



**Q.tHermo s.r.l.**  
Via Baccio da Montelupo 52  
50142 Firenze

**Q.tHermo s.r.l.**  
L'Amministratore Delegato  
Dott. Ing. Roberto Barilli

## IMPIANTO DI RECUPERO ENERGIA DA INCENERIMENTO DI RIFIUTI NON PERICOLOSI LOC. CASE PASSERINI - SESTO FIORENTINO (FI)

DOMANDA DI AUTORIZZAZIONE UNICA  
PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DEGLI IMPIANTI  
DI PRODUZIONE ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI  
art.12, D.Lgs. 29/12/2003, n. 387 e s.m.i.  
artt. 11-12, L.R. 24/02/2005, n. 39

### PROGETTO DEFINITIVO

Responsabile di Progetto:



Ing. Carlo Botti

Dott. Ing. CARLO BOTTI  
ALBO INGEGNERI DELLA PROV. DI FIRENZE  
N. 3202

Gruppo di lavoro:

Opere Architettoniche

Opere Civili e Strutturali

Opere Elettromeccaniche

Gae Aulenti Architetti Associati  
4, Piazza San Marco  
20121 Milano



Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
A	01/07/2014	Emissione per prescrizioni VIA	S. Olivi	D. Corrente	T. Severi
Titolo			Elaborato 073		
Relazione tecnica sulla misura della temperatura dei fumi in post combustione			Codice	MEC 100	





## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>GENERATORI DI VAPORE .....</b>	<b>4</b>
2.1	DATI DI PROGETTO .....	5
2.2	CAMERA DI COMBUSTIONE.....	6
2.2.1	ZONA DI COMBUSTIONE.....	6
2.2.2	ZONA DI POST COMBUSTIONE.....	6
<b>3</b>	<b>MISURE DI TEMPERATURA .....</b>	<b>8</b>
3.1	STRUMENTAZIONE DI MISURA.....	8
3.2	VARIAZIONE DEL CARICO DI FUNZIONAMENTO .....	8
3.3	CONCLUSIONI.....	10
<b>4</b>	<b>STRUMENTAZIONE INSTALLATA.....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>ALGORITMO MATEMATICO .....</b>	<b>12</b>
5.1	ALTEZZA DELLA POST COMBUSTIONE.....	12
5.2	TEMPERATURA DELLA POST COMBUSTIONE.....	12
5.3	PORTATA FUMI .....	13
<b>6</b>	<b>VALIDAZIONE E MANUTENZIONE DELL'ALGORITMO .....</b>	<b>13</b>

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione ha lo scopo di descrivere il metodo di misura della temperatura dei fumi nella zona di post-combustione dei due Generatori di Vapore a Griglia (GVG) dell'impianto di termovalorizzazione dei rifiuti solidi urbani di Case Passerini, Sesto Fiorentino (FI).

Considerato quanto richiesto dall'attuale legislazione in termini di temperatura di combustione dei rifiuti (Decreto Legislativo 04.03.2014, art. 15), e cioè che:

*“Gli impianti di incenerimento devono essere progettati, costruiti, equipaggiati e gestiti in modo tale che, dopo l'ultima immissione di aria di combustione, i gas prodotti dal processo di incenerimento siano portati, in modo controllato ed omogeneo, anche nelle condizioni più sfavorevoli, ad una temperatura di almeno 850 °C per almeno due secondi. Tale temperatura è misurata in prossimità della parete interna della camera di combustione, o in un altro punto rappresentativo della camera di combustione indicato dall'autorità competente.”*

Il generatore di vapore sarà conforme al dettato legislativo in termini di progetto, di realizzazione e di gestione.

## 2 GENERATORI DI VAPORE

I GVG sono del tipo di ultima generazione e ciascuno di essi sarà formato da un Sistema di Combustione a Griglia (SCG) e da un Generatore di Vapore (GV) ad esso integrato.

Il GV si sviluppa immediatamente al di sopra della griglia di combustione attraverso la zona di combustione e quindi la zona di post-combustione: i lati di entrambe sono costituiti da pareti a tubi d'acqua, rivestite da materiale refrattario ad alta conducibilità termica (prevalentemente carburo di silicio).

Il GV è composto da:

- Sezione radiante.
- Sezione convettiva.

La sezione radiante si sviluppa in senso verticale sopra la griglia di combustione dei rifiuti ed è costituita da:

- Camera di combustione divisa in:
  - zona di combustione (ZC) (camera posizionata sopra la griglia).
  - zona di post combustione (ZPC) (primo canale verticale a seguire).
- Radiante 1 (parte finale superiore del primo canale verticale).
- Radiante 2 (secondo canale verticale).



- Radiante 3 (terzo canale verticale).

La prima sezione è quella verticale sopra la griglia ed è delimitata dalla parete del fronte e dalla prima parete divisoria. I gas percorrono la prima sezione in direzione verticale dalla zona griglia all'apertura alta della parete divisoria da dove entrano nella seconda sezione invertendo la loro direzione.

La seconda e la terza parete divisoria costringono i gas combusti ad invertire la loro direzione altre due volte prima di entrare nella zona convettiva.

La sezione radiante permette un giusto scambio termico con elevata produzione di vapore e consente di entrare nella zona convettiva con temperatura sufficientemente bassa per evitare il pericolo di corrosioni dovute a deposito di sali fusi.

La separazione tra ZC e ZPC è realizzata, ad un'altezza di circa 3 m dal piano di griglia, con getti d'aria secondaria che permettono di completare la reazione di combustione.

I gas escono dalla terza sezione della camera radiante dalla apposita apertura della parete verticale posteriore e iniziano il loro percorso orizzontale di attraversamento della zona convettiva.

I fumi che escono dalla camera radiante attraversano i banchi di scambio della sezione convettiva secondo la seguente sequenza:

- Vaporizzatore 1,
- Surriscaldatore BT,
- Surriscaldatore AT,
- Surriscaldatore MT,
- Vaporizzatore 2,
- Vaporizzatore 3,
- Economizzatore 1,
- Economizzatore 2,
- Economizzatore 3.

Il vapore prodotto viene convogliato nel corpo cilindrico posizionato sopra la camera radiante, al di fuori del giro dei fumi. Dal corpo cilindrico il vapore passa nei banchi surriscaldatori da dove viene erogato a 50 bar a e 440 °C. La funzione del corpo cilindrico è quella di separare il vapore prodotto dagli elementi vaporizzanti del generatore dall'acqua di circolazione e di costituire, inoltre, il necessario polmone per i momenti di squilibrio fra il prelievo di vapore e l'alimentazione dell'acqua.

## 2.1 DATI DI PROGETTO

- Portata vapore ..... : 36,9 t/h
- Temperatura vapore ..... : 440 °C
- Pressione vapore ..... : 50 bar a
- Temperatura fumi uscita caldaia ..... : 175 °C
- Portata fumi in ZPC al 100% del carico..... : 64409 Nm<sup>3</sup>/h

- Temperatura media fumi in ZPC al 100 % del carico .....: 1055 °C
- Portata fumi in ZPC al 110 % del carico.....: 69700 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura media fumi in ZPC al 110 % del carico .....: 1060 °C

## **2.2 CAMERA DI COMBUSTIONE**

La Camera di Combustione (CC) si compone della ZC, che è il volume compreso tra la griglia di combustione e l'ultima immissione di aria di combustione, e la ZPC, che è il volume compreso tra l'ultima immissione di aria di combustione e la sezione che consente, nelle condizioni più sfavorevoli, un tempo di permanenza dei fumi di almeno 2 s.

Lo scambio termico per irraggiamento dipende infatti dalla temperatura ed è invariante rispetto al carico termico di esercizio del GVG: la condizione più sfavorevole si verifica quindi con bassi carichi termici.

La CC è progettata in modo da conseguire i seguenti obiettivi:

- assicurare il completamento della combustione, in modo che la ZPC abbia ad operare solo per la finizione dei microinquinanti combustibili;
- assicurare un irraggiamento sufficiente ad effettuare un valido essiccamento dei rifiuti nella prima zona della griglia in modo da innescare a tempo debito l'auto accensione del materiale;
- effettuare un primo assorbimento di calore per irraggiamento e limitare le perdite termiche verso l'esterno;
- mantenere una temperatura che eviti l'incollamento delle scorie e delle ceneri fuse sulle pareti;
- resistere all'erosione e alle incrostazioni nelle zone dove vi è presenza di ceneri volanti;
- presentare una struttura solida che non risenta della temperatura dei gas e delle fiamme;
- resistere all'abrasione, in particolare nelle zone a contatto diretto con i rifiuti;
- essere stagna contro infiltrazioni di aria e perdite di fumo nell'ambiente.

### **2.2.1 ZONA DI COMBUSTIONE**

La ZC è il volume compreso tra la griglia di combustione e l'ultima immissione di aria di combustione.

### **2.2.2 ZONA DI POST COMBUSTIONE**

La ZPC è il volume compreso tra l'ultima immissione di aria di combustione o di fumi riciclati e la sezione che consente, nelle condizioni di sovraccarico termico, un tempo di permanenza dei fumi di almeno 2 s.

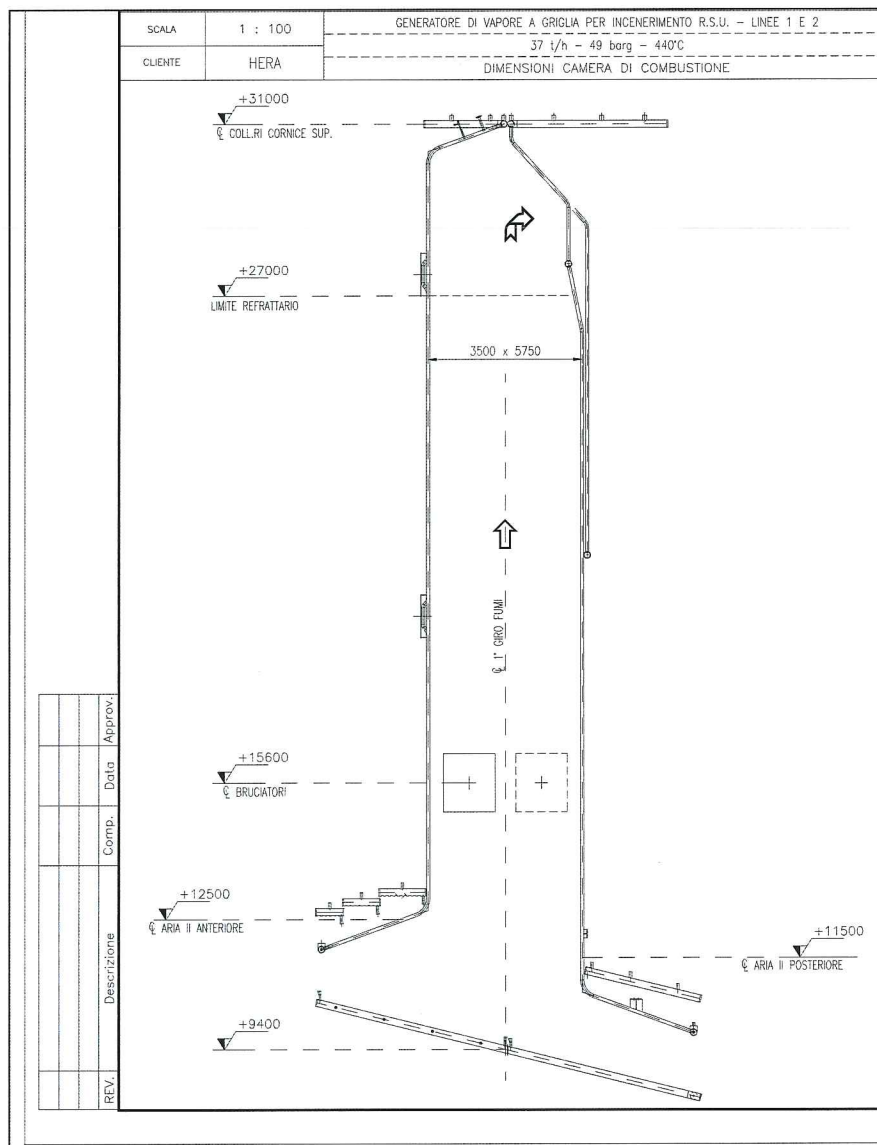
Come già detto nella premessa la normativa vigente prevede che: “...dopo l'ultima immissione di aria comburente, in modo controllato e omogeneo ed anche nelle condizioni più sfavorevoli, i fumi permangano ad una temperatura di almeno 850 °C, misurata vicino alla parete interna della CC, o in un altro punto rappresentativo della camera di combustione per almeno due secondi”.

All'inizio della zona di post-combustione sono previsti due bruciatori ausiliari, alimentati a gas naturale, per garantire che la temperatura in post-combustione non scenda al di sotto del valore prescritto.

Dalla configurazione dei Generatori di Vapore si ricavano i seguenti dati geometrici relativi alla ZPC:

- Quota ultimo ingresso di aria ..... : 12,5 m
- Dimensioni trasversali (X m x Y m) ..... : 3,5 m x 5,75 m
- Sezione..... : 20,13 m<sup>2</sup>

Questi dati geometrici potranno subire degli aggiustamenti in fase di progettazione esecutiva.





### **3 MISURE DI TEMPERATURA**

I moderni impianti di termovalorizzazione hanno dei generatori di vapore con camere di combustione e di post-combustione non adiabatiche, cioè schermate con superfici vaporizzanti della caldaia e conseguentemente la misura di temperatura dei fumi in queste zone è un problema tecnico abbastanza complesso.

#### **3.1 STRUMENTAZIONE DI MISURA**

Nel caso di camere non adiabatiche la misura con normali termocoppie viene falsata e non indica la reale temperatura dei fumi: infatti essa risente dell'irraggiamento termico della fiamma e della presenza di pareti "fredde".

Per tale motivo la temperatura "misurata in prossimità della parete interna" della camera di post-combustione non è rappresentativa della reale temperatura dei fumi.

Si è appurato infatti che, per temperature dell'ordine di 1000 °C, come quelle presenti in camera di post-combustione, l'errore di misura di una normale termocoppia è di circa 100 °C: la termocoppia indica quindi un valore di temperatura inferiore di circa 100 °C a quello reale dei fumi.

Alle particolari condizioni di temperatura, di sporco, di erosione e di corrosione, che si hanno nel primo canale del GVG il deterioramento delle termocoppie è rapidissimo (è normale avere durate variabili da 7 a 30 giorni) e pertanto non è possibile l'utilizzo di termoelementi fissi a diverse altezze della camera di post-combustione.

Alla luce delle precedenti esperienze, sono stati previsti nel progetto, per la misura delle temperature nella zona di post-combustione, dei pirometri ottici in sostituzione delle normali termocoppie.

Infatti i pirometri risentono meno di queste ultime dell'influenza dell'irraggiamento termico della fiamma e della presenza di pareti "fredde", come quelle a tubi d'acqua della zona di post-combustione: essi danno pertanto una maggiore affidabilità di misura nel tempo e non sono soggetti a sporco, erosione o deterioramento.

#### **3.2 VARIAZIONE DEL CARICO DI FUNZIONAMENTO**

Il volume dei fumi prodotti dalla combustione è funzione di diversi parametri, quali la quantità di rifiuti bruciati in un dato periodo di tempo, la loro tipologia, il loro potere calorifico, la loro umidità, la quantità di aria di combustione, sia primaria che secondaria.

Poiché il tempo di permanenza nella zona di post-combustione è funzione della portata e della temperatura dei fumi e poiché queste, per quanto appena detto, variano istante per istante, non è corretto misurare la temperatura dei fumi in un punto prefissato: occorrerebbe infatti effettuare la misura nel punto della camera di post-combustione dove tale tempo di 2 secondi ha termine.

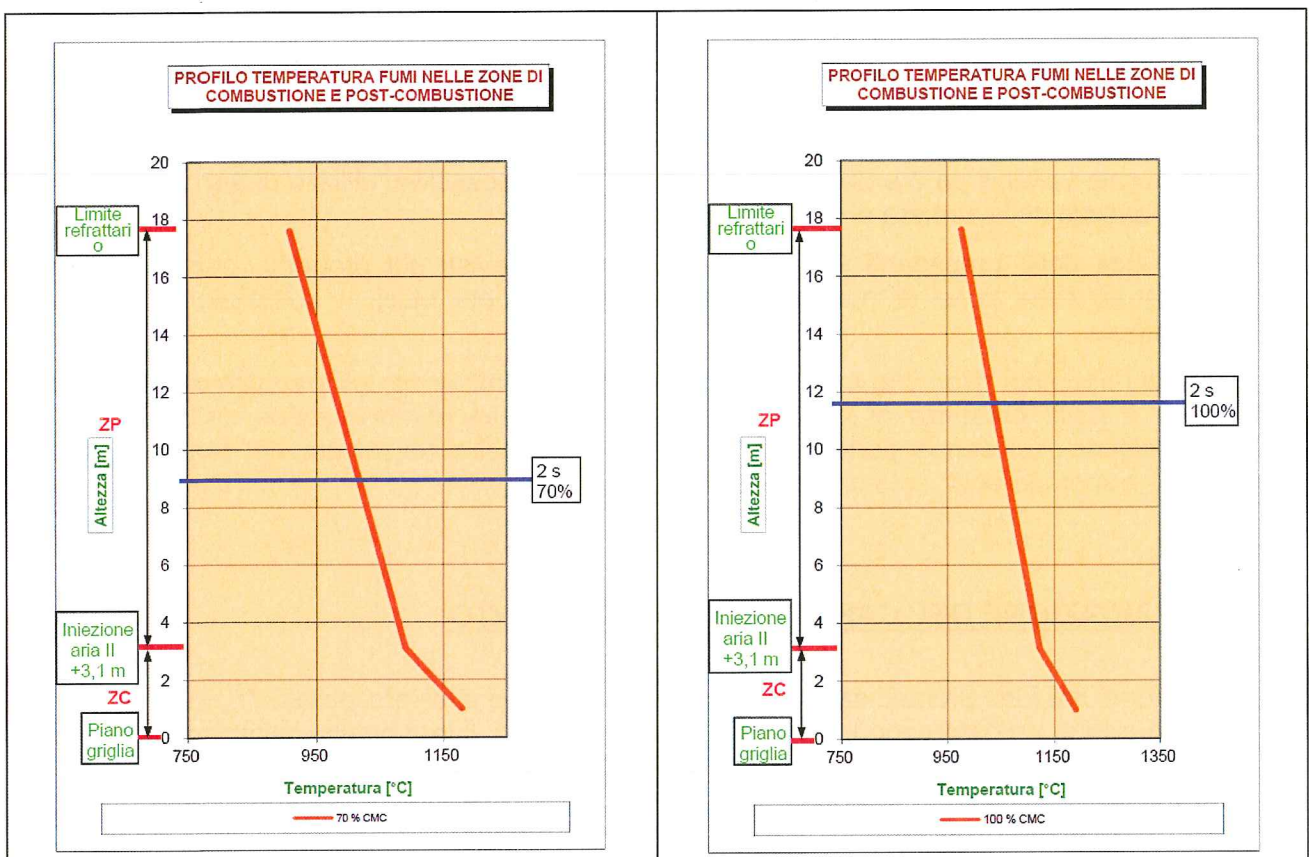
In altre parole, in condizioni di carico massimo il tempo di permanenza di 2 secondi dei fumi in zona di post-combustione ha termine nella parte alta della stessa, mentre in condizioni di basso carico termina nella parte iniziale della camera.

Considerato quindi che l'esercizio di un impianto di termovalorizzazione prevede, sia per motivi gestionali sia per motivi prettamente tecnici, che la quantità di combustibile bruciata sulla griglia di combustione vari quasi con continuità, la necessità di verificare in ogni momento il raggiungimento di una temperatura dei fumi di 850 °C, si scontra con l'esigenza di misurare tale temperatura in un punto della zona di post-combustione che varia istante per istante in altezza.

Dai calcoli termofluidodinamici di progettazione il tempo di permanenza di 2 secondi si raggiunge, nel caso in oggetto, alle seguenti altezze, in funzione del carico, inteso come potenza termica sviluppata dai rifiuti:

- 5,8 m al 70 % del carico nominale (8,9 m dall'inizio ZC),
- 6,7 m al 80 % del carico nominale (9,8 m dall'inizio ZC),
- 7,7 m al 90 % del carico nominale (10,8 m dall'inizio ZC),
- 8,7 m al 100 % del carico nominale (11,8 m dall'inizio ZC),
- 9,4 m al 110 % del carico nominale (12,5 m dall'inizio ZC).

Di seguito sono riportati i profili termici di temperatura in ZC e ZPC in due condizioni di funzionamento e un disegno della ZC e della ZPC con le quote principali.



Il calcolo è stato effettuato, per esempio, al carico nominale del 100%, con una portata fumi di 64409 Nm<sup>3</sup>/h e una temperatura media in zona post-combustione di 1055 °C, il tempo di permanenza di 2 s si ha in corrispondenza di un volume di 174 m<sup>3</sup> = [2 x (64409 / 3600) x (1055 +



273) / 273]. Con una sezione di 20,13 m<sup>2</sup> tale volume corrisponde a 8,7 m dall'ultima iniezione di aria e cioè 11,8 m dall'inizio ZC.

Come margine di sicurezza il rivestimento in refrattario, che segna il limite della ZPC, viene esteso fino a un'altezza di 14,5 (17,6 m dall'inizio ZC), cioè 5 m oltre al limite ottenuto per il funzionamento in sovraccarico.

### 3.3 CONCLUSIONI

Alla luce di quanto sopra esposto, il tempo di permanenza di 2 s risulta essere variabile in funzione del carico e poiché la verifica della corretta temperatura dei fumi si può ottenere sperimentalmente solo con l'utilizzo di strumenti di rilevazione che hanno una posizione fissa, è prassi, ottenere la temperatura in un dato punto della zona di post-combustione utilizzando un algoritmo matematico (vedere successivo Par. 5), che correli la temperatura dei fumi a una qualsiasi altezza della camera con quella misurata sperimentalmente in un punto definito.

A tale scopo sarà inserito nel Sistema di Controllo dell'impianto un algoritmo che calcoli in continuo la temperatura dei fumi in corrispondenza del punto della zona di post-combustione dove il tempo di permanenza di 2 secondi ha termine.

## 4 STRUMENTAZIONE INSTALLATA

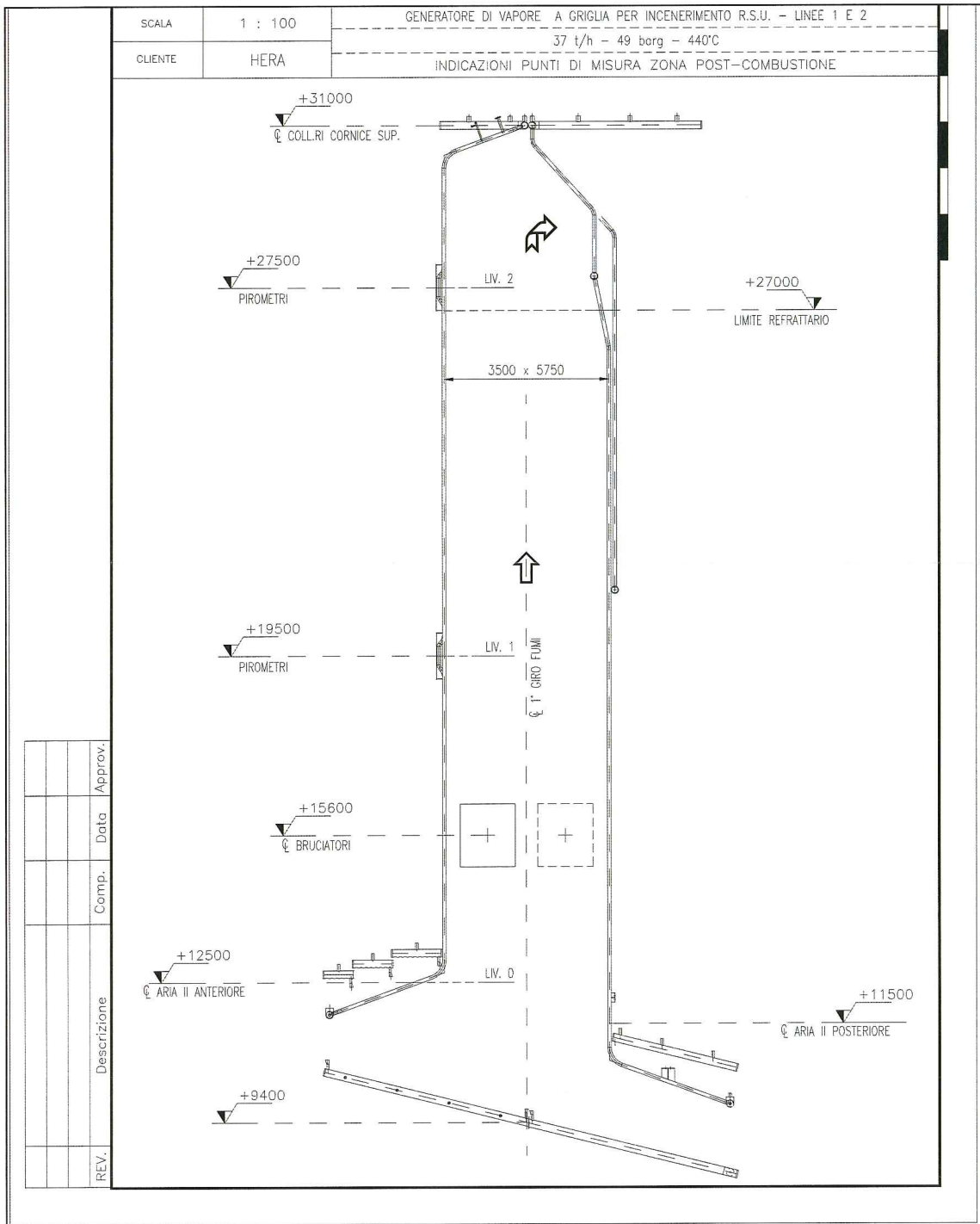
Sui GVG che saranno installati nell'impianto di termovalorizzazione rifiuti di Firenze (Linee 1 e 2) sono posizionati a diverse altezze i seguenti pirometri ottici, atti a rilevare in continuo la temperatura dei fumi in zona di post-combustione.

Pos	Descrizione	Strumento	Quota
1	Misura temperatura fumi (Livello 1) – T(Livello 1)	TT1405 TT1406	+19,5 m
2	Misura temperatura fumi (Livello 2) – T(Livello 2)	TT1407Y TT1407X TT1407Z	+27,5 m

Considerando come quota di inizio (quota 0,00) della zona di post combustione +12,5 m, a cui viene immessa l'aria secondaria (ultima immissione di aria di combustione), le misure di temperatura vengono perciò effettuate a 7 m e 15 m dalla quota 0,00. Queste quote potranno subire degli aggiustamenti in fase di progettazione esecutiva.

La sezione di passaggio fumi della zona di post-combustione, misurata dalla superficie esterna del rivestimento refrattario posto sulle pareti a tubi d'acqua, è di:

$$3,5 \text{ m} \times 5,75 \text{ m} = 20,13 \text{ m}^2.$$





## 5 ALGORITMO MATEMATICO

### 5.1 ALTEZZA DELLA POST COMBUSTIONE

L'altezza della camera di post combustione è definita come l'altezza alla quale i fumi hanno un tempo di permanenza pari a 2 s.

Viene calcolata con la seguente formula:

$$H_{2s} = [Q * ((T_{zpc} + 273,15) / 273,15) / 3600] * (2 / A_{zpc})$$

dove:

Q : portata fumi di combustione espressa in Nm<sup>3</sup>/h,

A<sub>zpc</sub>: sezione zona di post-combustione in m<sup>2</sup>.

T<sub>zpc</sub>: è la temperatura fumi in camera di post combustione, espressa in °C, calcolata in modo iterativo, con la seguente formula:

$$T_{zpc} = (T(\text{livello 1}) + T_{2s})/2$$

dove T<sub>2s</sub> è calcolata come indicato al par. 5.2

### 5.2 TEMPERATURA DELLA POST COMBUSTIONE

La temperatura dei fumi in post combustione rappresenta la temperatura raggiunta dai fumi dopo 2 s di permanenza ed è calcolata in modo iterativo con la seguente formula:

$$T_{2s} = a * H_{2s} + b \quad (\text{eq. 5.2.1})$$

dove a e b sono calcolati risolvendo il seguente sistema composto da due equazioni lineari a due incognite.

$$T(\text{Livello 2}) = a * H_2 + b \quad (\text{eq. 5.2.2})$$

$$T(\text{Livello 1}) = a * H_1 + b \quad (\text{eq. 5.2.3})$$

con

$$T(\text{Livello 2}) = \text{Media} [(P_{28TT1407X}), (P_{28TT1407Y}), (P_{28TT1407Z})]$$

$$T(\text{Livello 1}) = \text{Media} [(P_{28TT1405}), (P_{28TT1406})]$$

$$H_2 = 15 \text{ m}$$

$$H_1 = 7 \text{ m}$$

Procedendo con le iterazioni si arriva a convergenza molto rapidamente (nell'algoritmo di calcolo sono state previste 5 iterazioni).

Il calcolo in oggetto si basa sull'ipotesi di andamento lineare della temperatura.

### 5.3 PORTATA FUMI

La portata fumi di combustione potrà essere calcolata mediante una correlazione con la portata fumi al camino (in alternativa con la portata di vapore). La correlazione sarà ricavata mediante rilievi strumentali effettuati sull'impianto.

## 6 VALIDAZIONE E MANUTENZIONE DELL'ALGORITMO

Le misure effettuate dalla strumentazione in campo e l'algoritmo saranno validati attraverso delle prove sperimentali, mediante misure con pirometri a suzione, da eseguirsi durante la messa a regime dell'impianto, che saranno realizzate da **un ente terzo accreditato**.

Inoltre l'affidabilità dell'algoritmo di calcolo richiede che le misure utilizzate nel calcolo siano disponibili ed affidabili; per questo motivo risulta necessario eseguire periodicamente la manutenzione e la taratura della strumentazione coinvolta.

In particolare saranno eseguite durante l'esercizio le seguenti operazioni:

- 1) pulizia delle lenti dei pirometri ottici almeno una volta alla settimana ed ogni qual volta si rileva una misura non congruente con le misure degli altri pirometri di cui è dotata la camera di combustione;
- 2) taratura dei pirometri ottici almeno una volta ogni due anni;
- 3) verifica della misura di portata al camino almeno una volta ogni anno;
- 4) verifica sperimentale dell'algoritmo, attraverso delle misure mediante pirometri a suzione, almeno una volta ogni 4 anni o comunque al rifacimento di una superficie superiore al 50% della superficie rivestita con materiale refrattario.