, il campionamento delle componenti volumetriche in entrambe le sezioni S1 ed S2.

Il periodo di campionamento totale della procedura viene pertanto definito mediando tra il periodo di campionamento necessario ad acquisire un sufficiente numero di punti per la griglia di misura della velocità utilizzata come dominio d'integrazione della portata e l'intervallo operativo massimo all'interno del quale il DCS può permettere un funzionamento in regime di portata stazionario.

2. Messa a punto del protocollo di misura – Misure preliminari

2.1. Motivazione e considerazioni

La normativa UNI 10169:2001 prescrive che per ottenere una misura di portata all'interno di un condotto con un'incertezza inferiore al 5%, devono essere rispettate le seguenti condizioni (sezione 7 della norma):

- a) forma geometrica semplice (per esempio circolare o rettangolare);
- b) flusso in regime stazionario;
- c) flusso possibilmente parallelo e simmetrico rispetto all'asse della sezione del condotto;
- d) per assicurare una distribuzione sufficientemente omogenea della velocità del gas nella sezione di misurazione, tale sezione deve essere individuata in un tratto rettilineo del condotto di lunghezza non minore di 7 diametri idraulici. In questo tratto la sezione deve trovarsi in una posizione tale per cui vi sia, rispetto al senso del flusso, un tratto rettilineo di condotto di almeno:
 - 5 diametri idraulici prima della sezione e
 - 2 diametri idraulici dopo la sezione.

Nel caso in questione, il punto a) è pienamente rispettato, il punto b) è rispettato se la durata totale della misura non supera i 60 minuti, termine entro il quale l'impianto può essere mantenuto in condizioni stabili di esercizio (vedi paragrafo 1.3).

Non è tuttavia possibile individuare un punto dell'impianto che rispetti la condizione d). In effetti, la sezione S2 (si veda paragrafo 1.2) si trova a 1.5 diametri a valle di un tratto curvilineo. E' noto dalla letteratura scientifica che nei tratti curvilinei si possano creare delle asimmetrie rispetto all'asse longitudinale del flusso (fig. 2-1). Questa eventualità è prevista dalla normativa stessa, che riporta

*“Nella pratica si può verificare che la condizione d) non sempre sia rispettata. In questi casi:
- se le condizioni di flusso sono favorevoli, ossia se tutti gli altri requisiti di cui in 1 sono soddisfatti, allora i risultati, le cui condizioni di ottenimento devono essere adeguatamente descritte nel rapporto di prova, sono accettabili, pur potendo essere affetti da una inaccuratezza maggiore di quanto riportato in 12.”*

dove con 1 e 12 ci si riferisce alle sezioni della norma UNI 101169:2001 aventi ad oggetto rispettivamente le caratteristiche del flusso per l'utilizzo del Pitot-S e l'accuratezza della metodologia.

2.2. Obiettivi delle misure preliminari

Il protocollo di misura proposto nel paragrafo 1.2 e descritto nel capitolo 3 è stato messo a punto sulla base di una serie di misure preliminari atte a valutare le proprietà del flusso nella sezione S2.

Obiettivo delle misure preliminari è duplice: i) verificare che le condizioni riportate in tabella 2.1 siano soddisfatte per la sezione S2; ii) ottimizzare tempi e distribuzione dei punti di misura per minimizzare l'incertezza di misura della portata entro valori < 5%.

In particolare, le misure preliminari sono servite a mettere a punto i seguenti parametri:

- Entità e qualità delle fluttuazioni del flusso;
- Ottimizzazione del tempo di misura di velocità nei singoli punti della sezione;
- Numero e distribuzione di punti in ciascuna sezione di misura;

a)	numero di Reynolds (Re) del flusso ai punti di campionamento	$Re > 1200$
b)	Velocità di flusso (u_i)	$3 < u_i < 50$
c)	angolo fra la direzione delle linee di flusso e l'asse della sezione d'impatto del tubo di Pitot	$< 14^\circ$
d)	il flusso non presenta fluttuazioni di pressione regolari o cicliche e le eventuali fluttuazioni irregolari di pressione alla sezione di misurazione non devono essere maggiori di 25 Pa (ossia circa 2,5 mm di colonna d'acqua) rispetto al valore medio della pressione differenziale letta su un idoneo manometro collegato al tubo di Pitot;	
e)	Tolleranza su dimensioni interne condotto	$< 1\%$
f)	le caratteristiche e il posizionamento della sezione di misurazione sono conformi a quanto riportato in 7 (Sezione della norma che descrive le caratteristiche e il posizionamento della sezione di misura);	
g)	in nessun punto della sezione di misurazione, ove viene posizionato il tubo di Pitot, la corrente di flusso risulta negativa;	
h)	la temperatura assoluta in ciascun punto di campionamento non differisce più del 5% dal valore medio della temperatura assoluta nella sezione di misurazione;	
i)	l'area proiettata sulla sezione di misurazione dai dispositivi di misurazione introdotti nel condotto non è maggiore del 5% dell'area della sezione di misurazione stessa.	

Tabella 2.1: Requisiti di cui alla sezione 1 della UNI10169:2001

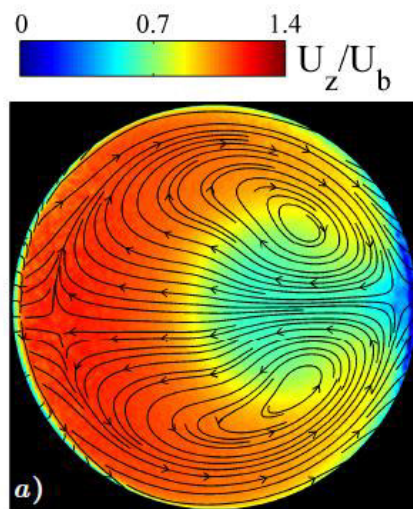


Figura 2-1: Visualizzazione di un flusso in una sezione 0.5 Diametri di una curva a 90° (Dean Number = 34.000). La zona rossa (esterna alla curva) indica la zona a velocità più elevata di circa il 40% in più rispetto alla media. In tutta la sezione sono presenti due vortici controrotanti in direzione perpendicolare alla direzione del flusso (Kalpakli et al, Journal of Visualization, 2012).

2.3. Specifiche delle misure preliminari

Come riportato nel paragrafo 1.2, lo strumento di misura utilizzato è un Pitot tipo S come da normativa. Le dimensioni del Pitot sono tali che l'area proiettata dello strumento sia inferiore al 5% dell'area totale della sezione. Pertanto il punto i) della tabella 2.1 è rispettato. Le dimensioni della sezione sono ottenute con una precisione di ± 1 mm, inferiore allo 0.1 % del diametro della sezione.

I dati acquisiti nelle misure preliminari sono i seguenti:

1. N. 1 punto di campionamento della velocità del flusso a 1 Hz al centro della sezione - Periodo: 300 s, punto P1, figura 2-2 a)
2. N. 1 punto di campionamento della velocità del flusso a 1 Hz a una distanza di 0.3 m da parete - Periodo: 300 s, punto P2, figura 2-2 a)
3. N. 1 punto di campionamento della velocità del flusso a 1 Hz a una distanza di 0.1 m da parete - Periodo: 300 s, punto P3, figura 2-2 a)
4. 33 punti (incluso il centro) di misura della velocità del flusso a 1 Hz per un periodo di acquisizione di 15 s per ciascun punto lungo due diametri: uno orientato nella direzione che va dall'esterno all'interno dell'uscita dell'ultima curva (D1), dove ci si aspetta una maggiore disomogeneità del profilo a causa dell'accelerazione centripeta (si veda ad esempio la figura 2-1); l'altro (D3) orientato ortogonalmente a questo nel piano della sezione S2, dove ci si aspetta una maggiore omogeneità del flusso. I punti di misura sono distribuiti logaritmicamente in modo da avere più punti nella regione vicino a parete in cui ci si aspetta un cambiamento più rapido di velocità. I punti di misura sono distribuiti simmetricamente rispetto alla mezzeria alle seguenti distanze da parete [m]: 0, 0.1, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.22, 0.27, 0.33, 0.40, 0.49, 0.60. La figura 2-2 b) mostra la disposizione dei punti sui due diametri D1 e D3.

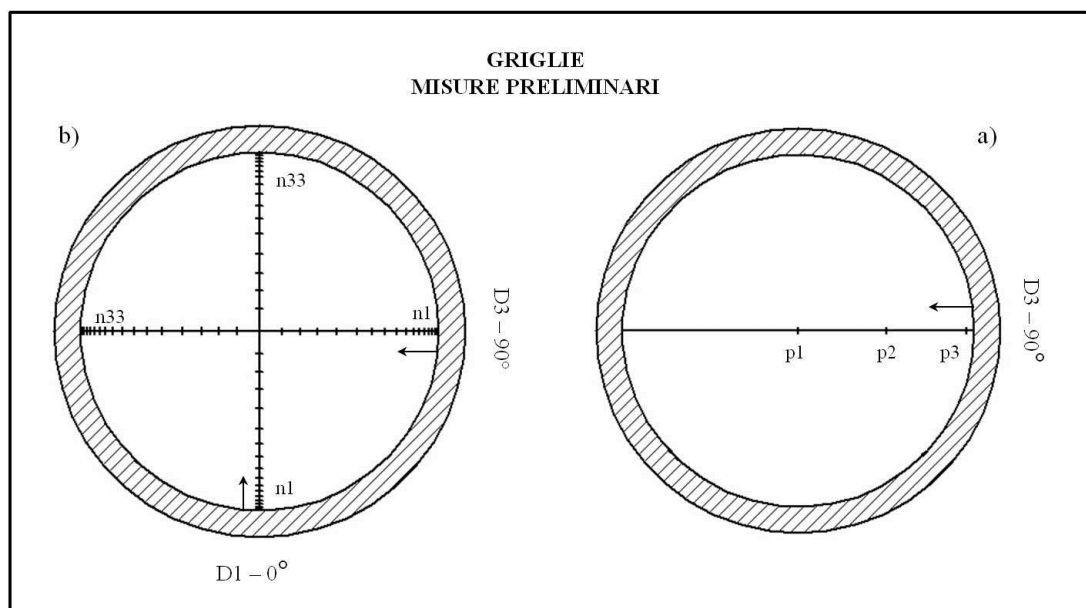


Figura 2-2: Griglia di misura – Misure preliminari

I dati acquisiti durante le misure preliminari di cui ai punti 1, 2 e 3 sono serie temporali lunghe che servono a valutare la media e la distribuzione statistica delle fluttuazioni nel flusso. Le serie temporali

lunghe servono inoltre a quantificare l'incertezza statistica associata a tempi di campionamento inferiori, e serviranno a ottimizzare il tempo di campionamento per ciascun punto al fine di trovare il compromesso migliore tra incertezza statistica e stabilità del flusso durante il periodo di campionamento.

I dati acquisiti durante le misure preliminari di cui al punto 4 saranno invece utilizzati per stabilire il numero di campioni da utilizzare per ciascun profilo per la stima della portata. La normativa prescrive che per una sezione di diametro 1.2 m ve ne siano almeno 4. Tuttavia, all'aumentare dei punti, come la normativa stessa riporta, si ha una diminuzione dell'incertezza dovuta alla variabilità della velocità lungo un profilo. I dati acquisiti serviranno a valutare quanti punti sono necessari per avere un'incertezza sulla portata misurata inferiore al 5%.

2.4. Risultati delle misure preliminari: analisi delle serie temporali

In figura 2-3 sono riportate le serie temporali delle velocità misurate nei punti P1, P2 e P3 posizionati lungo il diametro D3. Le serie temporali mostrano che non ci sono evidenti fluttuazioni periodiche, ma fluttuazioni di tipo gaussiano (vedi figura 2-4) comprese tra il 2 e il 4% tipiche di un flusso turbolento.

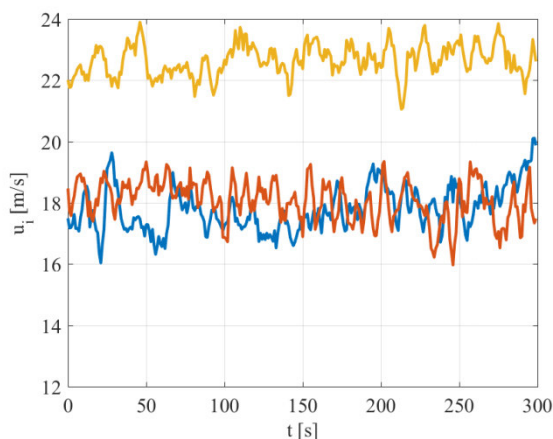


Figura 2-3: serie temporali velocità misurate nei punti P1 (blu), P2 (rosso), P3 (giallo).

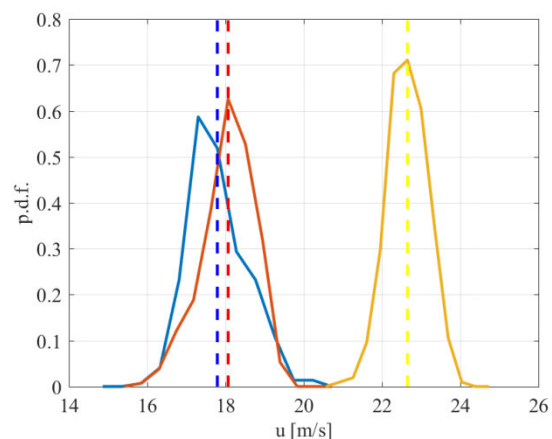


Figura 2-4: distribuzione di probabilità ricavate dalle serie temporali nei punti P1 (blu), P2 (rosso) e P3 (giallo). Le linee tratteggiate indicano la media per ciascun punto.

I dati riguardanti le statistiche del flusso sono riportati in Tabella 2.2 Oltre all'entità delle fluttuazioni di velocità già discusse sopra, è importante riportare le statistiche delle fluttuazioni di pressione registrate dal Pitot da cui sono ricavate le serie di velocità, che non devono superare i 25 Pa. Come si vede dalla tabella, il valore della deviazione standard misurata per le fluttuazioni di pressione, moltiplicata per 1.96, che include il 95% di probabilità degli eventi registrati, è abbondantemente al di sotto dei 25 Pa prescritti.

Da notare inoltre che questa è una stima conservativa, in quanto la sezione scelta è quella dove, per la geometria del condotto, ci si aspetta la maggiore variabilità. Si rileva inoltre che, durante le misure preliminari, in nessun caso l'angolo del flusso rispetto all'asse del Pitot ha superato i 14°, come previsto dalla normativa (Tabella 2.1 punto c)).

In figura 2-5 viene riportata la variabilità statistica associata a ciascun intervallo di acquisizione per ciascun punto di riferimento P1 (quadrati blu), P2 (rombi rossi), P3 (cerchi gialli). Questi valori vengono calcolati come la deviazione standard delle medie misurate su intervalli di tempo T_{acq} diviso per il valore medio calcolato su 300 s.

	Distanza da parete [m]	U_m [m/s]	u_{std} [m/s] (u_{std}/U_m)	Angolo Pitot max[°]	1.96 * std (ΔP) [Pa]
P_1	0.1	17.8	0.73 (0.041)	< 14	22.0
P_2	0.3	18.0	0.76 (0.036)	<14	19.0
P_3	0.6	22.6	0.52 (0.023)	<14	19.7

Tabella 2.2: Statistiche serie temporali

Ad esempio, per un intervallo $T_{acq} = 15$ s, il campione di 300 s viene diviso in 20 sotto-serie temporali da 15 s. La media viene poi calcolata per ciascuna sotto-serie. La variabilità delle medie è dovuta alla somma dell'incertezza statistica, dell'incertezza di misura e alla variabilità del processo. La deviazione standard delle medie così misurate diviso per la media complessiva dà un'idea dell'incertezza relativa nella stima della media. Come si vede nella figura sottostante, un tempo di acquisizione di 15 secondi è sufficiente per ottenere in media un'incertezza dell'ordine del 2%.

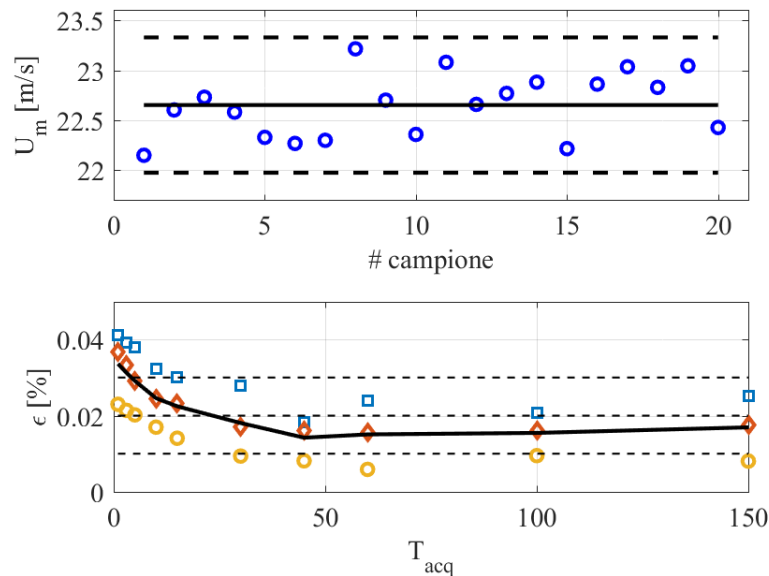


Figura 2-5: Incertezza statistica associata al tempo di acquisizione. In alto viene riportata la variabilità media misurata su intervalli di 15 secondi per il punto P3. Le linee tratteggiate rappresentano il $\pm 2.5\%$ di variabilità rispetto al valore medio misurato su 300 s. Sotto viene riportata la variabilità statistica associata a ciascun intervallo di acquisizione per ciascun punto di riferimento P1 (quadrati blu), P2 (rombi rossi), P3 (cerchi gialli) misurata come la deviazione standard delle medie misurate su l'intervallo di tempo T_{acq} diviso il valore medio calcolato su 300 s. Le linee tratteggiate orizzontali rappresentano errori dell'1, 2 e 3 %. La linea nera continua rappresenta la media delle incertezze nei tre punti.

2.5. Risultati delle misure preliminari: analisi dei profili di velocità

Le figure 2-6 e 2-7 mostrano i profili di velocità misurati lungo le sezioni D1 e D3, rispettivamente. Come ci si aspetta in un flusso di questo tipo, il profilo D1 mostra la maggiore variabilità rispetto al profilo D3 che risulta più uniforme.

La tabella 2.3 riporta invece i dati riguardanti velocità media e numero di Reynolds associati a ciascun profilo. Entrambi i dati risultano compatibili con i requisiti riportati in tabella 2.1.

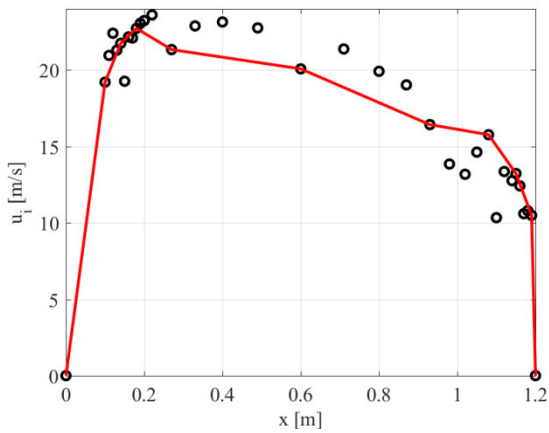


Figura 2-6: Profilo di velocità nella sezione D1. La linea rossa continua mostra il profilo interpolato su 9 punti inclusa la mezziera.

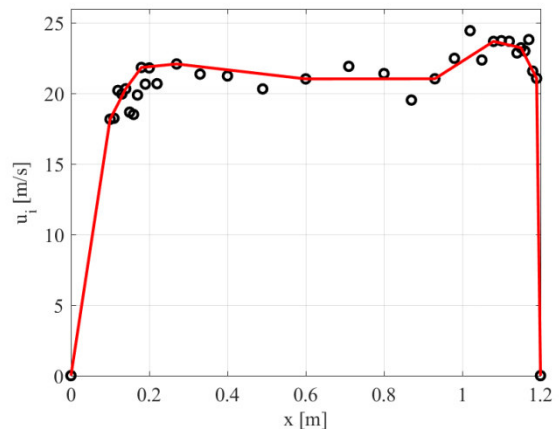


Figura 2-7: Profilo di velocità nella sezione D3. La linea rossa continua mostra il profilo interpolato su 9 punti inclusa la mezziera.

	q [m2/s]	U_b [m/s]	N. Reynolds
D1	22.2	18.5	220'000
D3	24.3	20.3.0	246'000

Tabella 2.3: Statistiche profili di velocità

Come riportato sopra, la normativa prescrive il campionamento di un minimo di 4 punti per diametro per la stima della portata, su almeno 2 diametri.

Come si vede in figura 2-8, nel caso del profilo di velocità misurato su D1, che presenta una disomogeneità maggiore rispetto a D3, 4 punti potrebbero portare ad una sottostima (o sovrastima) della portata superiore al 2.5 %.

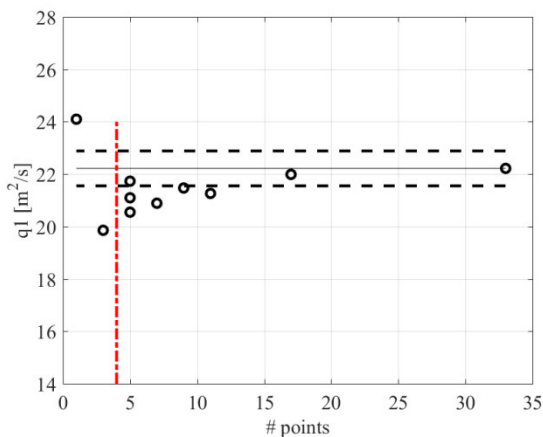


Figura 2-8: Integrale della velocità lungo la sezione (portata per unità di lunghezza) al variare del numero di punti utilizzati nel profilo D1. La linea rossa indica il numero di diametri indicati dalla normativa, la linea tratteggiata indica la variazione del ± 2.5 % rispetto all'integrale calcolato utilizzando 33 punti.

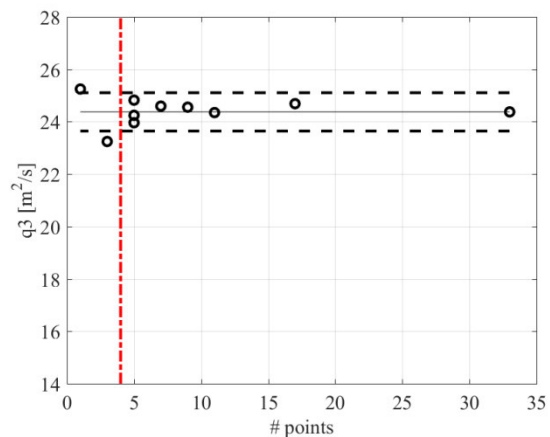


Figura 2-9: Integrale della velocità lungo la sezione (portata per unità di lunghezza) al variare del numero di punti utilizzati nel profilo D3. La linea rossa indica il numero di diametri indicati dalla normativa, la linea tratteggiata indica la variazione del ± 2.5 % rispetto all'integrale calcolato utilizzando 33 punti.

Nella figura si vede però che aumentando il numero di punti, la stima ritorna nell'intervallo del ± 2.5 %. Nel caso di D3 invece, i quattro punti prescritti da normativa sarebbero già sufficienti ad assicurare una misura accurata dell'integrale (vedi figura 2-9); tuttavia, sulla base di questi dati, si ritiene opportuno di inserire nel protocollo di misura almeno 9 punti di misura inclusa la mezzeria.

Si reputa che l'inserimento di questi punti aggiuntivi e l'effettuazione di misurazioni aggiuntive su due diametri addizionali ruotati di 45° rispetto a D1 e D3 compensi l'incertezza dovuta alla non perfetta omogeneità dei profili dovuta al posizionamento della sezione S2 in un tratto rettilineo di lunghezza inferiore ai diametri idraulici previsti dalla normativa.

Si sottolinea inoltre l'importanza di avere il primo punto di misura quanto più vicino possibile alla parete, e di addensare i punti vicino alla parete seguendo un andamento logaritmico, in accordo con la letteratura scientifica sui flussi turbolenti, di cui la regola delle aree riportata nella normativa è un'approssimazione.

2.6. Conclusioni misure preliminari

Le misure preliminari hanno dimostrato che il flusso e le condizioni di misura in S2 soddisfano tutti i requisiti richiesti dalla normativa eccezion fatta per il punto f) (si veda tabella 2.1). Le stesse misure, e le analisi riportate in questa sezione dimostrano che una misura della portata con un'incertezza inferiore al 5% può essere effettuata nella sezione S2 se le misure avvengono seguendo le specifiche sotto riportate:

- Tempo di acquisizione per ciascun punto di misura: 15 s
- Numero di punti di misura per ciascun profilo (incluso centro): 9
- Distribuzione dei punti di misura: logaritmica e simmetrica rispetto al centro
- Numero di diametri lungo i quali effettuare le misure: 4

Il dettaglio del protocollo di misura è riportato nel seguente capitolo 3.

3. Protocollo di misura

Il protocollo di misura proposto in questa sezione ha come obiettivo la stima della portata in camera di post-combustione dell'impianto per smaltimento di rifiuti sanitari della Mengozzi S.p.A, sito in località Coriano, comune di Forlì. La metodologia proposta non si propone come uno standard per la misura della portata massica emessa da una generica camera di post-combustione, ma è stata progettata per lo specifico impianto e le sue peculiarità.

Il metodo di stima proposto di tipo indiretto, si basa su tre azioni

- Una misurazione di velocità del gas a mezzo di un dispositivo a pressione differenziale calibrato, a valle del generatore di vapore.
- Misurazioni della concentrazione volumetrica degli elementi presenti nel gas di combustione e relative grandezze termodinamiche, in tre sezioni definite S1, S2, S3 e rappresentate in figura 1,
- Un bilancio di massa per la stima della portata in camera di post-combustione.

L'approccio seguito nella stesura del documento ha lo scopo di illustrare i vari passi necessari ad ottenere la stima della portata in camera di post-combustione definendo le differenze metodologiche sostanziali rispetto alla normativa ISO EN UNI 19911-1 nella parte relativa alle misure di velocità per mezzo di Pitot-S nella sezione a valle del generatore di vapore, integrandola con le azioni di misura e di elaborazione necessarie a risalire alla stima della portata in camera di post-combustione.

3.1. Definizione delle misure e metodologie nelle varie sezioni

Ciascuna delle sezioni coinvolte nel protocollo di misura è caratterizzata da una propria metodologia di misura; i paragrafi che seguono descrivono modalità e caratteristiche delle misure che dovranno essere effettuate in ciascuna sezione. Tali misure dovranno essere eseguite in conformità alle norme tecniche di volta in volta indicate, eccezion fatta per la UNI EN ISO 16911:2013, che dovrà essere modificata in:

- Frequenze di acquisizione
- Durata dei campionamenti
- Griglia di misura (disposizione e numero dei diametri - posizionamento dei punti di campionamento)

Così come specificato nelle tabelle e immagini relative ad ogni sezione l'elenco sottostante riassume per le tre sezioni, il tipo di misura la norma di riferimento e l'eventuale modifica nelle specifiche.

Sezione S1 – Uscita post-combustione:

- a. Misure di composizione volumetrica del gas di combustione, secco e umido
Norme: ISO 12039:2001 [6] UNI EN 14790:2006 [7] UNI-EN 14789:2006 [8]
- b. Variabili Termodinamiche del gas di combustione
Norma: UNI 16911:2013 [1]
- c. Variabili Termodinamiche ambiente esterno
Norma: UNI 16911:2013 [1]

Sezione S2 – Uscita Generatore di vapore:

- a. Misure di composizione volumetrica del gas di combustione, secco e umido
Norme: ISO 12039:2001 [6] UNI EN 14790:2006 [7] UNI-EN 14789:2006 [8]
- b. Variabili Termodinamiche del gas di combustione
Norma: UNI 16911:2013 [1]
- c. Variabili Termodinamiche ambiente esterno
Norma: UNI 16911:2013 [1]
- d. Misura Dimensionale del condotto
Norma: UNI 16911:2013 [1]
- e. Misura della velocità per mezzo di misure di pressione differenziale con Pitot-S
Norma: UNI 16911:2013 [1] - Modificata nella griglia e nelle frequenze e periodi di campionamento, come da tabella allegata.

Sezione S3 – Sezione distribuita Generatore di vapore:

- a. Misure di composizione volumetrica dell'aria reale umida e secca
Norme: ISO 12039:2001 [6] UNI EN 14790:2006 [7] UNI-EN 14789:2006 [8]
- b. Variabili Termodinamiche ambiente esterno
Norma: UNI 16911:2013 [1]

3.2. SEZIONE S1 – Uscita camera di post-combustione

In tabella 3.1 sono riportate le grandezze che devono essere misurate nella sezione S1. Tali valori verranno utilizzati per la stima della portata in camera di post-combustione m_1 , mediante il bilancio di massa. L'acquisizione dei dati di composizione volumetrica devono essere campionati in sincrono ai dati di composizione volumetrica nelle sezioni S2 ed S3.

Sezione S1 - COMPOSIZIONI VOLUMETRICHE PERCENTUALI GAS							
	H ₂ O [v/v%]	O ₂ [v/v%]	CO ₂ [v/v%]	N ₂ [v/v%]	Frequenza di acquisizione [1/sec]	Numero campioni	Durata totale di misura [min]
Composizione gas secco	/	Φ_{1,O_2d}	Φ_{1,CO_2d}	Φ_{1,N_2d}	1/60	50	50
Composizione gas umido	Φ_{1,H_2O}	Φ_{1,O_2w}	Φ_{1,CO_2w}	Φ_{1,N_2w}	1/60	50	50
Umidità Relativa	U_{r1} [v/v%]				1/60	50	50
Sezione S1 - VARIABILI TERMODINAMICHE							
Pressione statica interna	Ps1 [Pascal]				1/60	50	50
Temperatura interna	T ₁ [°C]				1/60	50	50
Pressione statica ambiente	P _{amb,1} [Pascal]				1/60	50	50
Temperatura statica ambiente	T _{amb,1} [°C]				1/60	50	50

Tabella 3.1: Specifiche misure nella sezione S1 – Uscita camera di post-combustione

3.3. SEZIONE S2 – Uscita Generatore di vapore

Nelle tabelle 3.2 sono riportate le grandezze che devono essere misurate nella sezione S2. In particolare i valori riportati nelle tabelle 3.2a,b,c,d verranno utilizzati per ricavare il valore della portata m_2 in uscita dal generatore di vapore. La portata m_2 sarà data dall'integrazione numerica dei profili di velocità misurati in punti ben determinati, costituenti un'apposita griglia. Nella tabella 3.2e sono riportati la misura lineare dimensionale su due diametri necessaria alla stima dell'area del condotto necessaria al computo del dominio reale d'integrazione ed i dati di composizione volumetrica nella sezione S2, che verranno utilizzati per stimare la variazione del tenore d'ossigeno rispetto alla sezione S1 per il computo delle infiltrazioni d'aria esterna ed il calcolo della portata in camera di post-combustione secondo la procedura del paragrafo 3.6. Le misure di composizione volumetrica in tale sezione devono necessariamente essere sincrone a quelle prescritte in S1.

La figura 3-1 definisce la griglia di misura con la posizione relativa dei 4 diametri di misura, intervallati tra loro di 45° , partendo dal diametro di riferimento D1; su ogni diametro dovranno essere eseguiti 9 punti di misura per un totale di 36 punti di misura.

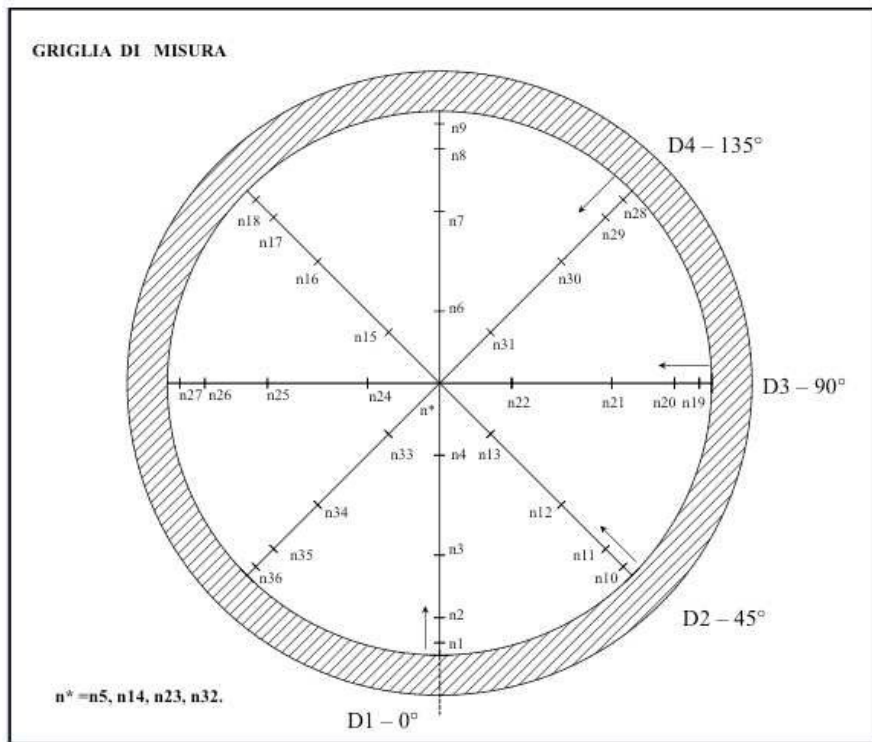


Figura 3-1: Griglia di misura – Protocollo di misura.

Il punto centrale di ogni diametro, rappresentativo della velocità sull'asse del condotto, verrà acquisito una volta per ogni diametro, per un totale di 4 ripetizioni (punti: $n^{\circ}5$, $n^{\circ}14$, $n^{\circ}23$, $n^{\circ}32$); la ridondanza sulla misura di tale punto verrà utilizzata per verificare la stazionarietà delle portate regolate dal DCS durante il periodo complessivo della prova.

La figura 3.2 definisce la posizione e le coordinate dei punti di misura su un diametro ed il riferimento rispetto al quale vengono definiti. La posizione dei punti di misura sul diametro rappresentato in figura è la stessa per tutti i diametri.

Le tabelle 3.2a,b,c,d riportano la nomenclatura progressiva dei punti di misura sui vari diametri e le specifiche per ogni punto.

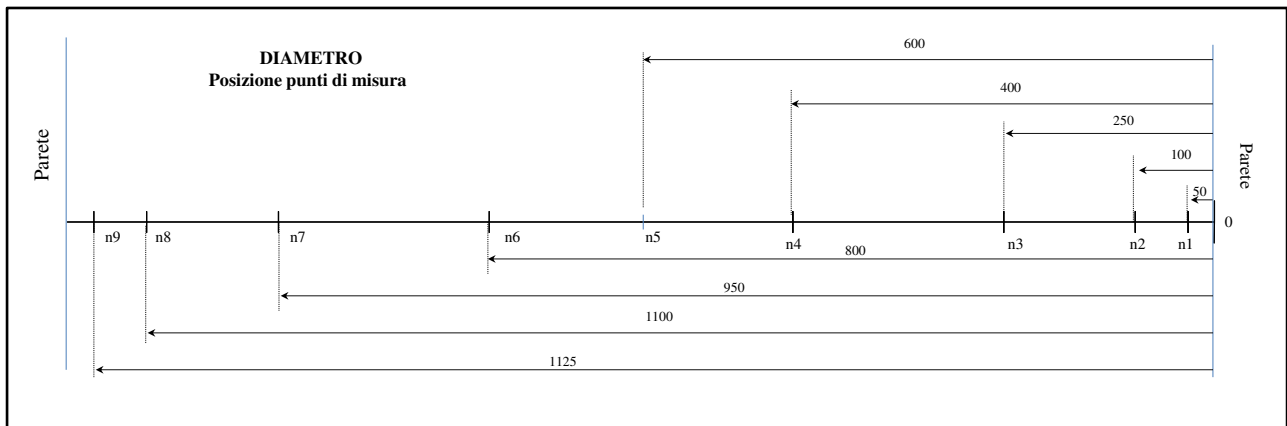


Figura 3-2: Punti di misura sul diametro

La pressione statica della sezione S2, denominata p_2 ed utilizzata per il computo della densità viene acquisita su due punti per ogni diametro e calcolata come media degli otto valori rilevati tramite il Pitot-S; i punti di misura della pressione statica risultano per ogni diametro D1: Pst₃, Pst₇; D2: Pst₁₂, Pst₁; D3: Pst₂₁, Pst₂₅; D4: Pst₃₀, Pst₃₄.

Tale prescrizione, giustificata dalla bassa variabilità della pressione statica lungo il diametro riscontrata nelle pre-misure, permette di ridurre sensibilmente la durata complessiva del campionamento della velocità.

Dal punto di vista dei tempi di campionamento e del numero e della disposizione dei punti di misura sulla griglia, il protocollo di misura è stato sviluppato coniugando tre diversi aspetti:

- L'esigenza di realizzare una misura spaziale basata su una griglia sufficientemente accurata da descrivere la disomogeneità del flusso nella sezione.
- Fissare un periodo di campionamento dei singoli punti tale da ridurre l'incertezza statistica della misura, senza però aumentare eccessivamente la durata complessiva della prova.
- La possibilità di mantenere il funzionamento del forno in regime stazionario attraverso il DCS che controlla la portata d'aria immessa e la portata dei fumi estratta per un periodo compreso tra 40 e 60 minuti.

Mediando tra questi elementi, il protocollo di misura assicura una durata totale netta della prova, basata su 36 punti di misura della pressione dinamica e 8 punti per la pressione statica, per un totale di 44 misurazioni da 15 secondi ciascuna, una durata totale netta di 11 minuti.

Tuttavia considerando un tempo realistico di riposizionamento e allineamento della sonda nel flusso per ogni punto di misura, pari a 60 secondi per punto di misura, la durata complessiva della prova si attesterebbe attorno a 44 minuti, ai quali è necessario sommare i tempi di spostamento della strumentazione tra i 4 diametri, per una durata complessiva di circa 50 minuti.

La durata totale della prova di 50 minuti è tale da assicurare la rilevazione di una portata massica stazionaria nell'impianto grazie alla regolazione del DCS, una griglia di misura in grado di descrivere le disomogeneità della sezione su 4 diametri, un periodo di campionamento dei singoli punti di misura adatto a mediare tra la durata complessiva della prova e la riduzione dell'incertezza statistica dei dati acquisiti. Le tabelle 3.2a, 3.2b, 3.2c, 3.2d identificano i punti, le grandezze e le specifiche di misura lungo i 4 diametri della griglia. La tabella 3.2e identifica le specifiche per la rilevazione dimensionale della sezione e la caratterizzazione delle frazioni volumetriche percentuali del gas nella sezione S2, rilevazioni da effettuarsi in maniera sincrona rispetto a quelle nella sezione S1.

Sezione S2 – DIAMETRO 1 - VARIABILI PER IL CALCOLO DELLA VELOCITA'								
Diametro	n° punto	Coordinata Diametro [m]	Pressione Dinamica [Pa]	Pressione Statica [Pa]	Inclinazione Sonda [°]	Frequenza acquisizione [Hz]	N° Campioni	Durata totale di misura [s]
D1 – 0°	1	0.05	Pd ₁	\	θ_1	1	15	15 s
	2	0.1	Pd ₂	\	θ_2	1	15	15 s
	3	0.25	Pd ₃	Pst ₃	θ_3	1	15	15 s
	4	0.4	Pd ₄	\	θ_4	1	15	15 s
	5	0.6	Pd ₅	\	θ_5	1	15	15 s
	6	0.8	Pd ₆	\	θ_6	1	15	15 s
	7	0.95	Pd ₇	Pst ₇	θ_7	1	15	15 s
	8	1.1	Pd ₈	\	θ_8	1	15	15 s
	9	1.15	Pd ₉	\	θ_9	1	15	15 s

Tabella 3.2a: Specifiche misure della velocità Diametro 1– Sezione S2, uscita generatore di vapore

Sezione S2 – DIAMETRO 2 - VARIABILI PER IL CALCOLO DELLA VELOCITA'								
Diametro	n° punto	Coordinata Diametro [m]	Pressione Dinamica [Pa]	Pressione Statica [Pa]	Inclinazione Sonda [°]	Frequenza acquisizione [Hz]	N° Campioni	Durata totale di misura [s]
D2 – 45°	10	0.05	Pd ₁₀	\	θ_{10}	1	15	15 s
	11	0.1	Pd ₁₁	\	θ_{11}	1	15	15 s
	12	0.25	Pd ₁₂	Pst ₁₂	θ_{12}	1	15	15 s
	13	0.4	Pd ₁₃	\	θ_{13}	1	15	15 s
	14	0.6	Pd ₁₄	\	θ_{14}	1	15	15 s
	15	0.8	Pd ₁₅	\	θ_{15}	1	15	15 s
	16	0.95	Pd ₁₆	Pst ₁₆	θ_{16}	1	15	15 s
	17	1.1	Pd ₁₇	\	θ_{17}	1	15	15 s
	18	1.15	Pd ₉	\	θ_{18}	1	15	15 s

Tabella 3.2b: Specifiche misure della velocità Diametro 2– Sezione S2, uscita generatore di vapore

Sezione S2 – DIAMETRO 3 - VARIABILI PER IL CALCOLO DELLA VELOCITA'								
Diametro	n° punto	Coordinata Diametro [m]	Pressione Dinamica [Pa]	Pressione Statica [Pa]	Inclinazione Sonda [°]	Frequenza acquisizione [Hz]	N° Campioni	Durata totale di misura [s]
D3 – 90°	19	0.05	Pd ₁₉	\	θ_{19}	1	15	15 s
	20	0.1	Pd ₂₀	\	θ_{20}	1	15	15 s
	21	0.25	Pd ₂₁	Pst ₂₁	θ_{21}	1	15	15 s
	22	0.4	Pd ₂₂	\	θ_{22}	1	15	15 s
	23	0.6	Pd ₂₃	\	θ_{23}	1	15	15 s
	24	0.8	Pd ₂₄	\	θ_{24}	1	15	15 s
	25	0.95	Pd ₂₅	Pst ₂₅	θ_{25}	1	15	15 s
	26	1.1	Pd ₂₆	\	θ_{26}	1	15	15 s
	27	1.15	Pd ₂₇	\	θ_{27}	1	15	15 s

Tabella 3.2c: Specifiche misure della velocità Diametro 3– Sezione S2, uscita generatore di vapore

Sezione S2 – DIAMETRO 4 - VARIABILI PER IL CALCOLO DELLA VELOCITA'								
Diametro		Coordinata Diametro [m]	Pressione Dinamica [Pa]	Pressione Statica [Pa]	Inclinazione Sonda [°]	Frequenza acquisizione [Hz]	N° Campioni	Durata totale di misura [s]
D4–135°	28	0.05	Pd ₂₈	\	θ_{28}	1	15	15 s
	29	0.1	Pd ₂₉	\	θ_{29}	1	15	15 s
	30	0.25	Pd ₃₀	Pst ₃₀	θ_{30}	1	15	15 s
	31	0.4	Pd ₃₁	\	θ_{31}	1	15	15 s
	32	0.6	Pd ₃₂	\	θ_{32}	1	15	15 s
	33	0.8	Pd ₃₃	\	θ_{33}	1	15	15 s
	34	0.95	Pd ₃₄	Pst ₃₄	θ_{34}	1	15	15 s
	35	1.1	Pd ₃₅	\	θ_{35}	1	15	15 s
	36	1.15	Pd ₃₆	\	θ_{36}	1	15	15 s

Tabella 3.2d: Specifiche misure della velocità Diametro 4– Sezione S2, uscita generatore di vapore

Sezione S2 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE SEZIONE							
	Lunghezza Diametro [m]			Numero di Campioni			
Diametro D1	d1			3			
Diametro D3	d3			3			
Sezione S2 - COMPOSIZIONI VOLUMETRICHE PERCENTUALI GAS							
	H ₂ O [v/v%]	O ₂ [v/v%]	CO ₂ [v/v%]	N ₂ [v/v%]	Frequenza di acquisizione [1/sec]	Numero campioni	Durata totale di misura [min]
Composizione gas secco	/	Φ_{2,O_2d}	Φ_{2,CO_2d}	Φ_{2,N_2d}	1/60	50	50
Composizione gas umido	Φ_{2,H_2O}	Φ_{2,O_2w}	Φ_{2,CO_2w}	Φ_{2,N_2w}	1/60	50	50
Umidità Relativa	U _{r2} [v/v%]				1/60	50	50
Sezione S2 - VARIABILI TERMODINAMICHE							
Pressione statica interna	Ps2 [Pascal]				1/60	50	50
Temperatura interna	T ₂ [°C]				1/60	50	50
Pressione statica ambiente	P _{amb,2} [Pascal]				1/60	50	50
Temperatura statica ambiente	T _{amb,2} [°C]				1/60	50	50

Tabella 3.2e: Specifiche misure nella Sezione S2 – Uscita generatore di vapore

3.4. SEZIONE S3 – Superficie distribuita Generatore di vapore - Ambiente esterno

In tabella 3.3 sono riportate le grandezze che devono essere misurate nella sezione S3. Tali valori verranno utilizzati per la stima delle infiltrazioni d'aria esterna attraverso il generatore di vapore e il successivo computo, mediante il bilancio di massa, della portata m1 in camera di post-combustione.

Sezione S3 - COMPOSIZIONI VOLUMETRICHE PERCENTUALI ARIA REALE							
	H ₂ O [v/v%]	O ₂ [v/v%]	CO ₂ [v/v%]	N ₂ [v/v%]	Frequenza di acquisizione [1/sec]	Numero campioni	Durata totale di misura [min]
Composizione gas secco	/	Φ_{3,O_2d}	Φ_{3,CO_2d}	Φ_{3,N_2d}	1/60	50	50
Composizione gas umido	Φ_{3,H_2O}	Φ_{3,O_2w}	Φ_{3,CO_2w}	Φ_{3,N_2w}	1/60	50	50
Umidità Relativa	U _{r3} [v/v%]				1/60	50	50

Sezione S3 - VARIABILI TERMODINAMICHE				
Pressione statica ambiente	$P_{amb,3}$ [Pascal]	1/60	50	50
Temperatura statica ambiente	$T_{amb,3}$ [°C]	1/60	50	50

Tabella 3.3: Specifiche misure nella sezione distribuita S3 – Superficie rappresentativa infiltrazione aria nel generatore di vapore

Le misurazioni vengono effettuate sull'aria "reale" piuttosto che sulle composizioni dell'atmosfera standard (aria tipo), al fine di considerare l'influenza dell'umidità dell'aria e ridurre l'incertezza di misura.

3.5. Elaborazione dati – Integrazione del profilo di velocità

La scelta di effettuare un'integrazione numerica per il calcolo della portata deriva dall'analisi dei profili di velocità acquisiti nella fase di pre-misura. La sezione di misura S2 in uscita dal generatore di vapore presenta un ridotto numero di diametri rettilinei a monte e a valle pari a 1.5 diametri idraulici; inoltre la presenza di una curva ad S a monte della sezione di misura rende il profilo di velocità non omogeneo in particolare sul diametro D1. L'utilizzo di una procedura di integrazione numerica effettuata su una griglia di misura scelta per descrivere più accuratamente la distribuzione della velocità nella sezione permette di catturare in maniera più completa e distribuita le variazioni di velocità nella sezione.

L'analisi delle misure sui profili di velocità acquisiti può essere condotta secondo due diversi approcci: quello della regressione lineare o quello dell'interpolazione.

Le funzioni di regressione non riproducono il valore esatto della misura nei punti di campionamento, ma sfruttano i dati delle misure per calcolare una funzione analitica che meglio approssimi l'andamento generale dei dati senza pretendere che la funzione stessa passi necessariamente per i punti noti. Questa caratteristica dei metodi di regressione risulta consigliabile quando è possibile associare un modello matematico, una funzione, in grado di approssimare con sufficiente accuratezza l'andamento del fenomeno che si descrive. Nel caso del flusso in esame, i profili di velocità sulla sezione risultano non omogenei in direzione azimutale a causa della particolare posizione della sezione di misura e difficilmente rappresentabili in modo accurato con una funzione; inoltre è necessario ricordare che ogni procedura di regressione aggiunge alla stima del dato, un'incertezza di regressione, calcolabile con metodologie definite [9], che si aggiunge all'incertezza statistica e a quella strumentale da associare alla misura.

L'approccio dell'interpolazione consiste invece nel ricercare una funzione, che passi esattamente per ogni singolo punto di misura; l'interpolazione può essere effettuata mediante curve polinomiali di diverso grado, polinomi di Lagrange o curve di tipo "spline".

L'interpolazione per come è definita non aggiunge incertezza alla stima del profilo di velocità in quanto non è definibile uno scarto tra dato misurato e predizione della funzione di interpolazione, passando quest'ultima per ognuno dei punti di misura.

La non omogeneità del flusso sui 4 diametri, la mancanza di un modello in grado di rappresentare i profili di velocità con sufficiente precisione e la necessità di non aggiungere incertezza al calcolo

della portata rende l'approccio dell'interpolazione lineare, sia sul diametro che in direzione azimutale, preferibile rispetto alla regressione. I quattro diametri identificati sono stati suddivisi secondo una spaziatura non uniforme per meglio descrivere il profilo di velocità in prossimità della parete dove sono presenti i gradienti di velocità più accentuati. Il dominio di calcolo sul singolo diametro costituito da 9 punti di misura viene incrementato con due punti supplementari alle estremità per fissare le condizioni al contorno di non scorrimento a parete; tale condizione viene rappresentata imponendo un valore di velocità nullo alle coordinate iniziali e finali che descrivono la lunghezza del raggio.

- $x_i = 0$, $V_i = 0$
- $x_f = 1.2^*$, $V_f = 0$, * Valore del diametro stimato dalle misure tabella 3.2e

La coordinata finale del raggio viene calcolata come media delle 10 misurazioni dimensionali prescritte sul diametro D1 e D3 come descritto in tabella 3.2e, in modo da poter calcolare un dominio di integrazione basato sulla superficie reale del condotto.

I 4 profili di velocità relativi ai diametri D1, D2, D3 e D4 di figura 3-1, acquisiti durante un'apposita campagna di misure e caratterizzati da 11 coordinate rappresentative delle posizioni diametrali di misura e 11 valori di velocità, rappresentano una ricostruzione discreta del profilo di velocità.

I profili di velocità rivelano le condizioni tipiche di un condotto circolare con curva ad "S": il diametro D3 (figura 3.3) mostra una riduzione nel valore della velocità assiale a partire dal centro del condotto fin verso la parte interna alla curva, zona caratterizzata dalla presenza di ricircoli e disomogeneità dovute alla variazione dell'asse del condotto. Il diametro D1 a 90° rispetto a D3 risulta quello che manifesta un profilo più omogeneo, mentre D2 e D4 nelle posizioni intercardinali risentono in misura minore degli effetti della curva rispetto a D3, ma non mostrano la stessa omogeneità di D1.

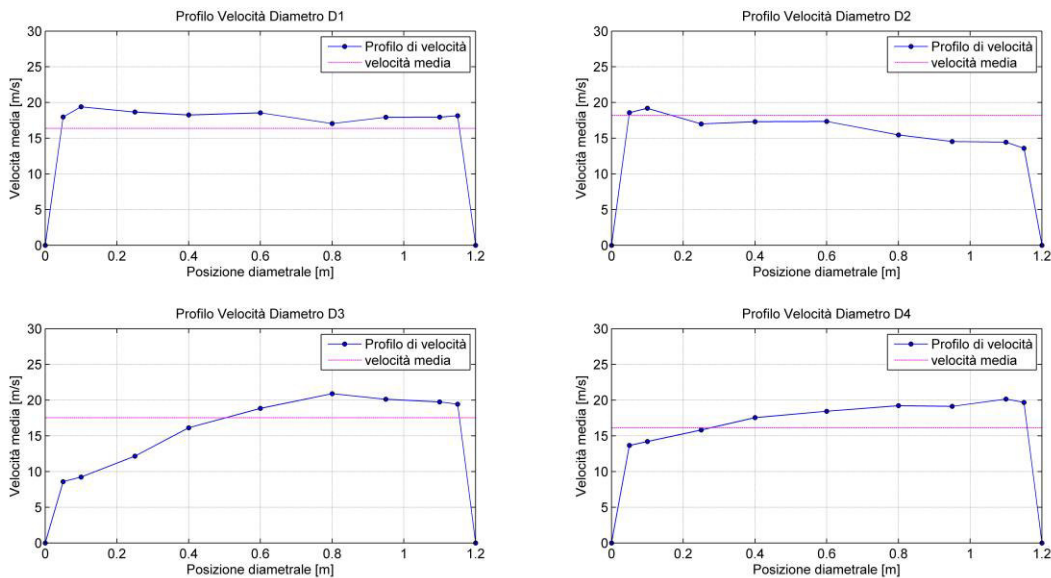


Figura 3-3: Profili di velocità lungo i 4 diametri

Nella rappresentazione tridimensionale della funzione velocità variabile nelle coordinate (x, y), i dati discreti vengono interpolati linearmente sul diametro e azimutale tra gli 8 raggi derivanti dai 4 diametri di misura. I passi di interpolazione utilizzati radialmente e in direzione azimutale risultano:

- Passo di interpolazione azimutale: 2°
- Passo di interpolazione Radiale: 0.02 [m]

La figura 3-4a rappresenta i dati sulla griglia e la superficie di interpolazione lineare generata tra dati grezzi. La figura 3-4b mostra invece la superficie ottenuta dall'interpolazione lineare azimutale e radiale con i passi riportati.

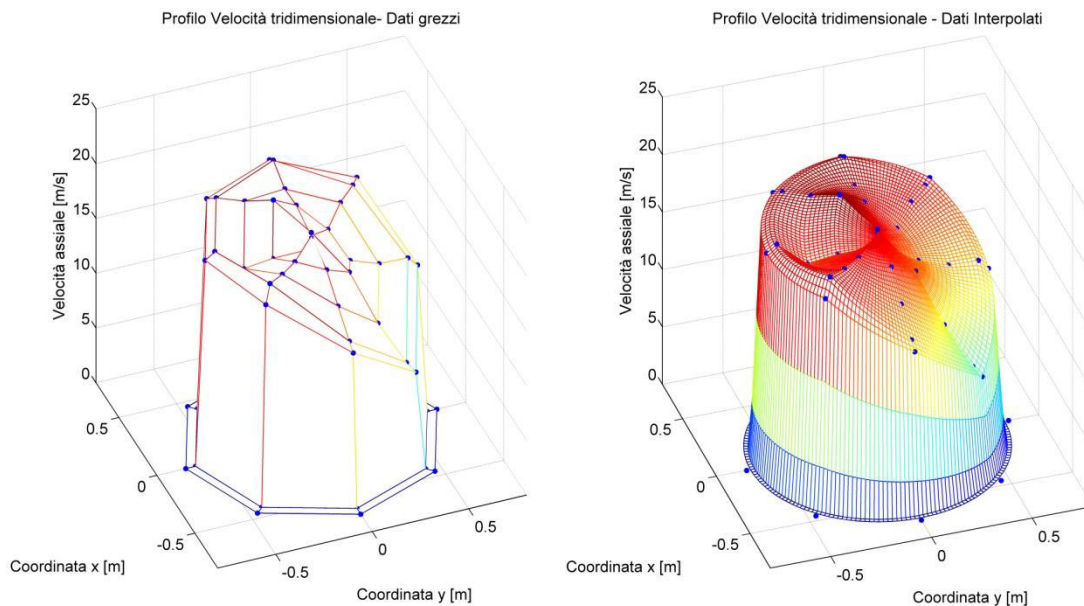


Figura 3-4: a) profili di velocità tridimensionali con dati grezzi, b) profili di velocità tridimensionali dati interpolati

La procedura numerica adottata per ricavare le formule di quadratura, può derivare dalle tecniche viste per l'interpolazione; facendo opportune ipotesi circa l'andamento della curva tra due o più punti è possibile ottenere diverse formule di quadratura di tipo interpolante. Tuttavia quando non si dispone di sufficienti informazioni circa il modello del comportamento della funzione tra punti consecutivi, l'interpolazione lineare risulta il miglior compromesso, come nel caso in esame.

L'integrazione del profilo bidimensionale di velocità $v(x,y)$ nella sezione è noto in corrispondenza di una matrice di punti di dimensioni 9×7 e rappresentabile da una funzione in due variabili $f(x,y)=v(x,y)$

La qualità del processo di integrazione viene in genere valutata per mezzo di due parametri distinti, noti come l'errore di troncamento o di cubatura nel caso di funzioni in due variabili, e il grado di precisione.

L'errore di troncamento rappresenta l'errore commesso tra la valutazione dell'integrale ottenuto per via numerica $J_k J_n(f)$ e il valore ricavabile dal calcolo della primitiva $I(f)$, una volta risolta l'integrazione della funzione reale $f(x,y)$.

$$I[f(x,y)] = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} f(x,y) dx dy \cong \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^n a_i b_j f(x_i) = J_k J_n(f)$$

Il valore dell'errore di cubatura, valutato per il profilo di velocità interpolato linearmente tra gli intervalli del dominio, risulta nullo nei punti di misura e non valutabile tra due punti consecutivi essendo incognita la funzione analitica del reale profilo di velocità

$$E_{k,n}(f) = I(f) - J_k J_n(f)$$

La formula di quadratura scelta per l'integrazione è quella dei trapezi; tale metodo per le caratteristiche dei dati acquisiti e per la scelta di rappresentarli con un'interpolazione lineare garantisce un ordine di precisione $n=1$, ovvero con tale metodo è possibile integrare in maniera esatta una funzione lineare in un intervallo definito.

La tabella 3.5 riporta i risultati di un calcolo condotto sui 4 profili di velocità mostrati in figura 3.4; i profili una volta interpolati linearmente in direzione radiale e azimutale e rappresentati graficamente nello spazio tridimensionale, sono stati integrati secondo la formula di quadratura dei trapezi, su un dominio circolare di diametro pari al diametro nominale del condotto, come proposto dalla metodologia caso a).

Il valore dell'integrale così ottenuto, rappresentativo della portata volumetrica del condotto, è stato confrontato con il risultato che si otterrebbe in due casi rappresentativi "b" e "c", così strutturati.

- a. 4 diametri – 9 punti di misura per diametro più condizioni al contorno - Integrazione numerica
- b. 2 diametri – 4 punti di misura per diametro - 8 punti totali - Calcolo da Normativa
- c. 4 diametri – 4 punti di misura per diametro - 16 punti totali - Calcolo da Normativa

	Caso b	Caso c
Errore percentuale [%]	- 4%	+7.01

Tabella 3.5: Confronto tra griglie di misura e metodi di calcolo

Il calcolo eseguito secondo la griglia e la metodologia di normativa "b" porta a sovrastimare la portata di un 4%, mentre l'aumento del numero di punti di misura della velocità nel caso "c" e la valutazione secondo normativa non porta un vantaggio nella precisione del calcolo se effettuata senza il processo di integrazione.

3.6. Stima della portata in camera di post-combustione

La portata m_2 , relativa alla sezione S2 dell'impianto, risulta maggiore rispetto a quella in uscita dalla camera di post-combustione m_1 . Ciò avviene a causa del moto del flusso gassoso nel condotto che induce perdite di carico distribuite e concentrate tali da generare un abbassamento della pressione statica all'interno del condotto; tale differenza di pressione crea un gradiente di pressione negativo tra l'ambiente esterno e l'impianto che genera un'aspirazione con portata m_3 attraverso la superficie distribuita S3 del generatore di vapore.

Tale fenomeno è descrivibile per mezzo del principio di conservazione della massa applicato alle superfici e alle portate considerate secondo le notazioni di figura 1, ed esprimibile secondo la seguente equazione:

$$m_1 = m_2 - m_3$$

Passando ad una descrizione integrale del modello è possibile scrivere la portata in massa come l'integrale sulle superfici di riferimento del prodotto tra la densità del flusso e la rispettiva velocità.

$$\int_{s_1} \rho_1 \vec{v}_1 ds = \int_{s_2} \rho_2 \vec{v}_2 ds - \int_{s_3} \rho_3 \vec{v}_3 ds$$

Ipotizzando il comportamento del gas assimilabile a quello di un gas perfetto e che la temperatura e la densità del gas siano omogeneamente distribuite nella sezione, è possibile isolare la densità dal processo di integrazione e sostituire l'integrale delle velocità sulla sezione con la portata volumetrica.

$$\rho_1 \int_{s1} \bar{v}_1 ds = \rho_2 \int_{s2} \bar{v}_2 ds - \rho_3 \int_{s3} \bar{v}_3 ds$$

$$\rho_1 \dot{Q}_1 = \rho_2 \dot{Q}_2 - \rho_3 \dot{Q}_3$$

Il valore della densità di una massa di gas è esprimibile per mezzo della legge dei gas perfetti in funzione delle frazioni volumetriche percentuali degli elementi che la compongono e delle masse molari:

$$\rho_k \dot{Q}_k = \dot{Q}_k \left[\frac{p_k}{RT_k} M \right] = \dot{Q}_k \left[\frac{p_k}{RT_k} 10^{-3} \sum_i^N (M_i \varphi_{ki}) \right]$$

Dove, l'indice i varia da 1 a N, dove N rappresenta il numero di elementi misurabili nella miscela di gas, mentre l'indice k varia da 1 a B dove B rappresenta le tre sezioni S_k dove viene rilevata la grandezza.

Esplicitando la relazione relative al gas secco, per le tre sezioni di riferimento S1, S2, S3:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{1d} &= \dot{Q}_{1d} \left[\frac{p_1}{RT_1} 10^{-5} [32\varphi_{1,o_2d} + 44\varphi_{1,co_2d} + 28(100 - \varphi_{1,o_2d} - \varphi_{1,co_2d})] \right] \\ \dot{m}_{2d} &= \dot{Q}_{2d} \left[\frac{p_2}{RT_2} 10^{-5} [32\varphi_{2,o_2d} + 44\varphi_{2,co_2d} + 28(100 - \varphi_{2,o_2d} - \varphi_{2,co_2d})] \right] \\ \dot{m}_{3d} &= \dot{Q}_{3d} \left[\frac{p_3}{RT_3} 10^{-5} [32\varphi_{3,o_2d} + 44\varphi_{3,co_2d} + 28(100 - \varphi_{3,o_2d} - \varphi_{3,co_2d})] \right] \end{aligned}$$

La portata m_3 è costituita da aria ambiente, alla pressione p_3 e temperatura T_3 che corrispondono alle condizioni di pressione e temperatura ambiente.

Nelle relazioni esplicitate:

- m_{1d}, m_{2d}, m_{3d} = portate in massa secche
- m_{1w}, m_{2w}, m_{3w} = portate in massa umide
- Q_{1d}, Q_{2d}, Q_{3d} = portate volumetriche secche
- Q_{1w}, Q_{2w}, Q_{3w} = portate volumetriche umide
- M = massa molare del gas secco [kg/mol].
- φ_{k,o_2d} = Concentrazione volumetrica percentuale di ossigeno del gas secco [%].
- φ_{k,co_2d} = Concentrazione volumetrica percentuale di anidride carbonica del gas secco [%].
- $100 - \varphi_{k,o_2d} - \varphi_{k,co_2d}$ = Concentrazione volumetrica percentuale di azoto del gas secco calcolato come differenza dal totale [%].
- R = costante universale dei gas.
- P_k, T_k = pressione statica e temperatura relative alle sezioni di misura S_k , [Pa], [K].

Ipotizzando che l'unico contributo all'aumento della portata m_2 rispetto ad m_1 sia dovuto all'ingresso di aria esterna m_3 a temperatura e pressione ambiente ed ipotizzando trascurabili le reazioni chimiche tra post-combustione e generatore di vapore è possibile calcolare la variazione del tenore di ossigeno secco intercorso tra le due sezioni.

Riscrivendo il bilancio di massa considerando solo la componente volumetrica e le relative pressioni parziali dell'ossigeno e dell'anidride carbonica nelle sezioni considerate:

$$\dot{Q}_{1d} \left[\frac{p_1}{RT_1} 10^{-5} (32 \varphi_{1,o_2d}) \right] = \dot{Q}_{2d} \left[\frac{p_2}{RT_2} 10^{-5} (32 \varphi_{2,o_2d}) \right] - \dot{Q}_{3d} \left[\frac{p_3}{RT_3} 10^{-5} (32 \varphi_{3,o_2d}) \right]$$

$$\dot{Q}_{1d} \left[\frac{p_1}{RT_1} 10^{-5} (44 \varphi_{1,co_2d}) \right] = \dot{Q}_{2d} \left[\frac{p_2}{RT_2} 10^{-5} (44 \varphi_{2,co_2d}) \right] - \dot{Q}_{3d} \left[\frac{p_3}{RT_3} 10^{-5} (44 \varphi_{3,co_2d}) \right]$$

e risolvendo a sistema le due equazioni si ha:

$$\dot{Q}_{1d} = \dot{Q}_{2d} \frac{\frac{p_2}{T_2} \times (\varphi_{2,o_2d} \times \varphi_{3,co_2d} - \varphi_{2,co_2d} \times \varphi_{3,o_2d})}{\frac{p_1}{T_1} \times (\varphi_{1,o_2d} \times \varphi_{3,co_2d} - \varphi_{1,co_2d} \times \varphi_{3,o_2d})}$$

Una volta nota la portata volumetrica secca \dot{Q}_{1d} si può procedere al calcolo della portata volumetrica umida normalizzata rispetto alle condizioni di pressione e temperatura standard di 101325 Pa e 273.15 K

$$\dot{Q}_{1w} = \dot{Q}_{1d} \frac{101325}{p_1} \frac{T_1}{273.15} \frac{100}{(100 - \varphi_{1,H_2O})}$$

3.7. Incertezza della portata in camera di post-combustione

Per quanto riguarda l'incertezza sulla stima è necessario calcolare l'incertezza standard composta sulla stima di \dot{Q}_1 , ricorrendo alle prescrizioni della norma UNI 16911:2013 opportunamente adatta per considerare solo il contributo dell'ossigeno secco.

$$\frac{u(\dot{Q}_{1d})}{\dot{Q}_{1d}} = \sqrt{\left(\frac{u(\dot{Q}_{2d})}{\dot{Q}_{2d}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{1,o_2d})}{\rho_{1,o_2d} - \rho_{3,o_2d}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{3,o_2d})}{\rho_{1,o_2d} - \rho_{3,o_2d}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{2,o_2d})}{\rho_{2,o_2d} - \rho_{3,o_2d}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{3,o_2d})}{\rho_{2,o_2d} - \rho_{3,o_2d}} \right)^2}$$

Dove il primo termine sotto radice rappresenta l'incertezza relativa sulla portata nella sezione S2 – valutabile secondo la UNI 16911:2013, i termini successivi la propagazione dell'incertezza riferita alle differenze tra le densità fittizie.

L'incertezza relativa della singola densità fittizia può essere espressa tramite le seguenti relazioni, dove il contributo all'incertezza indotta dalla massa molare è introdotta solo rispetto all'ossigeno, a differenza di quanto accadrebbe nel calcolo dell'incertezza per la densità di un gas multicomponente.

$$u(\rho_{1,o_2d}) = \rho_{1,o_2d} \sqrt{\left(\frac{u(p_1)}{p_1} \right)^2 + \left(\frac{u(T_1)}{T_1} \right)^2 + \left(\frac{u(M_{1,o_2d})}{M_{1,o_2}} \right)^2}$$

$$u(\rho_{2,o_2d}) = \rho_{2,o_2d} \sqrt{\left(\frac{u(p_2)}{p_2} \right)^2 + \left(\frac{u(T_2)}{T_2} \right)^2 + \left(\frac{u(M_{2,o_2d})}{M_{2,o_2d}} \right)^2}$$

$$u(\rho_{3,o_2d}) = \rho_{3,o_2d} \sqrt{\left(\frac{u(p_3)}{p_3} \right)^2 + \left(\frac{u(T_3)}{T_3} \right)^2 + \left(\frac{u(M_{3,o_2d})}{M_{3,o_2d}} \right)^2}$$

l'incertezza sulla massa molare parziale e sulla frazione volumetrica del tenore d'ossigeno possono essere valutate secondo le relazioni proposte in normativa, modificandole considerando la sola quota parte dell'ossigeno, con l'ipotesi che il coefficiente di sensibilità di variazione della massa molare rispetto alla concentrazione d'ossigeno del gas secco coincida con quello del gas umido:

$$u^2(M_{1,o_{2d}}) = \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{1,o_{2d}}} \right)_d^2 \times u^2(\varphi_{1,o_{2d}}) \quad , \text{dove:} \quad \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{1,o_{2d}}} \right)_d^2 \cong \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{1,o_{2d}}} \right)_w^2 = 4 * 10^{-5}$$

L'incertezza standard relativa al computo del calcolo della portata volumetrica umida, normalizzata, o relativa ad un livello di ossigeno di riferimento segue le indicazioni della normativa UNI 16911:2013- Annesso F.

Per l'applicazione del metodo proposto e la relativa incertezza sulla misura risulta fondamentale che le grandezze che caratterizzano le relazioni esposte, variabili termodinamiche e concentrazioni volumetriche nelle tre sezioni coinvolte siano misurate in maniera sincrona.

Il calcolo dell'incertezza relativo alle grandezze della sezione S2, in termini di portata volumetrica e di massa secca e umida, segue le indicazioni della normativa UNI 16911:2013- Annesso F, che considera l'incertezza standard combinata delle grandezze coinvolte nella misura della velocità tramite misure di pressione differenziale.

3.8. Programma di monitoraggio proposto

La metodologia sviluppata e proposta, basata sulla stima indiretta della portata in camera di post-combustione, prevede un tempo tecnico di misura di 50 minuti, intervallo di tempo entro il quale per garantire che la misura sia effettuata ad un regime di funzionamento stazionario, in termini di portata, è necessario agire sul sistema di supervisione controllo DCS che regola la portata d'aria primaria e l'aspirazione, al fine di mantenere entro soglie predefinite due parametri fondamentali, la concentrazione di monossido di carbonio e la temperatura in camera di post-combustione. L'arco temporale di 50 minuti entro il quale si svolge la misurazione ed entro il quale la portata d'aria in camera di post-combustione è mantenuta costante è tale da non pregiudicare le soglie di questi due parametri; tuttavia a seguito della misura il DCS deve riprendere il suo normale funzionamento e regimare l'impianto. Viene pertanto proposto un programma di acquisizione di questo tipo:

Su base giornaliera: 2 Misurazioni della portata massica al giorno, intervallate indicativamente di 3 ore.

Su base annua: 2 Misurazioni della portata massica all'anno, intervallate di 6 mesi.

Conclusioni

La metodologia di stima della portata presentata nel documento si propone come un metodo di misura indiretto della portata in camera di post-combustione, che nasce in seguito ad un'analisi di fattibilità della misurazione diretta [1], [2], risultata non praticabile a causa delle peculiarità del flusso gassoso ad alta temperatura in camera di post-combustione e dei limiti tecnologici degli strumenti di misura esistenti. La metodologia proposta è sviluppata attorno a tre azioni di misura ed elaborazione principali:

- Misura della Portata massica a valle del generatore di vapore per mezzo di misure di pressione differenziale con tubo di Pitot di tipo-S, modificando le prescrizioni della normativa [UNI 16911-1:2013] in termini di punti di misura della griglia e periodi di acquisizione.
- Misura sincrona delle componenti volumetriche percentuali del gas di combustione e aria ambiente nelle tre sezioni definite.
- Bilancio di massa per risalire alla portata in camera di post-combustione.

La metodologia è stata sviluppata a partire dall'acquisizione ed analisi dei dati raccolti da una campagna di misure sperimentali effettuate sull'impianto ed avvalendosi di un precedente studio di termodinamica computazionale [5] effettuato dal gruppo di ricerca, su un modello dell'impianto.

I caratteri salienti ed innovativi della metodologia riguardano principalmente due aspetti, il primo connesso alla procedura di misura della portata a valle del generatore di vapore, ridefinita rispetto alla norma, con una griglia di misura e periodi di acquisizione adatti a mediare tra diverse necessità: contenere l'incertezza di statistica misura, descrivere le disomogeneità del flusso caratteristiche della sezione in cui viene effettuata la misura, mantenere una regolazione dell'impianto tale da garantire una portata massica costante durante la prova.

La durata totale del campionamento di 50 minuti, permette di soddisfare questi requisiti.

Il secondo aspetto riguarda la stima della portata effettuata per mezzo della rilevazione, sincrona delle concentrazioni volumetriche del gas, in particolare dell'ossigeno e dell'aria ambiente, grazie alle quali è possibile risalire per mezzo del bilancio di massa, alla portata in camera di post-combustione. La stima dell'incertezza di misura associata alla misura di portata a valle del generatore di vapore viene effettuata seguendo le indicazioni della normativa UNI 16911-1:2013, mentre l'incertezza composta associata alla stima della portata in camera di post-combustione ricavata per mezzo del principio della conservazione della massa applicato alla differenza del tenore di ossigeno tra le due sezioni, è stata rielaborata.

Riferimenti bibliografici

- [1] Impianto Smaltimento rifiuti sanitari Mengozzi Spa – “Misure di Portata in camera di Post combustione -possibili interventi” – Laboratorio di Fluidodinamica Ciclope – DIN – Unibo
- [2] Impianto smaltimento rifiuti sanitari Mengozzi Spa -Analisi di possibili sistemi di misura della portata in camera di combustione – Laboratorio di Fluidodinamica Ciclope – DIN – Unibo
- [3] UNI 101169:2001 Misure alle emissioni - Determinazione della velocità e della portata di flussi gassosi convogliati per mezzo del tubo di Pitot.
- [4] UNI EN ISO 16911:2013 Stationary source emission – Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts – Part 1: Manual reference methods.
- [5] Studio di simulazione fluidodinamica di verifica delle condizioni di esercizio delle camere di post combustione del termovalorizzatore di Mengozzi S.p.A. e contestuale valutazione della distribuzione delle temperature all’interno delle camere citate nelle condizioni di esercizio simulate – RED – Dott. Ing. Riccardo Rossi
- [6] ISO 12039:2001 Stationary source emissions -- Determination of carbon monoxide, carbon dioxide and oxygen -- Performance characteristics and calibration of automated measuring systems
- [7] UNI EN 14790:2006 Emissioni da sorgente fissa - Determinazione del vapore acqueo in condotti
- [8] UNI-EN 14789:2006 Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in volume di ossigeno (O₂) - Metodo di riferimento – Paramagnetismo
- [9] Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. HW Coleman, WG Steele – 2009. ISBN 978-0-470-16888-2

ALLEGATO B

Programma di monitoraggio per la determinazione della portata in uscita dalla camera di post-combustione

Frequenza su base annua	2 campagne di misura all'anno, intervallate di almeno 4 mesi, da svolgersi nel periodo estivo e nel periodo invernale														
Campagna di misurazione	Almeno 3 misurazioni: 1 per ogni condizione di carico dell'impianto (vd. <i>assetto impianto</i>) Se più misurazioni sono condotte nell'arco di un giorno, rispettare un intervallo di almeno 3 ore tra le misurazioni														
Durata singola misurazione	50 minuti totali														
Denominazione sezioni di misura	S1					S2					S3				
Ubicazione sezioni di misura	Uscita post-combustione 1					Uscita generatore di vapore					Ambiente esterno nei pressi del generatore di vapore				
Parametri misurati o ricavati indirettamente ⁽¹⁾															
Composizione % fumi secchi [v/v%]	$\varphi_{1,o,d}$	$\varphi_{1,co_2,d}$		$\varphi_{1,co,d}$	$\varphi_{1,N_2,d}$	$\varphi_{2,o,d}$	$\varphi_{2,co_2,d}$		$\varphi_{2,co,d}$	$\varphi_{2,N_2,d}$	$\varphi_{3,o,d}$	$\varphi_{3,co_2,d}$		$\varphi_{3,co,d}$	$\varphi_{3,N_2,d}$
Composizione % fumi umidi [v/v%]	φ_{1,H_2O}	$\varphi_{1,o,w}$	$\varphi_{1,co_2,w}$	$\varphi_{1,co,w}$	$\varphi_{1,N_2,w}$	φ_{2,H_2O}	$\varphi_{2,o,w}$	$\varphi_{2,co_2,w}$	$\varphi_{2,co,w}$	$\varphi_{2,N_2,w}$	φ_{3,H_2O}	$\varphi_{3,o,w}$	$\varphi_{3,co_2,w}$	$\varphi_{3,co,w}$	$\varphi_{3,N_2,w}$
Umidità Relativa [v/v %]	$U_{r1}^{(2)}$					$U_{r2}^{(2)}$					$U_{r3}^{(2)}$				
Pressione statica interna [Pascal]	Ps1					Ps2					--				
Temperatura interna [°C]	T ₁					T ₂					--				
Pressione statica ambiente [Pascal]	P _{amb,1}					P _{amb,2}					P _{amb,3}				
Temperatura statica ambiente [°C]	T _{amb,1}					T _{amb,2}					T _{amb,3}				
Frequenza di acquisizione dati [1/s]	1/60					1/60					1/60				
Numero campioni	50					50					50				
Durata totale di misura [min]	50					50					50				
Lunghezza diametro D1 [m]						d1									
Lunghezza diametro D3 [m]						d3									
Numero campioni per diametro						3									

Pressione dinamica [Pascal]		Diametro	Punto	Coordinata [m]	Pressione dinamica	Inclinazion e sonda
		D1 – 0°	1	0,05	Pd₁	θ_1
			2	0,1	Pd₂	θ_2
			3	0,25	Pd₃	θ_3
			4	0,4	Pd₄	θ_4
			5	0,6	Pd₅	θ_5
			6	0,8	Pd₆	θ_6
			7	0,95	Pd₇	θ_7
			8	1,1	Pd₈	θ_8
			9	1,15	Pd₉	θ_9
		D2 – 45°	10	0,05	Pd₁₀	θ_{10}
			11	0,1	Pd₁₁	θ_{11}
			12	0,25	Pd₁₂	θ_{12}
			13	0,4	Pd₁₃	θ_{13}
			14	0,6	Pd₁₄	θ_{14}
			15	0,8	Pd₁₅	θ_{15}
			16	0,95	Pd₁₆	θ_{16}
			17	1,1	Pd₁₇	θ_{17}
			18	1,15	Pd₁₈	θ_{18}
		D3 – 90°	19	0,05	Pd₁₉	θ_{19}
			20	0,1	Pd₂₀	θ_{20}
			21	0,25	Pd₂₁	θ_{21}
			22	0,4	Pd₂₂	θ_{22}
			23	0,6	Pd₂₃	θ_{23}
			24	0,8	Pd₂₄	θ_{24}
			25	0,95	Pd₂₅	θ_{25}
			26	1,1	Pd₂₆	θ_{26}
			27	1,15	Pd₂₇	θ_{27}
		D4 – 135°	28	0,05	Pd₂₈	θ_{28}
			29	0,1	Pd₂₉	θ_{29}
			30	0,25	Pd₃₀	θ_{30}
			31	0,4	Pd₃₁	θ_{31}
			32	0,6	Pd₃₂	θ_{32}
			33	0,8	Pd₃₃	θ_{33}
			34	0,95	Pd₃₄	θ_{34}
			35	1,1	Pd₃₅	θ_{35}
36	1,15		Pd₃₆	θ_{36}		

Pressione dinamica [Pascal]		Punto di controllo	37	0,6	Pd₃₇	θ_{37}	
Pressione statica [Pascal]		Diametro	Punto	Coordinata [m]	Pressione statica	Inclinazione e sonda	
		D1 – 0°	3	0,25	Pst₃	θ_3	
			7	0,95	Pst₇	θ_7	
		D2 – 45°	12	0,25	Pst₁₂	θ_{12}	
			16	0,95	Pst₁₆	θ_{16}	
		D3 – 90°	21	0,25	Pst₂₁	θ_{21}	
			25	0,95	Pst₂₅	θ_{25}	
D4 – 135°	30	0,25	Pst₃₀	θ_{30}			
	34	0,95	Pst₃₄	θ_{34}			
Pressione statica [Pascal]		Punto di controllo	37	0,6	Pst₃₇	θ_{37}	
Frequenza acquisizione [Hz]		1					
Numero campioni per punto		15					
Durata totale di misura [secondi]		15					
Modalità di acquisizione dati di composizione volumetrica	in sincrono nelle 3 sezioni						
Norme di riferimento							
Misure di composizione volumetrica fumi secchi e umidi	ISO 12039:2001, UNI EN 14790:2017, UNI-EN 14789:2006						
Modalità di acquisizione dati di composizione fumi	<p>(1) I parametri elencati sono misurati direttamente secondo le norme sopra citate oppure ricavati per via indiretta dalle misure effettuate. I parametri <u>misurati direttamente</u>, con frequenza di acquisizione $1/60 \text{ s}^{-1}$, sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Per la sezione S1: φ_{1,O_2d}, φ_{1,CO_2d}, $\varphi_{1,COd}$ (O₂, CO₂ e CO a secco) + φ_{1,H_2O} (vd. nota 2 sull'acquisizione dati di Umidità) • Per la sezione S2: φ_{2,O_2d}, φ_{2,CO_2d}, $\varphi_{2,COd}$ (O₂, CO₂ e CO a secco) • Per la sezione S3: φ_{3,O_2d}, φ_{3,CO_2d}, $\varphi_{3,COd}$ (O₂, CO₂ e CO a secco) <p>Il dato di Umidità nelle sezioni S2 e S3 è acquisito come misura media (vd. nota 2 sull'acquisizione dati di Umidità). La concentrazione di N₂ a secco e la concentrazione di tutte le componenti volumetriche a umido sono ricavate <u>per via indiretta</u>, sulla base delle misure sopra menzionate e della misura media di Umidità mediante UNI EN 14790:17.</p>						

<p>Modalità di acquisizione dati di Umidità</p>	<p>(2) L'acquisizione in S1 dell'Umidità relativa (Ur) con FTIR o N-DIR avviene in continuo e in contemporanea alla determinazione con la UNI EN 14790:17. La misura in continuo è validata da Arpae sulla base del confronto con la misura media dell'Umidità (Ur1) ottenuta con la UNI EN 14790:17; in caso di mancata validazione, la misura è effettuata unicamente, per il secondo ciclo, con la UNI EN 14790:17. I dati di misura in continuo eventualmente non validati ottenuti al primo ciclo sono comunque trasmessi come indicazione di massima sulla variabilità istantanea della misura di Umidità. La misura dell'Umidità in S2 segue il metodo UNI EN 14790:17 La misura dell'Umidità per S3 (aria ambiente presente nell'intorno del generatore di vapore) segue il metodo UNI EN 14790:17 (modificato in base alle condizioni presenti) o altro metodo equivalente.</p>																																													
<p>Misura delle variabili Termodinamiche dei fumi</p>	<p>UNI 16911:2013</p>																																													
<p>Misura delle variabili Termodinamiche ambiente esterno</p>	<p>UNI 16911:2013</p>																																													
<p>Misura Dimensionale del condotto</p>	<p>UNI 16911:2013</p>																																													
<p>Determinazione della velocità per mezzo di misure di pressione differenziale con Pitot-S</p>	<p>UNI 16911:2013 Modificata nella griglia e nelle frequenze e periodi di campionamento, come sopra indicato</p>																																													
<p>Altri dati da acquisire durante la misurazione</p>	<p>Acquisizione da effettuare a partire da 3 ore prima della misurazione e fino a 3 ore dopo la misurazione. Se più misurazioni sono effettuate in una singola giornata, l'acquisizione delle variabili dovrà iniziare 3 ore prima della prima misurazione e terminare tre ore dopo l'ultima misurazione Sincronizzazione tra l'orario DCS/SMP/SME e l'orario di acquisizione delle misure nelle sezioni necessaria</p> <table border="1" data-bbox="416 1002 2148 1457"> <thead> <tr> <th data-bbox="416 1002 555 1038">Report</th> <th data-bbox="555 1002 815 1038">Tag</th> <th data-bbox="815 1002 1832 1038">Descrizione</th> <th data-bbox="1832 1002 2148 1038">Acquisizione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="416 1038 555 1075"></td> <td data-bbox="555 1038 815 1075">Carico</td> <td data-bbox="815 1038 1832 1075">Carico orario dei rifiuti alimentati al forno</td> <td data-bbox="1832 1038 2148 1075">Ora *</td> </tr> <tr> <td data-bbox="416 1075 555 1112" rowspan="9">SME</td> <td data-bbox="555 1075 815 1112">O2 post 1</td> <td data-bbox="815 1075 1832 1112">Tenore di O₂ in testa alla camera di post-combustione 1</td> <td data-bbox="1832 1075 2148 1112">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1112 815 1149">Temperatura post 1</td> <td data-bbox="815 1112 1832 1149">Temperatura in testa alla camera di post-combustione 1</td> <td data-bbox="1832 1112 2148 1149">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1149 815 1185">O2 post 2</td> <td data-bbox="815 1149 1832 1185">Tenore di O₂ in testa alla camera di post-combustione 2</td> <td data-bbox="1832 1149 2148 1185">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1185 815 1222">Temperatura post 2</td> <td data-bbox="815 1185 1832 1222">Temperatura in testa alla camera di post-combustione 2</td> <td data-bbox="1832 1185 2148 1222">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1222 815 1259">Temperatura fumi</td> <td data-bbox="815 1222 1832 1259">Temperature dei fumi a camino</td> <td data-bbox="1832 1222 2148 1259">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1259 815 1295">Pressione fumi</td> <td data-bbox="815 1259 1832 1295">Pressione dei fumi a camino</td> <td data-bbox="1832 1259 2148 1295">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1295 815 1332">Portata fumi</td> <td data-bbox="815 1295 1832 1332">Portata dei fumi a camino</td> <td data-bbox="1832 1295 2148 1332">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1332 815 1369">-</td> <td data-bbox="815 1332 1832 1369">Tutti i parametri di composizione disponibili</td> <td data-bbox="1832 1332 2148 1369">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="416 1369 555 1406" rowspan="3">SMP</td> <td data-bbox="555 1369 815 1406">QF3-4</td> <td data-bbox="815 1369 1832 1406">Portata complessiva in ingresso al 2° stadio di filtri a maniche</td> <td data-bbox="1832 1369 2148 1406">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1406 815 1442">TI 375</td> <td data-bbox="815 1406 1832 1442">Temperatura dei fumi a SMP</td> <td data-bbox="1832 1406 2148 1442">Minuto</td> </tr> <tr> <td data-bbox="555 1442 815 1457">PI 370A</td> <td data-bbox="815 1442 1832 1457">Pressione dei fumi a SMP</td> <td data-bbox="1832 1442 2148 1457">Minuto</td> </tr> </tbody> </table>			Report	Tag	Descrizione	Acquisizione		Carico	Carico orario dei rifiuti alimentati al forno	Ora *	SME	O2 post 1	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto	Temperatura post 1	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto	O2 post 2	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto	Temperatura post 2	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto	Temperatura fumi	Temperature dei fumi a camino	Minuto	Pressione fumi	Pressione dei fumi a camino	Minuto	Portata fumi	Portata dei fumi a camino	Minuto	-	Tutti i parametri di composizione disponibili	Minuto	SMP	QF3-4	Portata complessiva in ingresso al 2° stadio di filtri a maniche	Minuto	TI 375	Temperatura dei fumi a SMP	Minuto	PI 370A	Pressione dei fumi a SMP	Minuto
Report	Tag	Descrizione	Acquisizione																																											
	Carico	Carico orario dei rifiuti alimentati al forno	Ora *																																											
SME	O2 post 1	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto																																											
	Temperatura post 1	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto																																											
	O2 post 2	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto																																											
	Temperatura post 2	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto																																											
	Temperatura fumi	Temperature dei fumi a camino	Minuto																																											
	Pressione fumi	Pressione dei fumi a camino	Minuto																																											
	Portata fumi	Portata dei fumi a camino	Minuto																																											
	-	Tutti i parametri di composizione disponibili	Minuto																																											
	SMP	QF3-4	Portata complessiva in ingresso al 2° stadio di filtri a maniche	Minuto																																										
TI 375		Temperatura dei fumi a SMP	Minuto																																											
PI 370A		Pressione dei fumi a SMP	Minuto																																											

		-	Tutti i parametri di composizione disponibili	Minuto
	DCS	PI_201	Pressione in camera di combustione Forno 1	Minuto
		PI_251	Pressione in camera di combustione Forno 2	Minuto
		TI_206_F1	Temperatura in camera di combustione Forno 1	Minuto
		TI_206_F2	Temperatura in camera di combustione Forno 2	Minuto
		PI_206	Pressione in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto
		PI_256	Pressione in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto
		PI_309	Pressione in uscita dal generatore di vapore	Minuto
		TI_318	Temperatura in uscita dal generatore di vapore	Minuto
		O2_416	Tenore di O ₂ in uscita dal generatore di vapore	Minuto
		FI_313	Portata di vapore in uscita dal generatore di vapore	Minuto
		PI_312	Pressione del vapore in uscita	Minuto
		TI_312	Temperatura del vapore in uscita dal generatore di vapore	Minuto
		TI_416	Temperatura dell'acqua in ingresso al generatore di vapore	Minuto
		TI_322	Temperatura nella sezione inferiore della colonna di lavaggio TL304	Minuto
		TI_332	Temperatura nella sezione inferiore della colonna di lavaggio TL305	Minuto
		TI_321	Temperatura in testa alla colonna di lavaggio TL304	Minuto
	TI_328	Temperatura in testa alla colonna di lavaggio TL305	Minuto	
	* registrare manualmente gli incrementi di carico riportati dal DCS ogni 15 minuti e non salvati automaticamente dal sistema			
Assetto impianto (configurazione impiantistica con generatore di vapore in esercizio)	<p>Gestione in manuale della portata di aria primaria e della portata di aria aspirata (per garantire un valore pressoché costante nella fase di campionamento)</p> <p>Alimentazione rifiuti con carico orario pressoché costante a partire da almeno 1 ora prima l'inizio del campionamento</p> <p>Scenari di carico orario dei rifiuti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Carico "basso": decimo percentile (10%) della distribuzione del carico orario, < 3000 kg/h (possibilità di intervento del bruciatore per mantenere la temperatura in camera di post-combustione superiore agli 850 °C) - Carico "medio": mediana della distribuzione del carico orario, 3500-3900 kg/h (condizione di esercizio normale) - Carico "alto": novantesimo percentile (90%) della distribuzione del carico orario, > 4500 kg/h (possibilità di blocco del carico per alta temperatura e/o basso ossigeno) <p>L'ordine e la suddivisione in giorni dello svolgimento delle misure è a discrezione del gestore</p>			

ALLEGATO C

FORMULARIO DI ACQUISIZIONE DATI DI PROCESSO

Allegato C - FORMULARIO DI ACQUISIZIONE DATI DI PROCESSO

Campagna di misura per la determinazione della portata in uscita dalla camera di post-combustione

MISURA n° _____ Data: _____

Condizione di carico: tipica massima minima

Note sulla condizione di carico:

--

Programma di misura

Acquisizione dati di processo (3 h) ----- MISURA (50 min) ----- Acquisizione dati di processo (3 h)

Sincronizzazione tra dati misurati nei campionamenti e dati acquisiti con strumentazione d'impianto

Occorre individuare a quale minuto della serie di dati sulle variabili di processo acquisite a DCS, SMP e SME corrisponde l'avvio dei campionamenti nelle tre sezioni S1, S2, S3.

- Verificare preventivamente gli orari di DCS, SMP, –SME e degli strumenti utilizzati dal Laboratorio in modo da tener conto degli eventuali scostamenti (al netto di discrepanze nell'uso di ora solare o legale, da segnalare nelle tabelle sottostanti)
- Attendere lo scoccare del minuto nel DCS d'impianto per avviare i campionamenti
- Far partire in sincrono le misurazioni nelle tre sezioni S1, S2, S3
- Annotare nelle tabelle sottostanti gli orari di avvio delle misure. Usare il formato *hh:mm*.

Orario di avvio della MISURA nelle sezioni	
---	--

Orario corrispondente nella strumentazione d'impianto	
Strumento	Orario
DCS	
SMP	
SME	
Eventuali altri controllori (specificare)	

MISURA n° _____

Data: _____

Checklist dei dati da acquisire dalla strumentazione d'impiantoDati da recuperare a partire **da 3 h prima e fino a 3 h dopo la misurazione**.

Riportare i dati ottenuti dai report SME, SMP e DCS in un foglio di calcolo, con indicate la denominazione delle singole voci (tag e descrizione) e l'orario di acquisizione.

Report	Tag	Descrizione	Acquisizione
SME	Carico	Carico orario dei rifiuti alimentati al forno	Ora *
	O2 post 1	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto
	Temperatura post 1	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto
	O2 post 2	Tenore di O ₂ in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto
	Temperatura post 2	Temperatura in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto
	Temperatura fumi	Temperature dei fumi a camino	Minuto
	Pressione fumi	Pressione dei fumi a camino	Minuto
	Portata fumi	Portata dei fumi a camino	Minuto
	-	Tutti i parametri di composizione disponibili	Minuto
SMP	QF3-4	Portata complessiva in ingresso al 2° stadio di filtri a maniche	Minuto
	TI_375	Temperatura dei fumi a SMP	Minuto
	PI_370A	Pressione dei fumi a SMP	
	-	Tutti i parametri di composizione disponibili	Minuto
DCS	PI_201	Pressione in camera di combustione Forno 1	Minuto
	PI_251	Pressione in camera di combustione Forno 2	Minuto
	TI_206_F1	Temperatura in camera di combustione Forno 1	Minuto
	TI_206_F2	Temperatura in camera di combustione Forno 2	Minuto
	PI_206	Pressione in testa alla camera di post-combustione 1	Minuto
	PI_256	Pressione in testa alla camera di post-combustione 2	Minuto
	PI_309	Pressione in uscita dal generatore di vapore	Minuto
	TI_318	Temperatura in uscita dal generatore di vapore	Minuto
	O2_416	Tenore di O ₂ in uscita dal generatore di vapore	Minuto
	FI_313	Portata di vapore in uscita dal generatore di vapore	Minuto
	PI_312	Pressione del vapore in uscita	Minuto
	TI_312	Temperatura del vapore in uscita dal generatore di vapore	Minuto
	TI_416	Temperatura dell'acqua in ingresso al generatore di vapore	Minuto
	TI_322	Temperatura nella sezione inferiore della colonna di lavaggio TL304	Minuto
	TI_332	Temperatura nella sezione inferiore della colonna di lavaggio TL305	Minuto
	TI_321	Temperatura in testa alla colonna di lavaggio TL304	Minuto
TI_328	Temperatura in testa alla colonna di lavaggio TL305	Minuto	

* registrare manualmente gli incrementi di carico riportati dal DCS ogni 15 minuti e non salvati automaticamente dal sistema

Nota: Se nell'arco della stessa giornata sono effettuate più misurazioni, proseguire con l'acquisizione dei dati d'impianto senza interruzione.