

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di laurea Magistrale in

INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

in

IMPIANTI MECCANICI

**L'IMPIANTO DI TERMOVALORIZZAZIONE DI SESTO SAN
GIOVANNI: EFFICIENZA ENERGETICA ED ECONOMIA
CIRCOLARE**

CANDIDATO:

Mohamed Abdelhadi Elhousseini
Shohaib

RELATORE:

Prof. Cesare Saccani

CORRELATORI:

Ing. Ilario Tassone
Ing. Alessandro Guzzini

Anno Accademico 2019 / 20

Sessione III

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura di questa tesi con suggerimenti ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine. In particolare, ringrazio il mio relatore il professore Cesare Sacconi e l'amministratore unico del gruppo CORE Marco Luigi Cipriano per avermi concesso tale opportunità.

Un cordiale ringraziamento va ai miei correlatori, il direttore tecnico Ilario Tassone e l'ingegnere Alessandro Guzzini, per la loro disponibilità ed attenzione, senza il loro supporto e la loro guida sapiente questa tesi non esisterebbe.

Vorrei, infine, ringraziare il personale del gruppo CORE. Soprattutto, l'ingegnere Aluobi e il capo impianto Mauro Mele per il loro costante supporto.

Sommario

| | |
|---|----|
| Introduzione..... | 5 |
| 1. L'IMPIANTO DI TERMOVALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI SOLIDI URBANI (RSU) DI CORE S.P.A. | 7 |
| Descrizione tecnica dell'impianto | 7 |
| Sezione pesatura rifiuti | 8 |
| Sezione ricevimento, stoccaggio e movimentazione rifiuti..... | 8 |
| Sezione combustione | 8 |
| Ciclo termico | 11 |
| Sezione teleriscaldamento | 14 |
| Sezione depurazione fumi | 14 |
| a. Sezione di riduzione degli ossidi di azoto "NO _x "..... | 16 |
| b. Sezione elettrofiltro | 18 |
| c. Sezione torri di lavaggio e scambiatori di calore Fumi – Fumi | 21 |
| d. Sezione filtro a maniche..... | 25 |
| e. Sezione monitoraggio emissioni | 28 |
| 2. VALUTAZIONE DEL RECUPERO ENERGETICO ANNUALE DEL TERMOVALORIZZATORE: L'INDICE DI DIFFERENZA ENERGETICA R1 | 30 |
| L'indice di efficienza energetica R1..... | 30 |
| Impostazione e interpretazione dell'indice R1 | 31 |
| Il volume di controllo della caldaia | 34 |
| Il termine Ep..... | 36 |
| Il termine Ef..... | 37 |
| Il termine EI..... | 37 |
| Il fattore CCF..... | 38 |
| 3. CALCOLO DELL'INDICE D'EFFICIENZA ENERGETICA R1 PER IL TERMOVALORIZZATORE DI CORE RELATIVO ALL'ANNO 2019 | 40 |
| Calcolo del termine Ep | 40 |
| Calcolo Ef e EI | 42 |

| | |
|--|----|
| Calcolo del termine Ew | 45 |
| a. Bilancio di massa lato acqua vapore | 49 |
| b. Bilancio energia lato acqua | 49 |
| c. Bilancio massa lato fumi | 49 |
| d. Bilancio energia lato fumi | 52 |
| e. Calcolo del fattore di correzione climatica CCF..... | 53 |
| Calcolo dell'indice R1 | 54 |
| 4. REVAMPING DELL'IMPIANTO NEL CONTESTO DELLA ECONOMIA CIRCOLARE | 56 |
| Definizione e principi di una economia circolare..... | 56 |
| Il revamping del termovalorizzatore in una Biopiattaforma nel contesto della economia circolare | 58 |
| La nuova Biopiattaforma ed il recupero del fosforo | 60 |
| Panoramica generale sulla situazione del recupero del fosforo in Europa | 60 |
| 5. IL NUOVO TERMOVALORIZZATORE PER L'INCERNIMENTO DEI FANGHI 63 | |
| Dati di dimensionamento..... | 63 |
| Architettura complessiva dei processi di trattamento..... | 63 |
| Descrizione della sezione del nuovo termovalorizzatore interessate al processo | 65 |
| a) Conferimento e stoccaggio di fanghi disidratati ed essiccati | 65 |
| b) Alimentazione dei fanghi disidratati | 65 |
| c) Preessiccamento dei fanghi disidratati | 67 |
| d) Miscelatore fanghi..... | 68 |
| e) Combustione | 68 |
| f) Sistema di trattamento dei fumi di combustione..... | 72 |
| 6. CONCLUSIONI..... | 79 |
| BIBLIOGRAFIA | 81 |
| INDICE DELLE IMMAGINI | 82 |

Introduzione

Lo scopo primario di questa tesi è la valutazione dell'efficienza energetica tramite il calcolo dell'indice R1 discriminante la termovalorizzazione e lo smaltimento. Per il calcolo del R1 sono state seguite le indicazioni europee¹, che si basano sul metodo indiretto per il calcolo del rendimento termico della caldaia.

Inoltre, questa tesi, si pone anche l'obiettivo di introdurre il concetto dell'economia circolare per giustificare uno dei motivi principali per il revamping previsto dell'impianto attuale. A tale scopo, sarà fornita la descrizione preliminare del nuovo impianto dedicato al trattamento dei fanghi, con particolare attenzione all'analisi delle sezioni interessate al processo nonché della metodologia del recupero del fosforo che concludono lo schema previsto per l'applicazione dell'economia circolare.

La Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile della Regione Lombardia ha sviluppato delle linee guida operative per il calcolo dell'**indice di recupero energetico R1** annualmente conseguito dai termovalorizzatori di rifiuti urbani. La formula per il calcolo del R1 è stata **introdotta nel novembre 2008** in nota all'*Allegato II della Direttiva 2008/98/EC* al fine di qualificare le operazioni svolte negli impianti di trattamento termico dei rifiuti urbani in funzione del raggiungimento o meno di alcune soglie per l'efficienza energetica, definita dalla formula stessa, differenziate in base alla data d'entrata in esercizio dell'installazione considerata. La Regione Lombardia (RL) con il ***DGR IX/3019 del 15 febbraio 2012*** ha imposto ai gestori dei termovalorizzatori di rifiuti urbani siti nel territorio regionale di redigere e trasmettere annualmente alla Regione una relazione contenente diversi dati d'esercizio, tra i quali anche l'indice R1 conseguito. Tuttavia, dal momento che il decreto regionale è entrato in vigore, sono state evidenziate forti disuniformità tra le procedure di valutazione adottate dai gestori dei vari impianti Lombardi. Motivo per il quale il **10 Marzo 2015** il Centro Studi MatER del Politecnico di Milano nell'ambito di un accordo di collaborazione con la Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile della Regione Lombardia ha formalizzato una metodologia univoca che riduce al minimo l'arbitrarietà nell'applicazione della formula R1 e in tutte le operazioni necessarie a tale valutazione. Tale metodologia sarà adottata nella presente tesi per il calcolo dell'indice di efficienza

¹ Direttiva 2008/92/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti (allegato II)

R1 per il termovalorizzatore di CORE S.p.A. situato a Sesto San Giovanni. CORE S.p.A. è una società per azioni costituita dai Comuni di Sesto San Giovanni, Cologno Monzese, Pioltello, Segrate e Cormano finalizzata allo smaltimento dei rifiuti solidi urbani delle suddette comunità tramite termovalorizzazione. Il servizio viene garantito mediante un **impianto di termovalorizzazione a ciclo continuo** con produzione finale di energia termica per teleriscaldamento ed energia elettrica che in maggior parte serve per l'autoconsumo e la restante parte viene ceduta alla rete nazionale. L'impianto di termovalorizzazione smaltisce rifiuti solidi urbani e rifiuti assimilabili agli urbani. L'autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), ottenuta con il decreto n°9551 del 30/08/07, ha autorizzato l'impianto ad operare con un carico termico **nominale** di 23 MW corrispondenti a 79.980 t/a di rifiuto con PCI di 2236 kcal/kg oppure 67.500 t/a di rifiuto con un PCI di 3.500 kcal/kg. Per poter comprendere le dimensioni del termovalorizzatore di CORE S.p.A. nel contesto Lombardo, in basso si riporta il grafico che mette in confronto le capacità di smaltimento dei rifiuti RSU degli impianti del territorio e il relativo recupero energetico elettrico e termico. In ordinata si hanno la quantità di rifiuto annualmente elaborata (in blu) [ton/anno], la produzione di energia elettrica (in arancione) [MWh/anno] e la produzione di energia termica (in grigio) [MWh/anno].

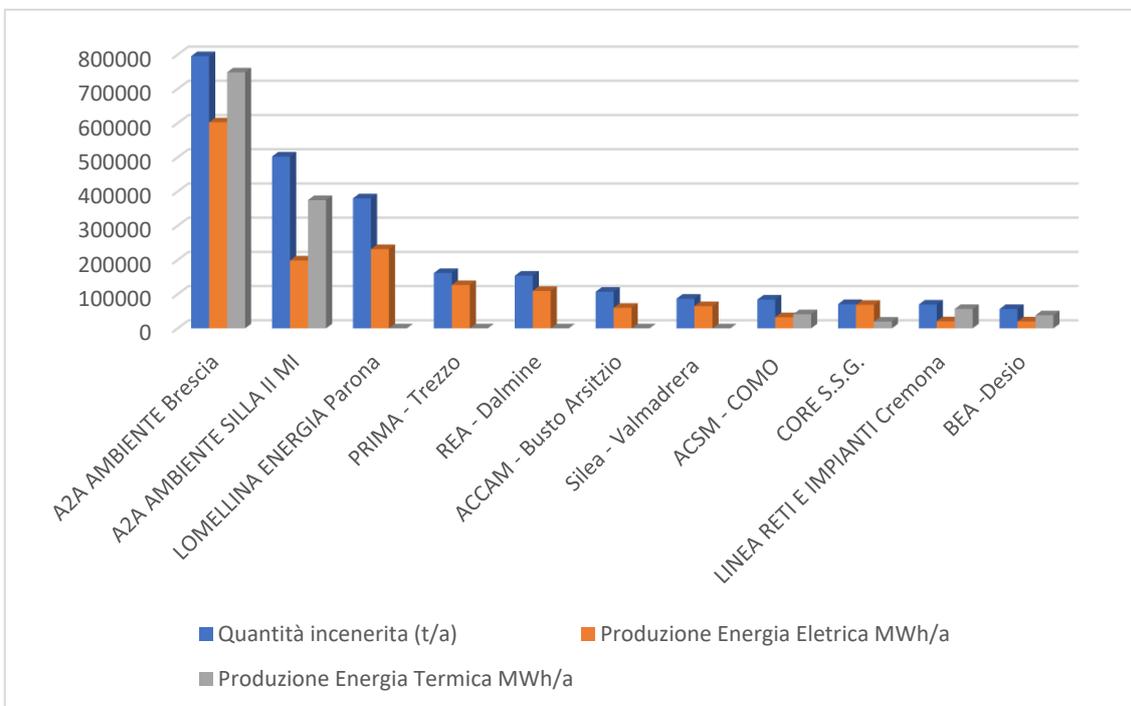


Grafico 1 Confronti tra gli impianti Lombardi in termini di capacità di smaltimento dei rifiuti e di produzione di energia. Le tre colonne fanno riferimento alla unica ordinata, con il variare dell'unità di misura

1. L'IMPIANTO DI TERMOVALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI SOLIDI URBANI (RSU) DI CORE S.P.A.

Descrizione tecnica dell'impianto

Per poter calcolare l'indice R1 bisogna prima analizzare le sezioni dell'impianto interessate al processo di incenerimento dei rifiuti e valutare bene i flussi di massa ed energia in ingresso ed in uscita dalla sezione di combustione, scambio termico e trattamento dei fumi nel termovalorizzatore.

L'impianto di termovalorizzazione è composto da tre linee parallele: di combustione, di trattamento fumi e di scambio termico, nominate come Linea A, B e C. Una parte del vapore prodotto dalle caldaie, procede in turbina per la produzione di al massimo 5 MW di energia elettrica mentre la restante parte di vapore viene valorizzata nella sezione di teleriscaldamento per la produzione di acqua calda distribuita nella rete di teleriscaldamento della città di Sesto San Giovanni. Tale energia termica ceduta al teleriscaldamento varia secondo le stagioni calde e fredde. Ad esempio, nel mese di gennaio del 2019, il TLR lavorava con un carico termico pari 12,7 MW. Invece, nel mese di agosto il TLR lavorava con un carico pari a circa 5 MW. Inoltre, nell'anno 2019 sono stati inceneriti 69044 [t] di rifiuti. La produzione media di vapore per ogni linea pari a circa 8 ton/h di vapore.

Le **sezioni** presenti all'interno dell'impianto interessate al processo sono:

- Sezione pesatura rifiuti;
- Sezione ricevimento, stoccaggio e movimentazione rifiuti;
- Sezione combustione e ciclo termico;
- Sezione teleriscaldamento;
- Sezione depurazione fumi di combustione;
- Impianto trattamento acque reflue;
- Sezione impianto elettrico e strumentale;
- Sezione sistema di supervisione impianto;
- Sezione impianti ausiliari;
- Sezione monitoraggio emissioni.

Sezione pesatura rifiuti

La sezione pesatura consiste in un edificio a sé stante, ubicato all'ingresso dell'area d'impianto e destinato al controllo ed alla pesata dei mezzi che conferiscono il rifiuto solido urbano (RSU). La sezione di pesatura, oltre all'edificio sopra menzionato, è costituita da una pesa a ponte adibita all'ingresso e all'uscita del mezzo conferenti. A monte della pesa adibita all'ingresso dei mezzi conferitori è installato un portale per il monitoraggio di rifiuti "radioattivi", che ha il compito di individuare eventuali conferimenti contenenti sostanze radioattive che non possono essere accettate in impianto e devono essere intercettate e separate secondo un'apposita procedura stabilita con gli Enti di Vigilanza.

Sezione ricevimento, stoccaggio e movimentazione rifiuti

La sezione di ricevimento rifiuti consiste in due fosse distinte collegate a tre tramogge di carico dei forni di incenerimento. Le fosse sono mantenute in leggera depressione per impedire la fuoriuscita di odori verso l'ambiente esterno; l'aria aspirata viene inviata dai ventilatori principali alle linee di incenerimento come aria primaria di combustione. Per la movimentazione dei rifiuti sono utilizzati due carroponti, uno di riserva all'altro, dotati di benne a polipo in grado di assicurare le operazioni di miscelazione e caricamento del RSU conferito.

L'operatore, alloggiato all'interno della sala di controllo dell'impianto e posizionato virtualmente, a mezzo di monitor, di fronte alle tramogge di carico rifiuti delle linee di incenerimento ha il compito di gestire e di omogeneizzare il flusso dei rifiuti in ingresso, di alimentare le tre linee e di rimuovere eventuali materiali particolarmente ingombranti e non combustibile in zona di tramogge.

Sezione combustione

La sezione comprende per ogni linea di combustione un forno a griglia mobile, una camera di post-combustione ed un generatore di vapore surriscaldato (caldaia). Il forno è del tipo a griglia mobile, idoneo per la combustione di RSU; la griglia, azionata da una centralina oleodinamica comune ai 3 forni, è costituita da barrotti fissi alternati a barrotti mobili e, tramite il movimento relativo degli stessi, consente l'avanzamento ed il rotolamento dei rifiuti in combustione.

In più, il forno è corredato da una tramoggia, alimentata dal carroponte, che tramite un condotto raffreddato esternamente ad acqua e mantenuto costantemente pieno di rifiuti

alimenta la camera di combustione assicurando nel frattempo la tenuta per evitare ingresso d'aria esterna. Il rifiuto è spinto in camera di combustione da un alimentatore a pistone, azionato oleodinamicamente, la cui frequenza di movimento è variabile e controllata dal PLC in funzione delle caratteristiche del rifiuto in modo da ottenere un carico regolare e una distribuzione uniforme dello stesso sulla griglia. Mediante il movimento dei barrotti mobili, il rifiuto percorre tutta la griglia inclinata, bruciando durante l'avanzamento fino alla completa combustione. La frequenza del movimento dei barrotti mobili può essere variata e graduata a seconda delle caratteristiche energetiche del rifiuto, ottenendo così una combustione ottimale. L'aria primaria di combustione viene aspirata dalla fossa ed inviato ai condotti di distribuzione sotto le griglie dei forni mentre l'aria secondaria viene immessa all'ingresso della camera di post-combustione per aumentare la turbolenza e controllare il livello termico.

Il materiale residuo del processo di combustione, costituito dalle cosiddette scorie e ceneri pesanti, viene convogliato attraverso le griglie in una sezione sottostante riempito d'acqua che garantisce anche la tenuta idraulica del forno. Le scorie sono poi scaricate su di un nastro a piastre comune alle 3 linee e, dopo la deferrizzazione ottenuta con un tamburo rotante magnetico, vengono trasferite in cassoni scaricabili. La camera di post-combustione segue la zona di combustione e ha lo scopo di completare, se necessario, la reazione nonché la distruzione dei microinquinanti organici: essa è attrezzata da un bruciatore a metano che viene utilizzato nelle fasi di avviamento e arresto della linea e eccezionalmente, nei casi di abbassamento della temperatura della camera di post-combustione. Anche la camera di combustione è dotata di un bruciatore a metano, che viene utilizzato nella fase di avviamento e arresto della linea. La camera di post-combustione è inoltre predisposta per l'immissione controllata di "urea", reagente per l'abbattimento delle concentrazioni di NO_x . (ossidi di azoto) nei fumi. All'uscita della camera di post-combustione i fumi passano nella **caldaia**. Questa, del tipo **a tubi d'acqua a circolazione naturale**, è costituita da tre canali verticali: in particolare nel secondo canale sono alloggiati gli evaporatori (**VAP**) ed i surriscaldatori (**SH**), mentre nel terzo sono installati gli economizzatori per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione caldaie (**ECO**) come riportato nella figura seguente.

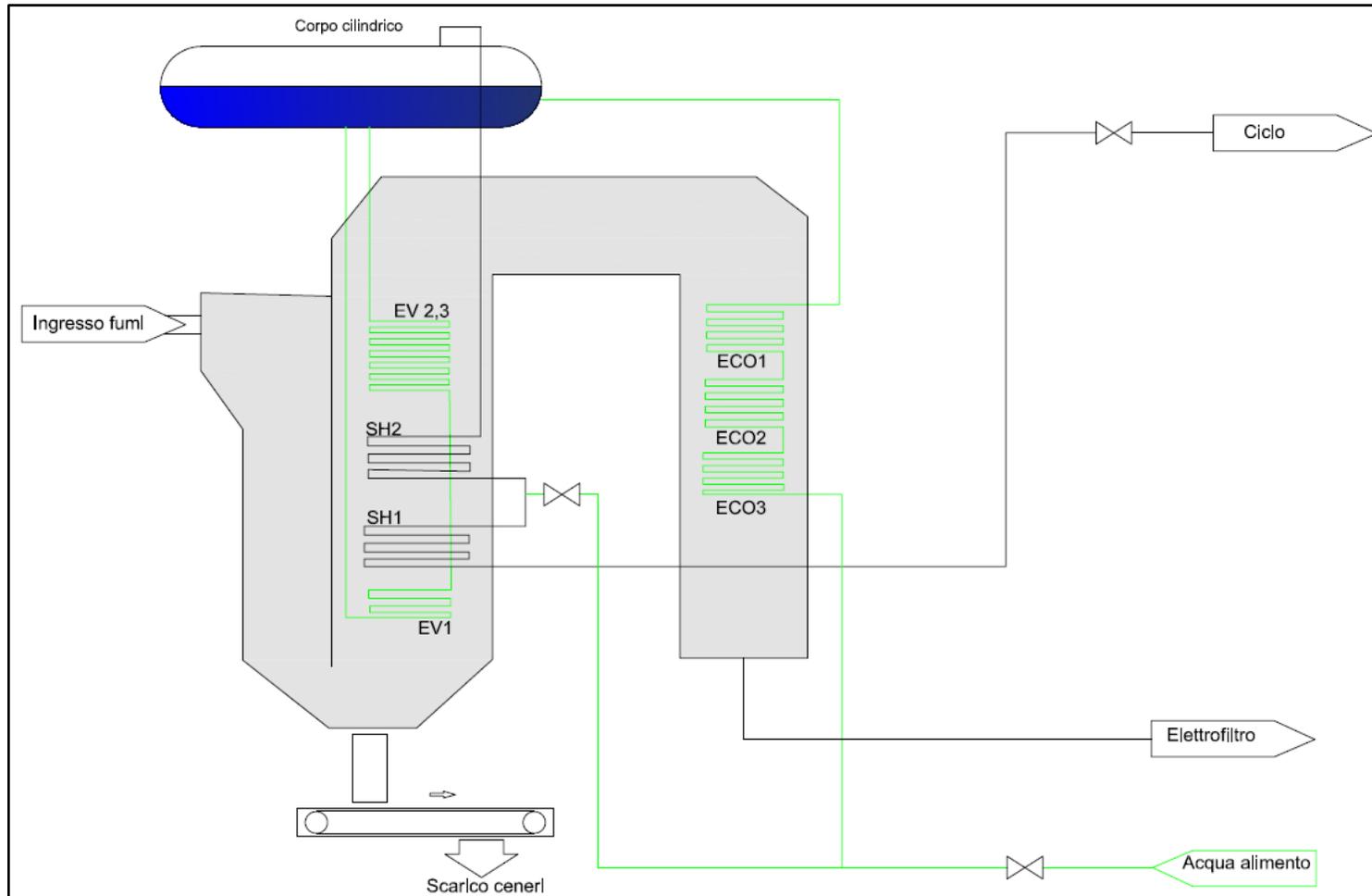


Figura- 1 schema della caldaia presente nel termovalorizzatore di CORE

Ciclo termico

Per ciclo termico dell'impianto si intende il complesso delle apparecchiature e degli impianti che consentono la produzione di energia elettrica e termica utilizzando vapore surriscaldato prodotto dalle caldaie durante la fase di combustione dei rifiuti.

Il ciclo termico è comune a servizio delle 3 linee di incenerimento, ed è costituito da:

- **turbina** a vapore multistadio a **condensazione**, con spillamento;
- **alternatore sincrono trifase** raffreddato ad aria in ciclo chiuso per mezzo di una batteria di scambiatori ad acqua;
- **condensatore ad aria**, raffreddato a ventilazione forzata, dimensionato per la condensazione totale del vapore in caso di by-pass della turbina,
- sistema di raccolta delle condense;
- **degasatore** per il riscaldamento dell'acqua di alimentazione caldaie e per la riduzione del contenuto d'ossigeno e anidride carbonica;
- **elettropompe** di alimentazione caldaie;
- **gruppi di dosaggio** dei prodotti chimici per condizionamento acque di caldaie;
- **impianto DEMI** a osmosi inversa per la produzione d'acqua demineralizzata per il reintegro delle caldaie;
- Sezione di **teleriscaldamento** "TLR".

In questa sezione bisogna sottolineare la presenza di uno spillamento, che serve alla rigenerazione termodinamica, lo scopo dello spillamento presente è aumentare il rendimento termodinamico del ciclo, si può anche dimostrare, che in un impianto con n spillamenti più alto è il numero n, più alto sarebbe il rendimento del ciclo stesso.

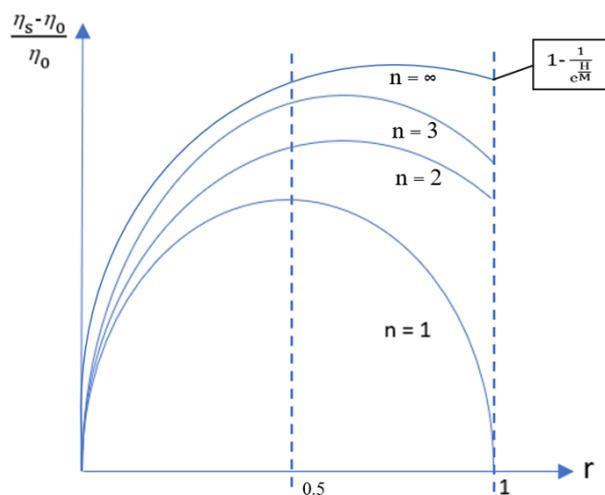


Figura- 2 andamento del rendimento del ciclo termodinamico Rankine in funzione del numero degli spillamenti

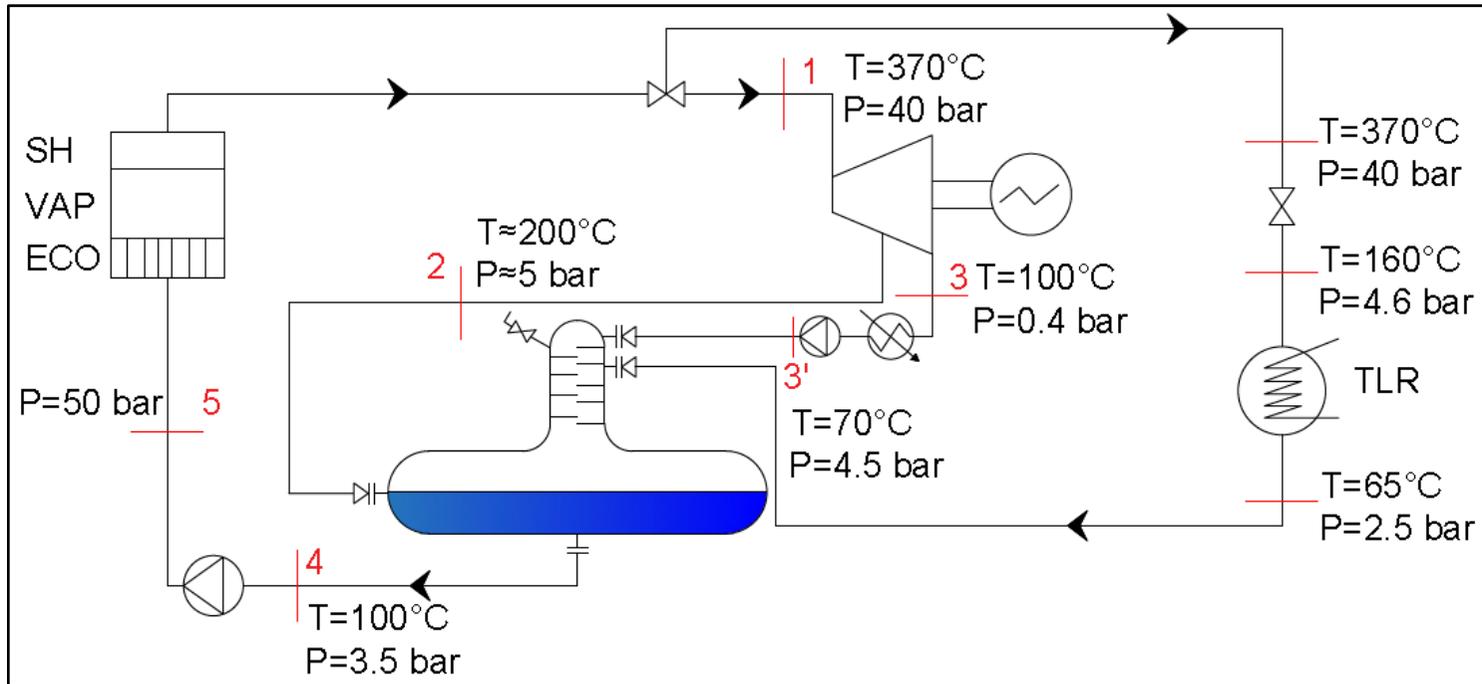


Figura- 3 PFD di principio del termovalorizzatore di Sesto San Giovanni

Il punto (1) indica: ingresso vapore surriscaldato in turbina

Il punto (2) indica: uscita spillamento di vapore per scaldare l'acqua nel degasatore.

Il punto (3) indica: scarico turbina

Il punto (3') indica: uscita condensatore ad aria

Il punto (4) indica: uscita acqua dal degasatore

Il punto (5) indica: uscita pompa a circa 40 bar ed ingresso caldaia (la pompa deve portare l'acqua ad una pressione poco più alta rispetto a quella della caldaia per fare sì che l'acqua entri dentro la caldaia).

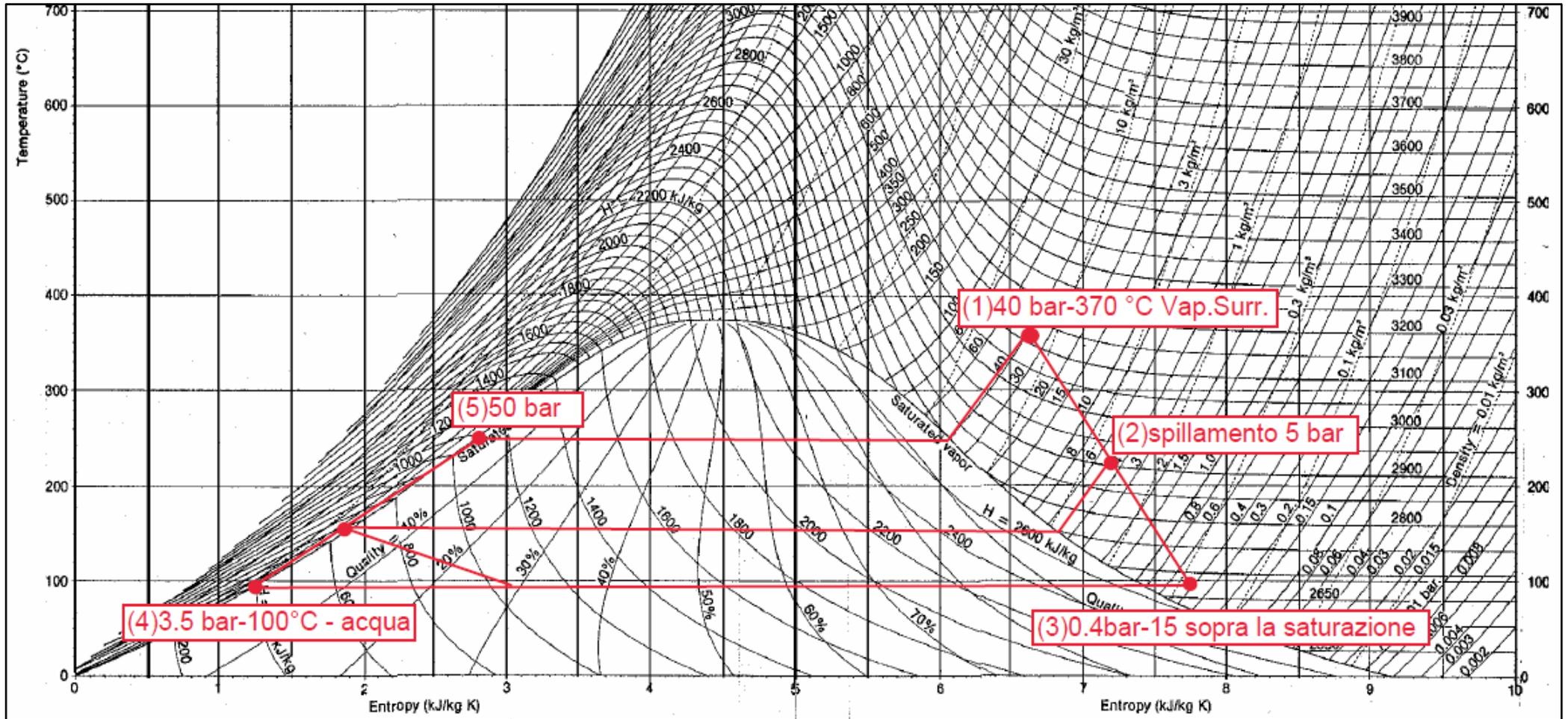


Figura- 4 Ciclo Rankine relativo al termovalorizzatore CORE di Sesto San Giovanni

Sezione teleriscaldamento

Nel mese di aprile 2011 è stato messo in servizio l'impianto di teleriscaldamento che provvede a cedere calore alla rete della città di Sesto San Giovanni. La cessione del calore avviene in uno scambiatore installato all'interno dell'impianto del termovalorizzazione, dove la maggior parte del vapore prodotto dalle tre caldaie alimenta uno scambiatore acqua/vapore.

Il vapore necessario all'impianto di teleriscaldamento è prelevato direttamente dalla linea ad alta pressione 40 [bar] che alimenta la turbina e **processato tramite una valvola di laminazione**, le condense sono inviate al degasatore. All'interno dell'impianto sono inoltre installate le pompe di ricircolo della sezione di rete dell'impianto di teleriscaldamento che provvedono ad inviare l'acqua calda alle utenze cittadine.

Sezione depurazione fumi

La depurazione dei fumi prodotti dall'incenerimento degli RSU nell'impianto di termovalorizzazione gestito da CORE S.p.A. avviene in **tre linee di trattamento** indipendenti (una per ogni linea di incenerimento) attraverso un processo che comprende le seguenti **sezioni**:

- Riduzione degli NOx mediante dosaggio di urea (**SCR**) e un letto catalitico;
- Depolverazione primaria mediante un **elettrofiltro**;
- Lavaggio a umido dei fumi con due **scrubber**, uno ad acqua e l'altro ad acqua e soda caustica;
- Depurazione finale a secco mediante un **filtro a maniche**.

Considerando la figura seguente si descrive di seguito il percorso dei fumi lungo una qualunque delle tre linee di trattamento a valle della combustione dei Rifiuti Solidi Urbani. I fumi generati dalla combustione dei rifiuti vengono additivati con urea mediante un sistema di lance speciali posizionate nella camera di postcombustione. L'urea ha, infatti, il compito di ridurre la concentrazione degli ossidi di azoto presente in virtù di una serie di reazioni che permettono di liberare l'azoto molecolare per riduzione. Dopodiché i fumi prodotti dalla combustione escono dalla caldaia ad una temperatura di circa 250 °C procedendo nel precipitatore elettrostatico "elettrofiltro". L'elettrofiltro è composto da due campi elettrici distinti, nel momento in cui viene inserito il campo elettrico, le polveri da captare contenute nei gas vengono caricate elettricamente e dirette alle piastre di captazione.

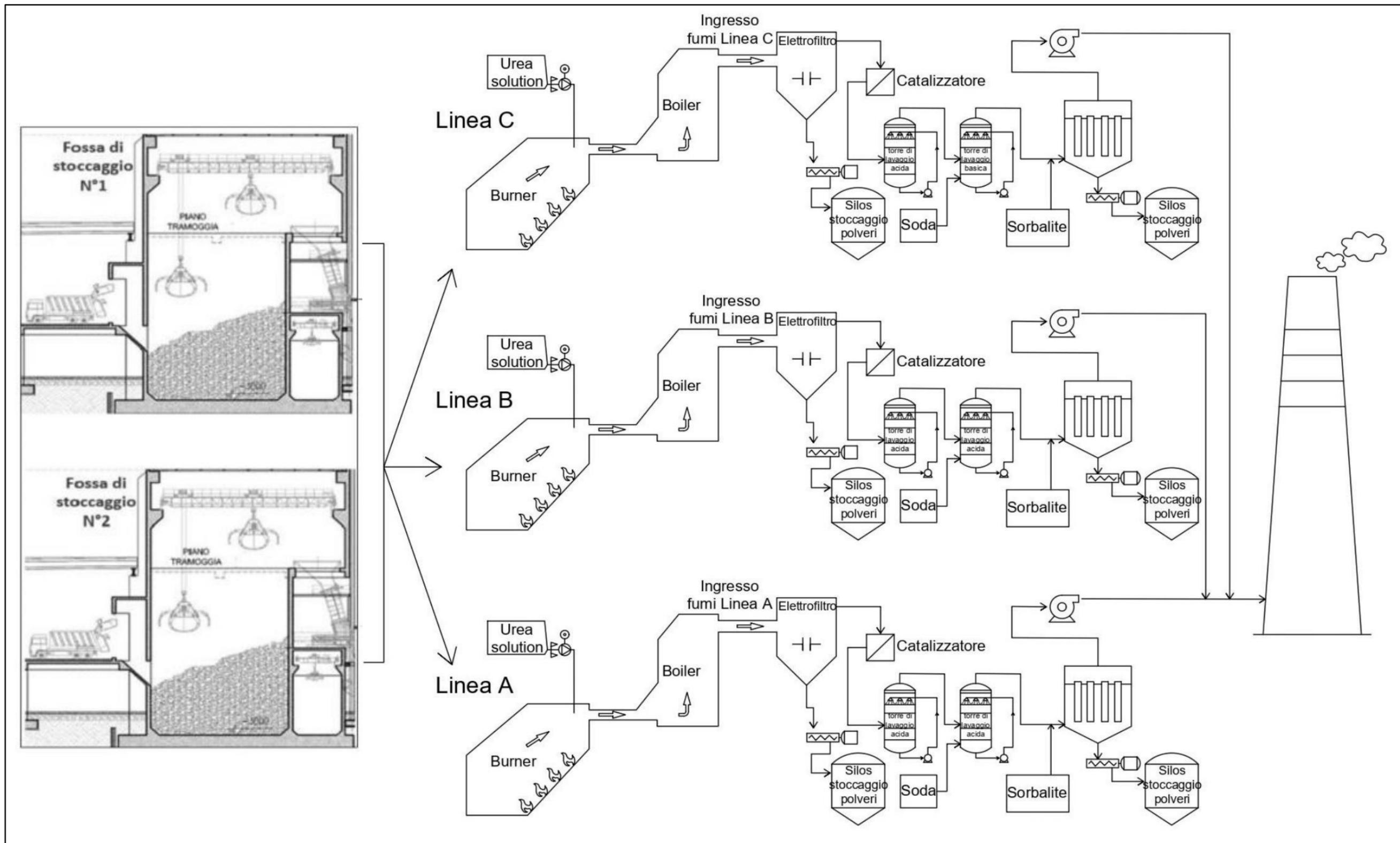


Figura- 5 P&I delle tre linee di trattamento fumi

I fumi di combustione in uscita dall'elettrofiltro ad una temperatura di 230 °C passano sul letto catalitico per completare il processo denominato DeNO_x (dove il termine DeNO_x sta per indicare il processo che comprende la sezione di iniezione dell'urea insieme la sezione del letto catalitico) offrendo in tal modo un aumento della resa di abbattimento degli NO_x. Il catalizzatore è composto principalmente da ossidi di titanio ≥ 75%, ossidi di tungsteno ≤ 7%, fibre di vetro ≈ 9%, bentonite ≈ 6% e ossidi di vanadio ≤ 2.2%.

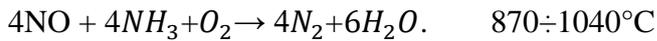
In uscita dal letto catalitico i fumi vengono raffreddati in uno **scambiatore fumi – fumi**. Lo scambiatore ha la funzione di abbassare la temperatura dei fumi in ingresso al gruppo lavatore ed innalzare contemporaneamente la temperatura di essi in uscita, dopo essere stati trattati (i fumi da trattare entrano nello scambiatore ad una temperatura di 270°C ed escono a 158°C, invece, i fumi già trattati in uscita dal lavatore entrano nello scambiatore a 60°C ed escono a 170°C). In modo tale da abbassare il ΔT tra fumi e acqua all'interno della torre di lavaggio. In uscita, invece, serve innalzare la temperatura perché i fumi una volta arrivati al camino non devono essere inferiore ad una certa temperatura per evitare condensazione acide. Il gruppo di lavaggio a umido è costituito da due distinti scrubber. Il primo scrubber – “sezione acida” (viene definito in tal modo, perché utilizza acqua per il lavaggio che, assorbendo gli acidi, presenti nei fumi abbassa il suo pH fino a 0÷1). Il primo scrubber è inserito per abbassare la concentrazione di acidi presenti nei fumi come l'acido cloridrico, solforico e fluoridrico. Inoltre, l'acqua acida presente nel primo scrubber assorbe l'ammoniaca residua presente nei fumi. Il secondo scrubber utilizza per il lavaggio acqua e soda per assorbire una parte dei restanti acidi poco solubili presenti nei fumi.

La deacidificazione finale dei fumi è completata nell'ultima sezione mediante il dosaggio di sorbalite e successiva filtrazione su filtro a maniche.

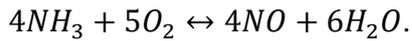
a. Sezione di riduzione degli ossidi di azoto “NO_x”

L'abbattimento degli **NO_x** presenti nei fumi inviati al camino si ottiene mediante l'iniezione di urea in cima alla camera di postcombustione, laddove si realizzano le condizioni termodinamiche (T=950÷1000°C) che favoriscono la trasformazione dell'urea in ammoniaca che riduce gli ossidi d'azoto. In aggiunta a questo, è presente anche il processo dominato SCR (Selective Catalytic Reduction), perché a valle dell'elettrofiltro si trova il catalizzatore di tipo a nido d'ape, dove i fumi arrivano con una temperatura di circa 215÷220°C. Quest'ultimo è in grado di aumentare la resa del processo, offrendo in

tal modo un'ulteriore riduzione degli ossidi d'azoto contenuti nei fumi che non hanno reagito nella sezione precedente. Le reazioni che avvengono sono le seguenti:



Inoltre, bisogna prestare molta attenzione a non iniettare il reagente per temperature sopra i 1040°C , altrimenti si avrà soltanto un eccessivo consumo del reagente, in quanto la reazione dominante diventa la seguente;



La reazione di riduzione avviene tramite una serie di reazioni intermedie di decomposizione dell'urea in ammoniaca.

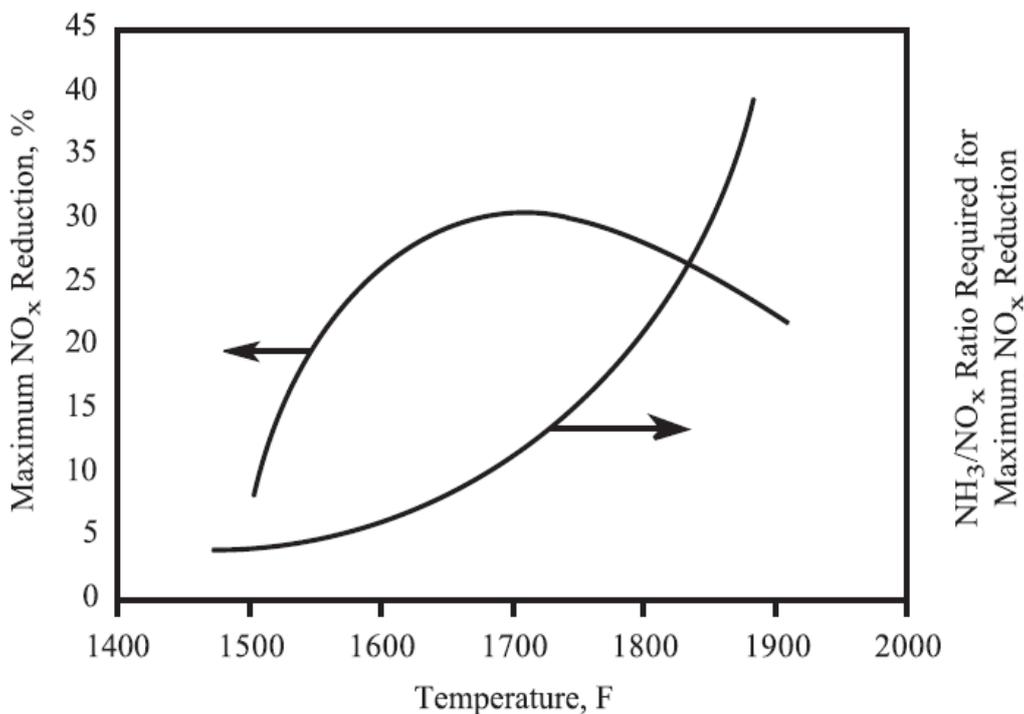
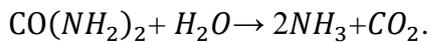


Figura- 6 Andamento della resa di abbattimento degli NO_x in funzione della temperatura (SNCR temperature window)

(Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.258)

b. Sezione elettrofiltro

Il principio di funzionamento dell'elettrofiltro è basato sul meccanismo ESP, "electrostatic precipitator", che può essere a secco o a umido. L'elettrofiltro è costituito solitamente da un cavo che funge da elettrodo e da pareti caricate elettricamente con una carica opposta a quella del filo consentendo la deposizione delle polveri presenti nei fumi. Le pareti possono essere circolari o piane. Nell'impianto di termovalorizzazione di Core sono della tipologia piana.

Il principio di funzionamento del meccanismo ESP è il seguente:

- (1) Caricamento delle particelle;
- (2) Applicazione di un campo elettrico opposto alla carica applicata alle particelle per rimuoverle dalla corrente gassosa;
- (3) Rimozione delle le polveri depositate sulle pareti.

Le particelle sono caricate tramite gli ioni formati dalla corona di plasma generata dall'elettrodo, gli ioni si attaccano alle particelle attribuendo ad essi la propria carica. Gli elettrodi possono essere caricati positivamente, tuttavia a volte si preferisce caricarli con una carica negativa che è più stabile. Quando le particelle viaggiano lungo l'elettrodo la carica viene trasmessa a loro tramite due meccanismi:

- (1) Bombardamento;
- (2) Diffusione.

Entrambi avvengono contemporaneamente, ma il caricamento per bombardamento è più importante per le particelle più grandi, ovvero, sopra 1 micron, e la diffusione è più importante per le particelle – sotto 1 micron. Normalmente è più facile captare le particelle più grandi, dato che la loro carica è più alta, quindi la loro cinetica risulta essere maggiore rispetto alle particelle più piccole. Perciò, vengono attratti facilmente dalla carica opposta delle pareti, mentre le particelle più piccole possono sfuggire.

L'elettrofiltro dell'impianto CORE possiede **due campi in serie** che hanno la stessa funzione, offrendo così una maggiore efficienza. I gas in uscita dalla caldaia a circa 250°C entrano nell'elettrofiltro a due campo elettrici in serie aventi una tensione di circa 50 [kV]. I campi elettrici fanno sì che le polveri contenute nei gas vengono caricate elettricamente e dirette verso le piastre di captazione.

Ciascuno dei due campi dispone di sistemi di percussione a martelli degli elettrodi emissivi e degli elettrodi di captazione, che consentono al film di polveri depositato di staccarsi e cadere all'interno della tramoggia di raccolta per poi essere trasportati tramite

un sistema di trasporto costituito da coclea e nastro trasportatore verso i silos di stoccaggio delle polveri.

L'ampia sezione di passaggio consente un elevato tempo di permanenza (ossia, di attraversamento) dei gas all'interno dell'elettrofiltro ($t > 16s$).

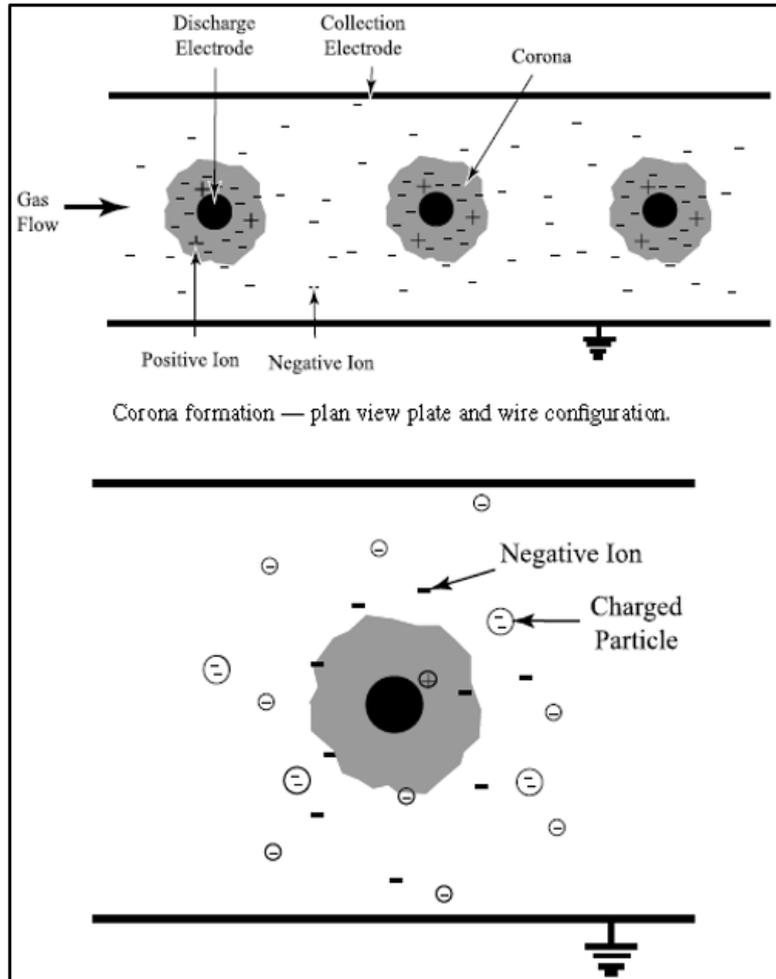


Figura- 7 Meccanismo di abbattimento delle ceneri leggere tramite l'elettrofiltro

Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.258)

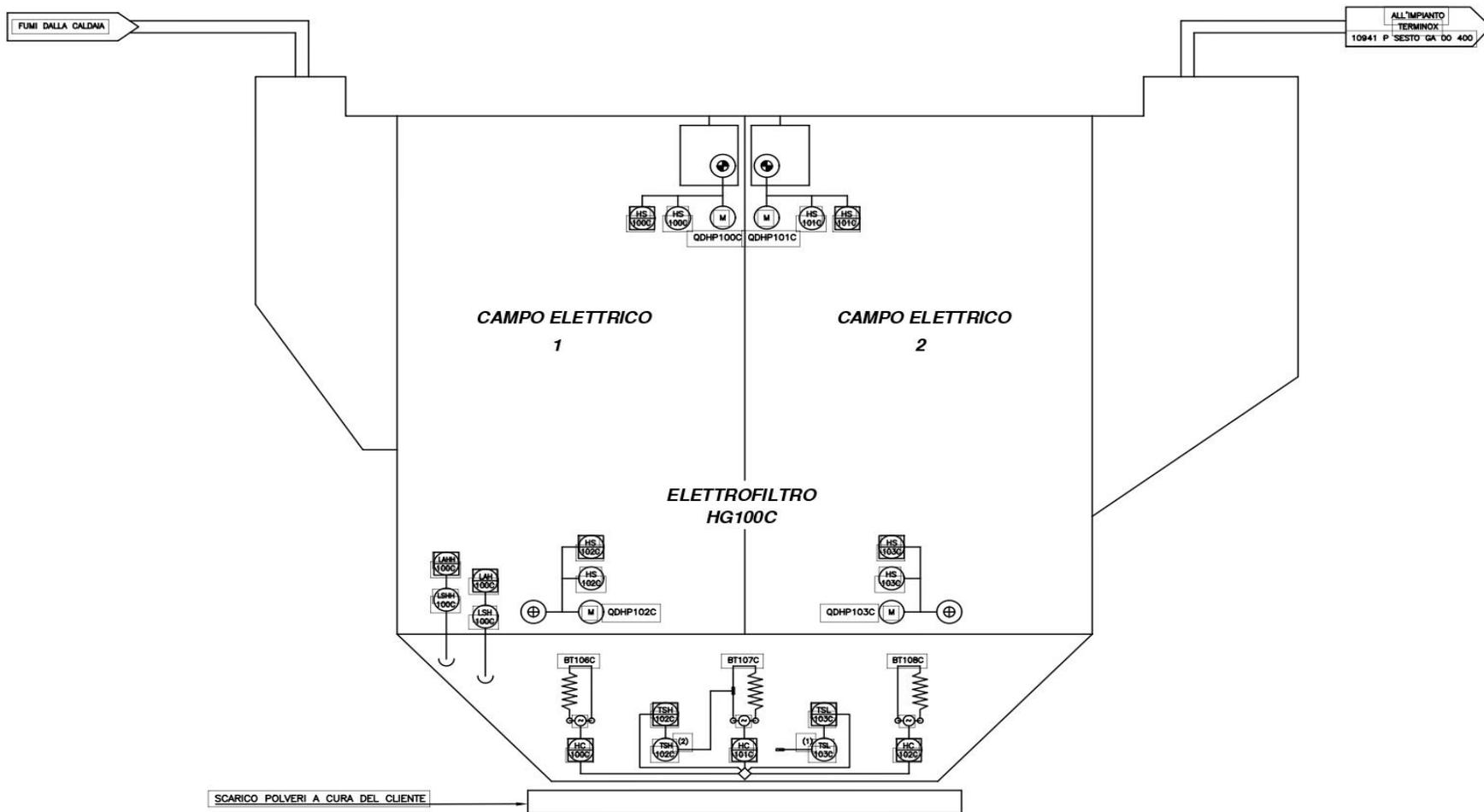


Figura- 8 P&I dell'elettrofiltro a due campi

c. Sezione torri di lavaggio e scambiatori di calore Fumi – Fumi

L'assorbimento è una tecnica usata per assorbire i microinquinanti e gli acidi presenti nella corrente gassosa. Nella prima torre di lavaggio viene usata l'acqua che è in grado di assorbire bene acidi come HCl, HF e SO_x. Invece, nella seconda torre viene usata una miscela d'acqua e soda caustica (sostanza fortemente basica) per assorbire gli acidi restanti nei fumi sopra tutto il SO₂. È questa la ragione per cui esistono due torri di lavaggio. Quindi la sezione torri di lavaggio è composta da due distinte torri in serie, ciascuna delle quali assolve a un diverso compito: la prima torre, "il prelavatore", utilizza l'acqua industriale per lavare i fumi assorbendo le sostanze acide arrivando ad un pH pari a zero. Il lavaggio nella seconda torre, "il lavatore", avviene tramite acqua e soda regolata in funzione della misura del pH a monte della distribuzione della sezione sopra il letto di riempimento realizzando un lavaggio di tipo basico.

Come mostrato nelle figure seguenti (Fig.7,8), nel prelavatore i fumi seguono un percorso discendente e vengono investiti dalla soluzione acquosa ricircolata tramite le pompe che alimentano gli ugelli posti su anelli di distribuzione a livelli diversi. La soluzione risultante viene in parte spurgata ed inviata alla vasca di raccolta che alimenta l'impianto di trattamento delle acque.

L'acqua evaporata e quella sottratta con lo spurgo vengono compensate in parte con lo spurgo del lavatore e principalmente con acqua industriale prelevata dal pozzo interno all'impianto.

Nel lavatore, invece, i fumi seguono un percorso ascendente e attraversano un letto di riempimento ad anelli che consente il mescolamento accurato tra la soluzione ricircolata e i fumi. Prima dell'uscita dei fumi dalla torre è presente il "demister" che consente la separazione delle gocce d'acqua e soda eventualmente trascinate dai fumi. In questo secondo stadio avviene la rimozione soprattutto dell'SO₂ e dei restanti acidi. L'anidride solforosa è un gas incolore molto solubile in acqua ed è una sostanza fortemente irritante e nociva per gli occhi e il tratto respiratorio, inoltre, reagisce fortemente con l'ammoniaca. L'anidride solforosa SO₂ e SO₃ indicate con il termine generale SO_x sono i principali inquinanti atmosferici a base di zolfo. Quando raggiungono la stratosfera si trasformano in particelle di acido solforico che riflettono i raggi solari, in parte riducendo le radiazioni che raggiungono il suolo terrestre.

Solitamente la **concentrazione di soda caustica è tra il 5 ÷ 10%** in volume. L'utilizzo della calce idrata è più conveniente economicamente rispetto alla soda caustica, però se

venisse utilizzata la calce idrata nel processo di assorbimento potrebbe creare dei problemi nelle torri di lavaggio dato che i propri sali che si formano per le reazioni delle sostanze acide con quelle basiche sono poco solubili, con conseguente danneggiamento delle pompe che fanno circolare l'acqua all'interno della torre.

Nello scambiatore di calore fumi - fumi a valle delle torri di lavaggio avviene lo scambio termico a favore dei fumi uscenti dalla sezione di lavaggio prima del passaggio al filtro a maniche: i fumi da trattare entrano nello scambiatore ad una temperatura di circa 270°C ed escono a 158°C, invece, i fumi già trattati in uscita dal lavatore entrano nello scambiatore a 60°C ed escono a 170°C. Lo scambiatore è del tipo a tubi verticali lato fumi caldo e a due passaggi trasversali lato fumi freddi. L'aggressività chimica dei fluidi a contatto con i tubi impone la scelta di materiali **teflonati**. La superficie di scambio è di 448m².

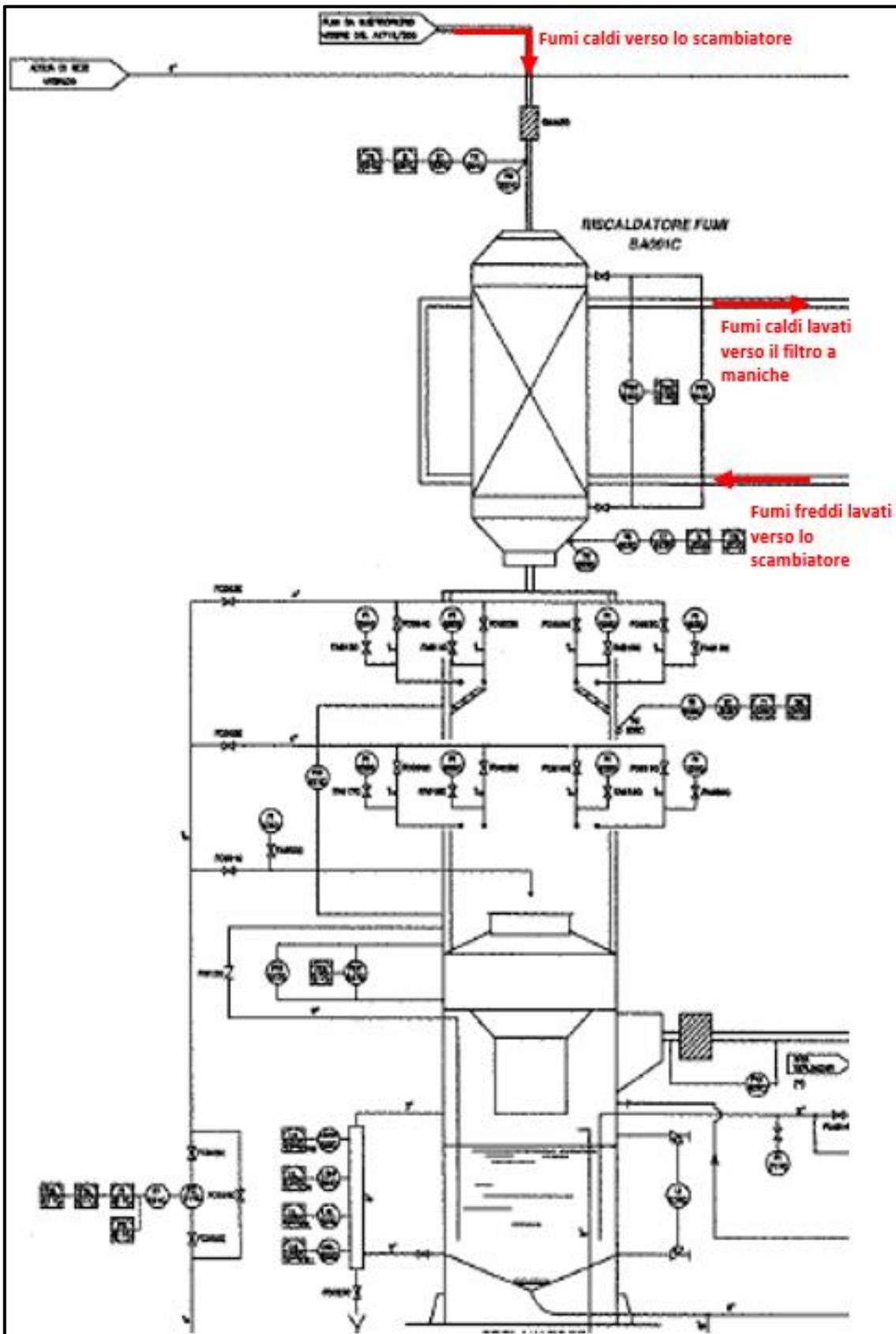


Figura- 10 P&I dello scambiatore fumi-fumi

d. Sezione filtro a maniche

Dopo la sezione gruppi torri di lavaggio segue la sezione filtro a maniche. Il filtro a maniche presente nell'impianto di CORE è costituito da tre celle in serie, ciascuna contenente **90 maniche messe in 10 file parallele**. Nel caso di malfunzionamento di una delle celle, c'è la possibilità di escluderla tramite un circuito di bypass. Inoltre, esiste un vincolo imposto sul sistema, che consiste nel fare funzionare contemporaneamente almeno due celle su tre. Quindi, con due celle guaste si ferma la combustione.

Dunque, il filtro a maniche è utilizzato come ultimo stadio nella linea di trattamento fumi per abbattere soprattutto gli acidi, diossine e metalli pesanti presenti ancora nei fumi. Il meccanismo di abbattimento delle sostanze inquinanti è l'**adsorbimento** che funziona utilizzando un reagente noto commercialmente come "**Sorbalite**", una miscela di idrossido di calcio Ca(OH)_2 e carbone attivo (materiale con una superficie altamente porosa con una capacità adsorbente elevata).

La **calce idrata** essendo **una sostanza basica** ha la funzione di ridurre gli acidi. Invece, il carbone attivo ha la funzione di trattenere i metalli pesanti trappolandoli all'interno della sua superficie porosa. I fumi in ingresso al filtro a maniche vengono mescolati all'interno di un reattore con la sorbalite (vedere P&ID, figura 12). Una volta entrati, i fumi all'interno del filtro sono costretti per via della differenza di pressione di circa 0.01 bar ad attraversare le maniche. In questa fase di passaggio le particelle di sorbatile, che hanno reagito con gli acidi e i metalli pesanti, vengono trattenuti dalle maniche avendo un volume maggiore rispetto ai passaggi presente tra il tessuto delle maniche.

Quindi questa fase di processo fa sì che, gli acidi, i metalli pesanti e le diossine presenti nei fumi in uscita dal lavatore sono trattenuti all'interno delle maniche.

La sorbalite depositata tra il tessuto delle maniche aumenta il potere di filtrazione delle maniche stesse, però, di contro chiude il passaggio dei fumi aumentando le perdite di carico e dunque la potenza spesa per muovere i fumi. Si rende, quindi, necessario un sistema per pulire le maniche periodicamente nel momento in cui le perdite di carico superano un valore soglia. Il meccanismo presente sull'impianto CORE per pulire le maniche del tipo **PULSE JET (High Pressure)** utilizza un polmone d'aria che si svuota quando il ΔP fra monte e valle del filtro supera un certo valore prefissato. Il ΔP è sempre in aumento poi quando raggiunge un certo valore, viene scaricato il polmone d'aria per pulire le maniche e la polvere in caduta per gravità viene raccolta dalla tramoggia in basso. Questa, poi viene trasportata tramite un sistema di coclee e nastro trasportatore

fino ai silos di stoccaggio per le polveri. Un altro aspetto molto importante è il materiale di cui sono fatte le maniche. Le maniche sono fatte da **POLIFENILSOLFURO** noto come “**PPS**”. È un **tecnopolimero termoplastico** noto per le alte prestazioni con notevoli proprietà di resistenza agli agenti chimici.

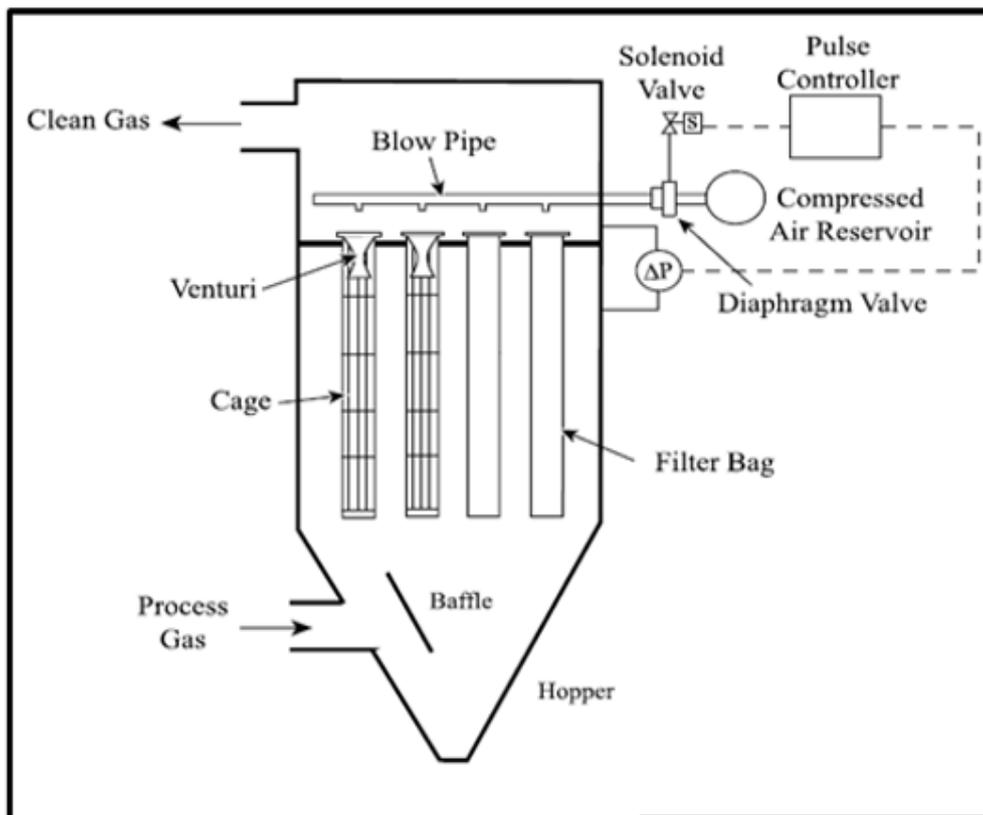


Figura- 11 P&I del filtro a maniche

(Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.356)

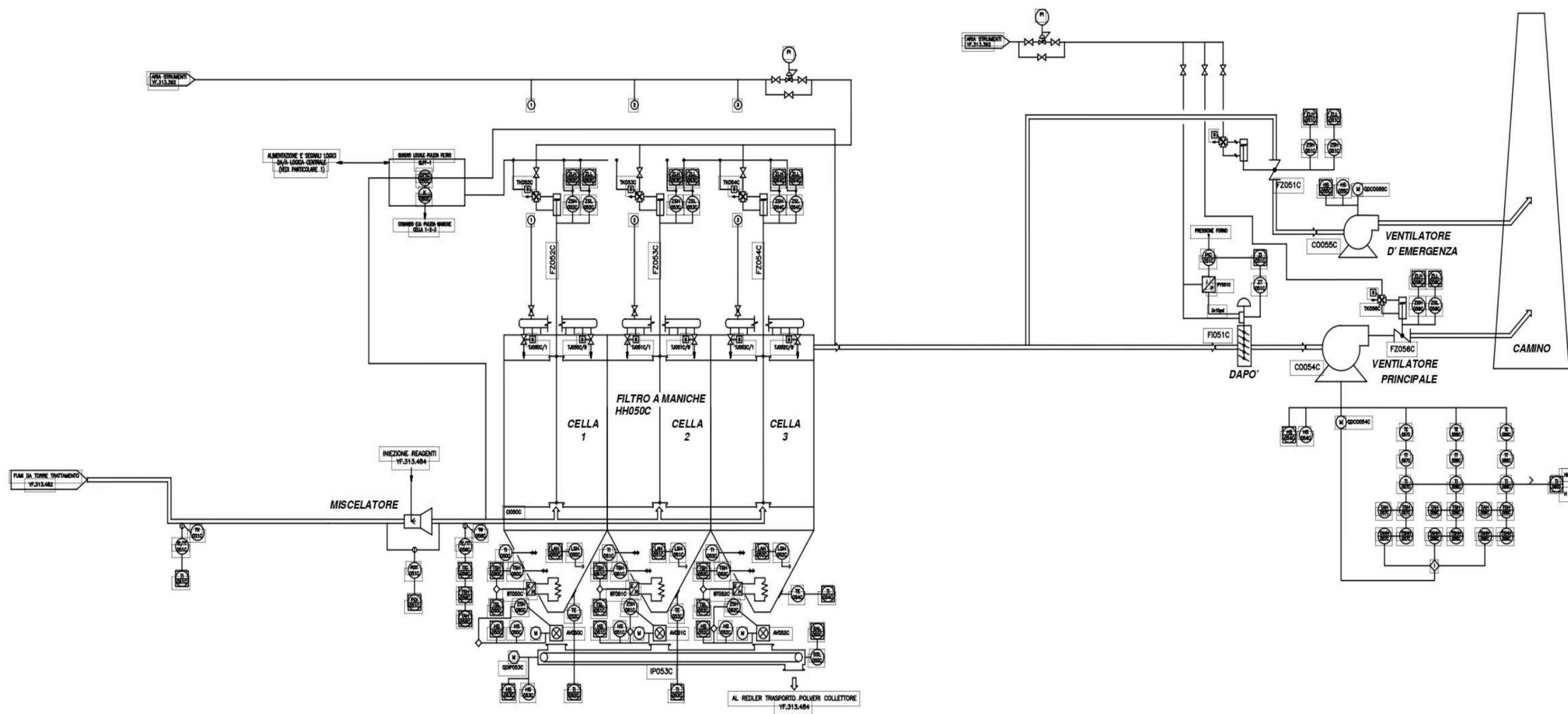


Figura- 12 P&I della sezione filtro a maniche - camino

e. Sezione monitoraggio emissioni

La normativa comunitaria e nazionale condiziona i gestori degli impianti di incenerimento alla misurazione in continuo per alcuni parametri ed inquinanti presenti nei fumi di combustione e la registrazione delle emissioni stesse. In particolare, il 5 febbraio 2015 è stata pubblicata la **UNI EN 14181:2015** dal titolo "*Emissioni da sorgente fissa - Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici*" che recepisce la **EN 14181:2014** in sostituzione della UNI EN 14181:2005: questa diviene il nuovo standard per la definizione dei livelli di garanzia della qualità (QAL) “livello di assicurazione della qualità” per i sistemi di misurazione automatici (AMS) installati presso impianti industriali.

La Regione Lombardia ha disciplinato, a far data dal 1995, i sistemi di monitoraggio in continuo (SME) (Sistema Monitoraggio Emissioni) da installare per alcune tipologie di impianti, tra cui gli impianti di incenerimento dei rifiuti, dettandone i criteri e le procedure di gestione.

I sistemi di monitoraggio (SME) sono generalmente caratterizzati da:

- Un **gruppo di campionamento** dell’effluente gassoso a camino (sonda, linea di trasferimento riscaldata, eventuale sistema di condizionamento e analizzatori);
- Un insieme di ulteriori **sensori remoti** (segnali di impianto e parametri caratteristici dei fumi);
- Un **sistema** dedicato all’**acquisizione e salvataggio** su file dei segnali di tali dispositivi e da un **software** di trattamento dei dati (validazione, elaborazione successive, archiviazione ed eventuale trasmissione degli stessi).

I termovalorizzatori lombardi sono tutti dotati di sistema di monitoraggio delle emissioni e collegati alla rete SME ai sensi della D.g.r 10 febbraio 2010 n 8/11352. La “Rete SME” ha come obiettivo la raccolta e il trattamento centralizzato dei dati secondo criteri definiti in maniera univoca, attraverso la costituzione di una rete dei Sistemi di monitoraggio in continuo, propri di ARPA, installati presso le sorgenti emissive in atmosfera più significative della regione Lombardia (impianti soggetti ad Autorizzazione Integrata Ambientale ai sensi del D.Lgs 152/06) in affiancamento agli SME installati dal gestore. Le emissioni vengono quindi monitorati tramite il sistema SME, che consiste nell’integrazione di strumentazione e componentistica accessoria, necessaria al controllo della qualità degli effluenti gassosi emessi in atmosfera dall’impianto.

Tutta la strumentazione e le apparecchiature di analisi presso CORE garantiscono il rispetto delle normative e i livelli di qualità richiesti, in particolare QAL1, QAL2 e QAL3 in modo da non dare ambiguità rispetto alle grandezze fisiche misurate dagli strumenti. Di seguito si riporta una breve spiegazione:

1. **QAL1:** Procedimento da utilizzarsi per dimostrare l' idoneità dello strumento al proprio compito di misurazione secondo quanto specificato dalla UNI EN 15267-3:2007;
2. **QAL2:** Procedimento per la determinazione della funzione di taratura e della sua variabilità nonché una prova della variabilità del Sistema di Misurazione Automatico (AMS) rispetto all'incertezza fornita dalla legislazione;
3. **QAL3:** Procedimento utilizzato per controllare la deriva e la precisione al fine di dimostrare che l'AMS è in controllo durante il funzionamento, in modo che continui a funzionare secondo le specifiche richieste per l'incertezza;
4. **AST:** Prova di sorveglianza annuale per valutare se i valori ottenuti dall'AMS soddisfano ancora i criteri di incertezza richiesti. I punti di campionamento in continuo e gli strumenti di misurazione della temperatura, portata e pressione sono installati direttamente a camino.

Gli strumenti di analisi sono posizionati in una cabina dedicata e sono connessi ai punti di campionamenti mediante una linea riscaldata che mantiene la temperatura dei fumi a 80°C per evitare eventuale condensa del vapore acqueo oppure la condensa di eventuali acidi presenti nei fumi.

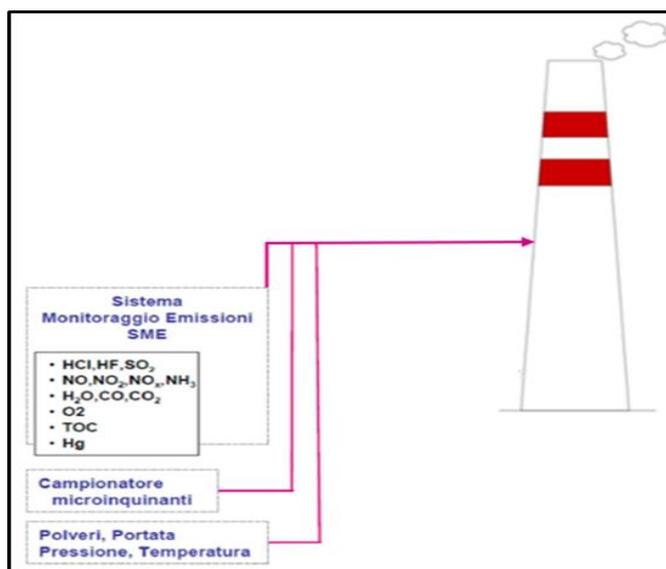


Figura- 13 Questa figura raggruppa le varie tipologie di inquinanti e parametri misurati a camino

2. VALUTAZIONE DEL RECUPERO ENERGETICO ANNUALE DEL TERMOVALORIZZATORE: L'INDICE DI DIFFERENZA ENERGETICA R1

L'indice di efficienza energetica R1

La Direttiva 2008/98/EC del 19 novembre 2008 (indicata nel seguito come *WFD* = “*Waste Framework Directive*”) stabilisce la ben nota gerarchia a cinque livelli per la politica in materia di rifiuti: **prevenzione, preparazione per il riutilizzo, riciclaggio, recupero** (per esempio, recupero di energia) e, come ultima possibilità, lo **smaltimento**. Con la *WFD* i rifiuti, dall'essere considerati un onere indesiderato, diventano una risorsa da valorizzare. Quando, infatti, il riciclaggio non è preferibile dal punto di vista ambientale, tecnicamente praticabile o economicamente fattibile, il rifiuto, ove possibile, deve essere sottoposto ad altre forme di recupero, come il recupero energetico, prima di ricorrere allo smaltimento. La formula R1, definita in nota all'Allegato II della *WFD*, è stata introdotta con lo scopo di discriminare, quando l'incenerimento dei rifiuti urbani è classificabile come operazione di recupero energetico (R1) e quando, invece, come operazione di smaltimento (D10), in modo che sia opportunamente collocato nella suddetta gerarchia. **La qualifica di operazione di recupero energetico (R1) è assegnata in luogo di quella di smaltimento (D10) quando l'incenerimento dei rifiuti urbani contribuisce in modo significativo alla produzione di energia per il sistema industriale e civile.** Tale significatività è misurata dall'indice d'efficienza energetica calcolato secondo la formula R1 e detto, in seguito, indice R1:

$$R1 = \frac{Ep - (Ef + EI)}{0.97 \times (Ew + Ef)} \times CCF$$

Dove:

- **Ep** è la produzione equivalente di energia, comprendente sia l'energia termica (pesata con un fattore 1,1), sia l'energia elettrica (pesata con un fattore 2,6). In seguito, verrà spiegato l'origine di questi due fattori di equivalenza;
- **Ef** è l'energia fornita nell'anno all'unità d'incenerimento da combustibili ausiliari (non classificati come rifiuti) che abbiano contribuito alla produzione di vapore utilmente impiegato;
- **Ew** è l'energia contenuta nel rifiuto complessivamente trattato con riferimento al PCI relativo;

- **EI** è l'energia complessivamente importata dall'unità d'incenerimento escludendo Ew ed Ef;
- **0.97** è un fattore che considera le perdite di energia dovute alle ceneri di caldaia e all'irraggiamento;
- **CCF** "Climate Correction Factor" sarebbe il coefficiente di correzione climatica (il modo per calcolare questo fattore verrà spiegato nel paragrafo *Il fattore CCF*).

L'incenerimento dei rifiuti urbani è considerato operazione di recupero energetico (R1) qualora l'indice R1 conseguito dall'unità d'incenerimento in cui è effettuato raggiunga o superi la soglia di:

- 0,60 se l'installazione è in funzione e autorizzata prima del 1° gennaio 2009;
- 0,65 se l'installazione è autorizzata dopo il 31 dicembre 2008.

Nel caso di mancato raggiungimento della soglia applicabile, l'incenerimento è classificato come operazione di smaltimento (D10).

L'indice R1, pur non essendo un rendimento nell'accezione termodinamica del termine, può essere considerato un indicatore dell'efficienza con cui si recupera energia dai rifiuti urbani. La sua applicazione, pertanto, promuove il recupero efficiente del contenuto energetico dei rifiuti, oltre a incoraggiare il miglioramento e l'innovazione nel settore dei trattamenti termici dei rifiuti urbani.

Dal punto di vista pratico, il raggiungimento della soglia R1 o meno non comporta drastiche scelte tecnologiche ma, piuttosto, determina forti implicazioni di natura economica, amministrativa ed autorizzativa.

Impostazione e interpretazione dell'indice R1

Dalla definizione della formula si ricava direttamente che la sua applicazione riguarda un arco temporale di un anno. Infatti, le unità di misura indicate per le varie forme d'energia sono i Giga-Joule annui [**GJ/a**]. Se si considera il trattamento termico di RSU, il calore generato dalla loro combustione può essere recuperato in diverse modalità: in maniera diretta per soddisfare una richiesta di energia termica (soluzione spesso adottata nei paesi del Nord Europa), per esclusiva produzione di elettricità (tipicamente ricorrendo ad un ciclo Rankine), oppure per produrre entrambi questi effetti utili, cioè per la produzione combinata di calore ed energia elettrica. Quando è prodotto un unico effetto utile (calore o elettricità), è possibile ricorrere ai più comuni indici di prestazione energetica, ossia il **rendimento termico** ed il **rendimento elettrico**. In questi casi, infatti, tali grandezze rappresentano in maniera corretta l'efficienza della trasformazione in esame. Nell'ipotesi

che l'energia dei rifiuti venga recuperata per la sola produzione di calore Q_{termico} si definisce l'efficienza del processo attraverso il rendimento termico della caldaia $\eta_{\text{th,cald.}}$.

$$\eta_{\text{th,cald.}} = \frac{Q_{\text{termico}}}{E_{\text{RSU}}}$$

Dove E_{RSU} quantifica l'energia contenuta nei rifiuti inceneriti. Analogamente, per un sistema che produce elettricità, si definisce il rendimento elettrico lordo $\eta_{\text{el,lordo}}$ come rapporto tra l'energia elettrica prodotta E_{el} e l'energia dei rifiuti:

$$\eta_{\text{el,lordo}} = \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{RSU}}} = \frac{Q_{\text{termico}}}{E_{\text{RSU}}} \times \frac{E_{\text{el}}}{Q_{\text{termico}}} = \eta_{\text{th,cald.}} \times \eta_{\text{ciclo}}$$

$$\eta_{\text{el,lordo}} = \eta_{\text{th,cald.}} \times \eta_{\text{O}} \times \eta_{\text{mecc}} \times \eta_{\text{alternatore}}$$

Tutti i rendimenti sin qui definiti sono indici inferiori all'unità (poiché dedotti dal primo principio della termodinamica) e si prestano anche per eseguire delle analisi comparative tra impianti che conseguano lo stesso ed unico effetto utile. **Non sono però significativi in analisi di impianti che producono diversi mix di effetti utili.** Ciò è principalmente dovuto al **differente valore termodinamico del calore e dell'energia elettrica**. Questa situazione è particolarmente sentita nel caso di produzione combinata di calore ed elettricità: se si definisse un rendimento in maniera analoga ai precedenti, cioè rapportando l'energia complessivamente recuperata o prodotta dai rifiuti rispetto a quella in ingresso al sistema, si otterrebbe un indice che non rappresenterebbe correttamente l'efficienza del fenomeno fisico in questione.

Seguendo questa logica, infatti, viene definito il rendimento di primo principio che in seguito verrà modificato per tenere conto alla differenza del valore termodinamico del calore e dell'energia elettrica prodotti:

$$\eta_{\text{I}} = \frac{Q_{\text{utile}} + E_{\text{el}}}{E_{\text{RSU}}}$$

Il rendimento di primo principio conferisce lo stesso peso (unitario), cioè lo stesso valore, ad entrambe le forme d'energia prodotte. Per poter quantificare le prestazioni di un sistema, quale può essere un impianto d'incenerimento, che produca simultaneamente più forme d'energia, o anche per eseguire confronti o analisi tra diversi sistemi che producano un mix di più effetti utili in diverse misure, è necessario ricondursi ad una quantità equivalente in grado di rappresentare coerentemente le diverse forme di energia realmente ottenute.

Un approccio che consente di superare tale incoerenza è stato sviluppato e presentato nel *BRef WI* “*BAT (Best Available Technology) reference documents*” e consiste nel valutare calore ed elettricità in termini di energia primaria equivalente. Per far questo, tuttavia, è necessario introdurre dei **fattori di equivalenza per l’elettricità e il calore**, riportandosi ad impianti convenzionali di produzione di potenza, caratterizzati da opportune efficienze di conversione (ovvero, impianti con rendimento normale). Il *BRef WI* fornisce una stima dei rendimenti medi conseguiti dagli impianti europei che generano effetti utili (calore ed elettricità). Da questa analisi si evince che il rendimento termico medio di caldaia $\eta_{th,cald}$ per produrre calore è circa il **91%**, mentre, per un impianto termoelettrico per la produzione efficiente di energia elettrica, si ha un rendimento elettrico medio $\eta_{el,medio}$ del **38,5%**.

Riferendosi a queste ipotesi è **possibile ricondurre l’energia termica ed elettrica prodotte dall’impianto d’incenerimento in termini di risorsa o Energia Primaria equivalente (EPe)**. Ad esempio, considerando un Joule di energia utile sotto forma di calore ed elettricità si otterrebbe in termini di risorsa primaria:

$$1J_{caore} = \frac{1}{\eta_{th,cald,medio}} = \frac{1}{0.91} = 1.1J_{EPth}$$

$$1J_{elettrico} = \frac{1}{\eta_{el,medio}} = \frac{1}{0,385} = 2.6J_{EPel}$$

Dunque, l’energia prodotte devono essere espresse in termini di energia primaria equivalente.

Quindi tutte le energie prodotte o devono essere moltiplicate per il relativo fattore:

- 2,6 per l’energia elettrica;
- 1,1 per l’energia termica.

Il volume di controllo della caldaia

I termini che compaiono nell'espressione dell'indice R1 sono essenzialmente dei flussi energetici e, pertanto, la definizione di un opportuno volume di controllo e del relativo confine ha un ruolo centrale per una loro corretta valutazione del bilancio dei flussi di energia. Attraverso tale confine, infatti, è possibile identificare i diversi flussi di input e di output che rientrano nel calcolo dell'efficienza R1.

L'impianto di incenerimento sarà comprensivo di tutte le sezioni destinate alla ricezione, stoccaggio, alimentazione e combustione in caldaia dei rifiuti o di altri combustibili, nonché alle aree adibite alle loro eventuali operazioni di trattamento. Sono compresi anche i sistemi di controllo e gestione delle operazioni di incenerimento (linee incenerimento, sistema trattamento fumi e residui di caldaia e altri). Con l'obiettivo di mantenere una certa conformità al BRef WI, l'unità a cui bisogna rapportarsi per il calcolo dell'efficienza R1 (o unità R1) è più piccola, e può essere considerata come un sottoinsieme dell'impianto di incenerimento. In realtà, l'inclusione o meno di alcuni componenti all'interno dell'unità R1 è strettamente dipendente dalla tipologia stessa dell'impianto. Questo implica che l'unità di controllo R1 venga definita di volta in volta e in riferimento al caso in esame, e non si possa darne una definizione univoca o standard.

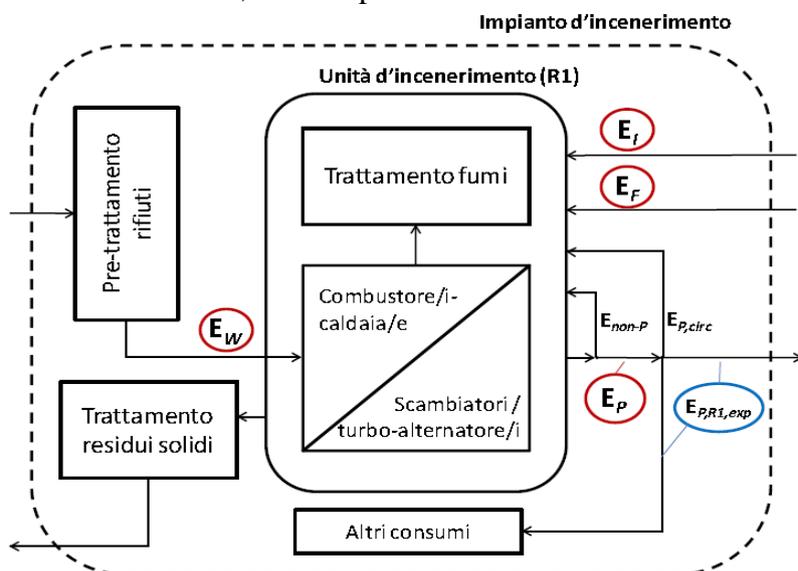


Figura- 14 Questa immagine mostra quali siano le sezioni dell'impianto entranti nel volume di controllo

("Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell'Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani," (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/impres/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.4)

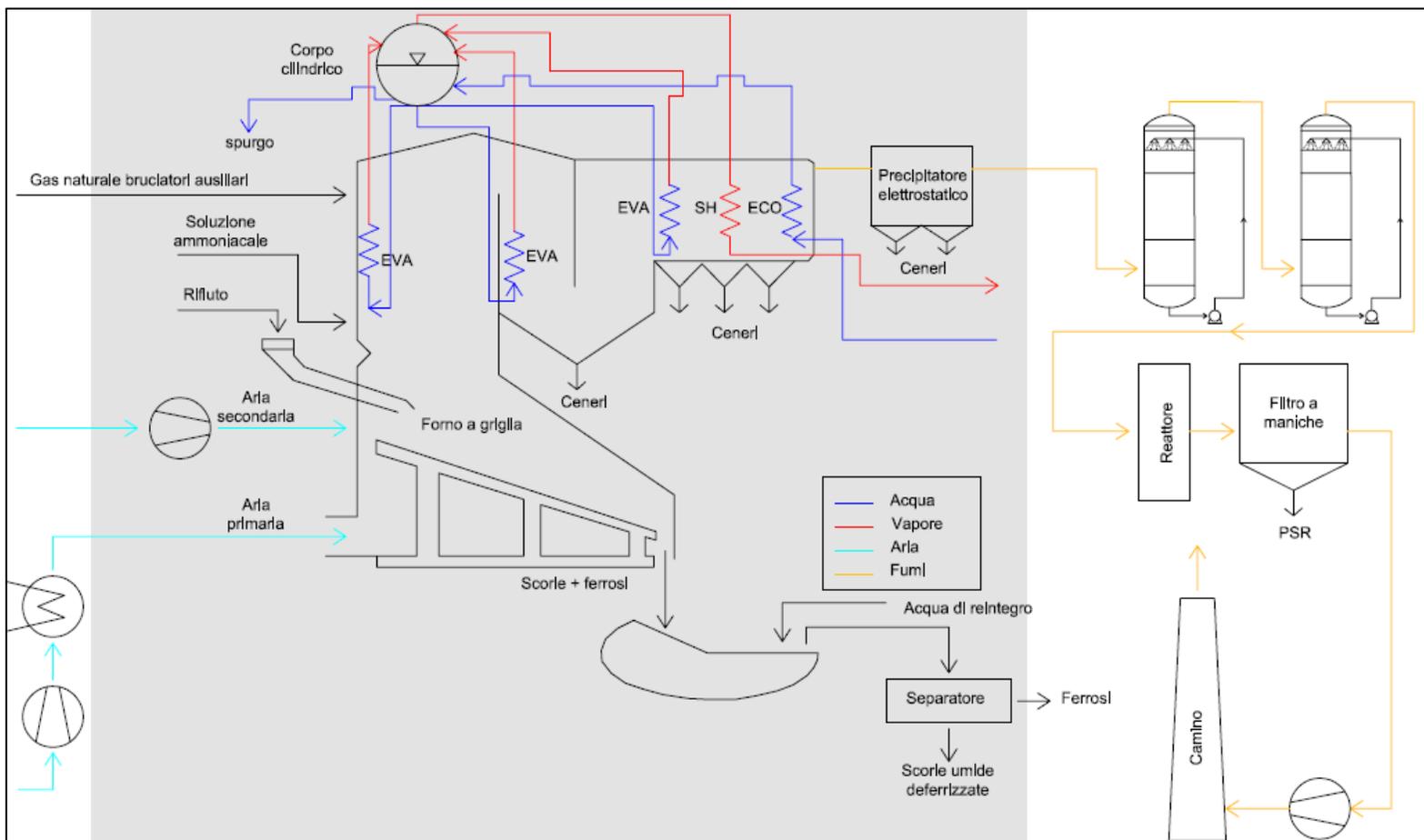


Figura- 15 Questa immagine mostra i componenti delle sezioni entranti nel volume di controllo evidenziati in grigio per il bilancio del flusso di energia

“Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani,”
 (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.51)

Il termine Ep

Il termine EP include l'energia annualmente recuperata dai rifiuti, sia di natura termica, che elettrica. Le linee guida europee pongono forte enfasi sul fatto che **l'energia conteggiata in questo termine deve soddisfare bisogni che dovrebbero essere, altrimenti, soddisfatti da altre fonti energetiche**. Non è, pertanto, sufficiente produrre energia termica da cedere a terzi, è anche necessario provare che tale cessione avvenga a fronte di un corrispettivo, in modo che sia applicabile la presunzione dell'effettivo utilizzo del bene sulla base del principio del costo-opportunità.

In realtà, la differenza tra EP (rientrante nell'espressione dell'efficienza R1) e l'energia lorda prodotta all'anno (EP, lorda) è minima. Tale differenza è dovuta agli utilizzi interni che influenzano in modo diretto la produzione di vapore, quantificati da E_{non-P} . In questa categoria si fanno rientrare tutti quei consumi di elettricità e di calore, prodotti recuperando energia termica dall'operazione di incenerimento, ad esempio, il vapore utilizzato per riscaldare l'aria primaria, che comportano l'introduzione calore a correnti fluide, dalle quali poi è recuperata energia a beneficio di un aumento dell'effetto utile principale (produzione di vapore). Invece, per il termine **Ep,cir.** le linee guida europee evidenziano alcuni possibili impieghi interni, per i quali è possibile far rientrare tale fabbisogno energetico nel computo di EP ad esempio il vapore utilizzato per i soffiatori.

Il termine **Ep,cir.** **bisogna sommarlo** al computo del Ep, perché viene considerato come energia utile e necessaria per la produzione, e se non fosse utilizzata questa energia dal vapore prodotto, sarebbe stata sostituita da energia proveniente dall'esterno. Ad esempio, il vapore, nel caso in cui non fosse stato possibile utilizzarlo per i soffiatori, sarebbe stato invece utilizzato dei compressori ad aria che richiedono un maggiore consumo di energia elettrica.

Invece, il termine E_{non-P} **bisogna sottrarlo** dal computo del Ep, perché questo termine fa aumentare l'energia prodotta Ep di una quantità pari al contenuto energetico di Ep,cir. quindi non sottrarlo dal termine Ep sarebbe come considerare il suo effetto utile due volte.

Il termine Ef

Il termine Ef quantifica unicamente il consumo di combustibili ausiliari che hanno effetto utile sulla produzione di vapore utilmente impiegato. Tali combustibili non possono essere sostanze classificate come rifiuti. Le linee guida europee² stabiliscono il seguente criterio per ritenere, che il combustibile ausiliario abbia contribuito alla produzione di vapore utilmente impiegato: **il consumo deve avvenire con produzione di vapore, quando il generatore di vapore è connesso alla rete del vapore.** Tutto il combustibile utilizzato nei bruciatori di sostentamento, durante la marcia dell'impianto, deve normalmente essere conteggiato in EF.

In EF deve essere computata anche la parte di combustibile utilizzata dai bruciatori d'avviamento / sostentamento durante le fasi d'avvio e di fermata impianto che contribuisce alle produzioni conteggiate in EP. In assenza di registrazioni puntuali, che permettano di distinguere, se il consumo sia contestuale o meno alla produzione di EP, le linee guida europee prevedono la possibilità di conteggiare in modo forfettario in EF il 50% del combustibile utilizzato nelle fasi d'avviamento e fermata.

Il termine EI

In questo termine si fanno rientrare tutti quei contributi energetici in ingresso all'unità di riferimento, che non rientrano nella definizione di EW e EF.

In riferimento a quanto esposto precedentemente, **rientrano in EI l'energia dei combustibili impiegati nelle fasi di marcia, arresto e avviamento dell'operazione di incenerimento nel momento in cui non concorrono alla produzione utile di vapore** secondo il criterio prima citato. Oltre all'energia associata ai combustibili veri e propri, si attribuisce ad EI anche quelle importazioni di energia elettrica e termica che soddisfano i fabbisogni dell'unità di incenerimento, ma che non ricadono nei termini EP o EF, purché tale importazione di energia avvenga solamente, se le linee d'incenerimento sono produttive e non soggette a periodi di fermata.

² Direttiva 2008/92/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti (allegato II)

Il fattore CCF

Il clima della località in cui è situata un'unità d'incenerimento influenza il valore del termine E_P che l'unità può potenzialmente produrre. Ciò è principalmente imputabile a due ragioni:

- dal clima della località considerata dipende l'eventuale esistenza di reti di teleriscaldamento che possano essere alimentate dall'unità d'incenerimento, nonché la domanda di calore da parte di tali reti;
- in presenza di turbine a vapore a condensazione, il clima influenza la pressione di condensazione, e quindi influisce apprezzabilmente sul potenziale recupero di energia.

Inizialmente, la formula R1 non prevedeva alcun fattore di correzione climatica. In seguito, si è raggiunto un compromesso a livello europeo, che ha originato la *Direttiva 2015/1127/UE del 10/07/2015*, con la quale è stata modificata la formula R1 nell'*Allegato II* della *WFD* con l'introduzione del fattore *CCF*.

Il fattore *CCF* ("*Climate Correction Factor*") è definito sulla base della media di lungo periodo dei **gradi giorno** ($HDD = \text{"Heating Degrees Day"}$ - secondo la definizione Eurostat) della località considerata, in modo differenziato in base alla data d'autorizzazione ed entrata in esercizio dell'installazione:

1. **Per le installazioni in esercizio e autorizzate prima del 1° settembre 2015** si applica, fino al 31 dicembre 2029, il seguente schema (chiamato nel seguito "EU1"):

$$CCF = 1 \text{ se } HDD \geq 3350$$

$$CCF = 1,25 \text{ se } HDD \leq 2150$$

$$CCF = -(0,25/1200) \times HDD + 1,698 \text{ quando } 2150 < HDD < 3350$$

2. **Per le installazioni autorizzate dopo il 31 agosto 2015** e per quelle considerate al precedente punto 1, dopo il 31 dicembre 2029, si applica il seguente schema (chiamato nel seguito "EU2"):

$$CCF = 1 \text{ se } HDD \geq 3350$$

$$CCF = 1,12 \text{ se } HDD \leq 2150$$

$$CCF = -(0,12/1200) \times HDD + 1,335 \text{ quando } 2150 < HDD < 3350$$

Il valore risultante dal calcolo del fattore CCF deve essere arrotondato alla terza cifra decimale. La media di lungo periodo dei gradi giorno (HDD) considera un periodo di **20 anni antecedente l'anno per il quale si effettua il calcolo**. La definizione secondo Eurostat dei gradi giorno dell'anno " i " (HDD_i) è pari alla somma dei gradi giorno di ogni giorno " j " dell'anno " i " ($HDD_{i,j}$), secondo l'espressione:

$$HDD_{i,j} = (18^{\circ}\text{C} - T_M) \text{ se } T_M \leq 15^{\circ}\text{C}$$

$$HDD_{i,j} = 0 \text{ se } T_M > 15^{\circ}\text{C}$$

$$T_M = (T_{Max} - T_{Min}) / 2$$

Dove T_{Min} e T_{Max} sono le temperature ambiente rispettivamente minima e massima registrate nel giorno " j " dell'anno " i ".

La seguente figura riporta l'andamento del CCF secondo le definizioni EU1 e EU2.

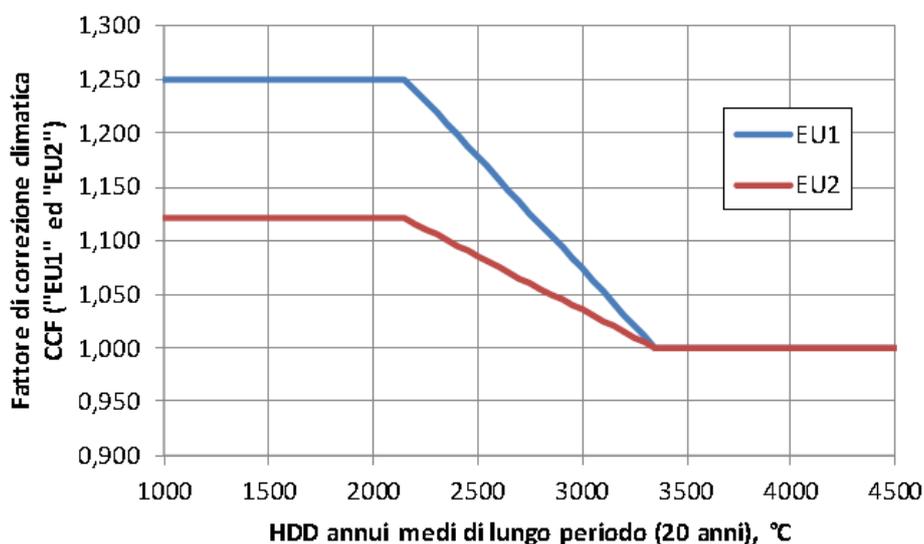


Figura- 16 Andamenti del fattore di correzione climatica "CCF" secondo le due definizioni europee: "EU1" ed "EU2"

("Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell'Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani," (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017),

<http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.10)

3. CALCOLO DELL'INDICE D'EFFICIENZA ENERGETICA R1 PER IL TERMOVALORIZZATORE DI CORE RELATIVO ALL'ANNO 2019

I seguenti calcoli sono stati fatti nel rispetto delle linee guide europee³. Quindi, tutti i dati misurati sono stati presi dalle registrazioni archiviate per l'intero anno d'esercizio. Tali registrazioni sono frutto di un processo di media delle misure campionate con cadenza normalmente inferiore al minuto.

È importante sottolineare che il calcolo delle componenti dei fumi debba essere effettuato almeno su base oraria e non utilizzando i valori medi giornalieri, settimanali, mensili o addirittura annui, diversamente si rischiano significative approssimazioni.

Calcolo del termine Ep

Per calcolare il termine Ep, come prima cosa sono state individuate le ore di funzionamento relative alle tre linee:

| | ore | giorni |
|----------------|---------|----------|
| linea C | 7.515,5 | 313,1458 |
| linea B | 8.000,5 | 333,3542 |
| linea A | 7.523,5 | 313,4792 |

Di seguito sono state prelevate dal sistema di acquisizione dati dell'impianto, i valori delle energie termiche "EpT" ed elettriche "EpE" utili prodotti per l'anno 2019:

| | | |
|------------|----------|-----|
| EpT | 8.1791 | MWh |
| EpE | 12.875,2 | MWh |

Considerando i fattori di equivalenza per l'energia termica ed elettrica e trasformando da MWh in GJ/a moltiplicando per 3.6 si avrà:

| | | |
|------------|------------------------|------|
| EpT | $81.791 * 1.1 * 3.6$ | GJ/a |
| EpE | $12.875,2 * 2.6 * 3.6$ | GJ/a |

Svolgendo il calcolo si avrà:

| | | |
|------------|-------------|------|
| EpT | 323.892,4 | GJ/a |
| EpE | 120.511,872 | GJ/a |

³ Direttiva 2008/92/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti (allegato II)

L'impianto di CORE per la pulizia della caldaia utilizza dei soffiatori a fuliggini per ogni linea, tali soffiatori vengono azionati tutti i giorni per 10 min. quando le linee sono in marcia, e consumano una portata pari a 7 t/ora di vapore surriscaldato:

| | | |
|--------------------|----|-------|
| Tempo soff. | 10 | min. |
| cons. soff. | 7 | t/ora |

Sono stati calcolati i consumi relativi alle ore di marcia per ogni linea:

| | | |
|--------------------------------|-----------|-----|
| consumo soff C | 365,3368 | t/a |
| consumo soff B | 388,9132 | t/a |
| consumo soff A | 365,7257 | t/a |
| consumo.TOT. Soffiatori | 1.119,976 | t/a |

Di seguito è stato calcolato il termine $E_{p.circ.}$ relativo all'energia associata al vapore utilizzato per pulire le caldaie in termini GJ/a:

| | | |
|---------------------------------|---|------|
| $E_{p.circ.}$ | $1.119,98 * 1,1 * (3.216,6 - 66,2) / 1.000$ | GJ/a |
| $E_{p.circ.}$ | 3.881,209 | GJ/a |

Dove (3216,6-66,2) è la differenza di entalpia del vapore in ingresso ed in uscita dai soffiatori.

Di conseguenza si calcola il termine E_p relativo al calcolo del R1, come somma del $E_{p.circ.} + E_{pE} + E_{pT}$:

$$E_p = 3881,209 + 120.511,87 + 323.892,40$$

$$\mathbf{E_p = 448.285,44 GJ/a}$$

Calcolo Ef e EI

Lo scopo di questo paragrafo è illustrare come sono stati calcolati, **l'energia Ef introdotta nell'installazione con combustibili ausiliari che hanno contribuito alla produzione degli effetti utili conteggiati in Ep e l'energia EI corrispondente al consumo di energia elettrica e di gas naturale nelle fasi d'avviamento e fermata dell'impianto, in assenza di produzione degli effetti utili conteggiati in Ep.**

I bruciatori a metano presenti a CORE non hanno le registrazioni dei consumi del metano differenziati per consumo durante le fermate e consumo durante la marcia dell'impianto. Per poter superare queste problematiche sono state calcolati i consumi del metano in Sm^3 per l'anno 2019, poi sono state rilevate le portate dei bruciatori e, infine, sono state calcolate le ore di funzionamento dei bruciatori durante le fasi di avviamento e spegnimento dove non viene prodotto vapore, e le ore di funzionamento dei bruciatori associati alla produzione di vapore durante la marcia dell'impianto.

Dagli analisi effettuate risulta che il numero delle fermate complessivo per le tre linee nell'anno 2019 sono state 8 fermate: 3 di queste sono di 72 ore, le altre 5 fermate sono di 40 ore. Invece, la portata del metano relativa al consumo del primo bruciatore ovvero, quello di avviamento risulta essere di $566 \text{ m}^3/\text{h}$, e la portata del metano relativa al consumo del secondo bruciatore risulta essere di $450 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dunque, durante le analisi è emerso un altro problema, ovvero, durante la fase di avviamento non vengono utilizzati entrambi i bruciatori contemporaneamente, ma seguono una rampa di riscaldamento del forno in funzione del lavoro che è stato svolto durante la fermata.

Perciò, è stato necessario calcolare o arrivare ad avere una stima affidabile sul numero delle ore in cui era in marcia soltanto un bruciatore e le altre ore in cui entrambi i bruciatori erano in marcia.

Dalle analisi effettuate si è evinto che le ore in cui c'era solamente un bruciatore in marcia sono $\frac{3}{4}$ delle ore complessive. E di conseguenza, $\frac{1}{4}$ delle ore complessive di funzionamento dei bruciatori sono relative alle ore di funzionamento dei due i bruciatori contemporaneamente in marcia.

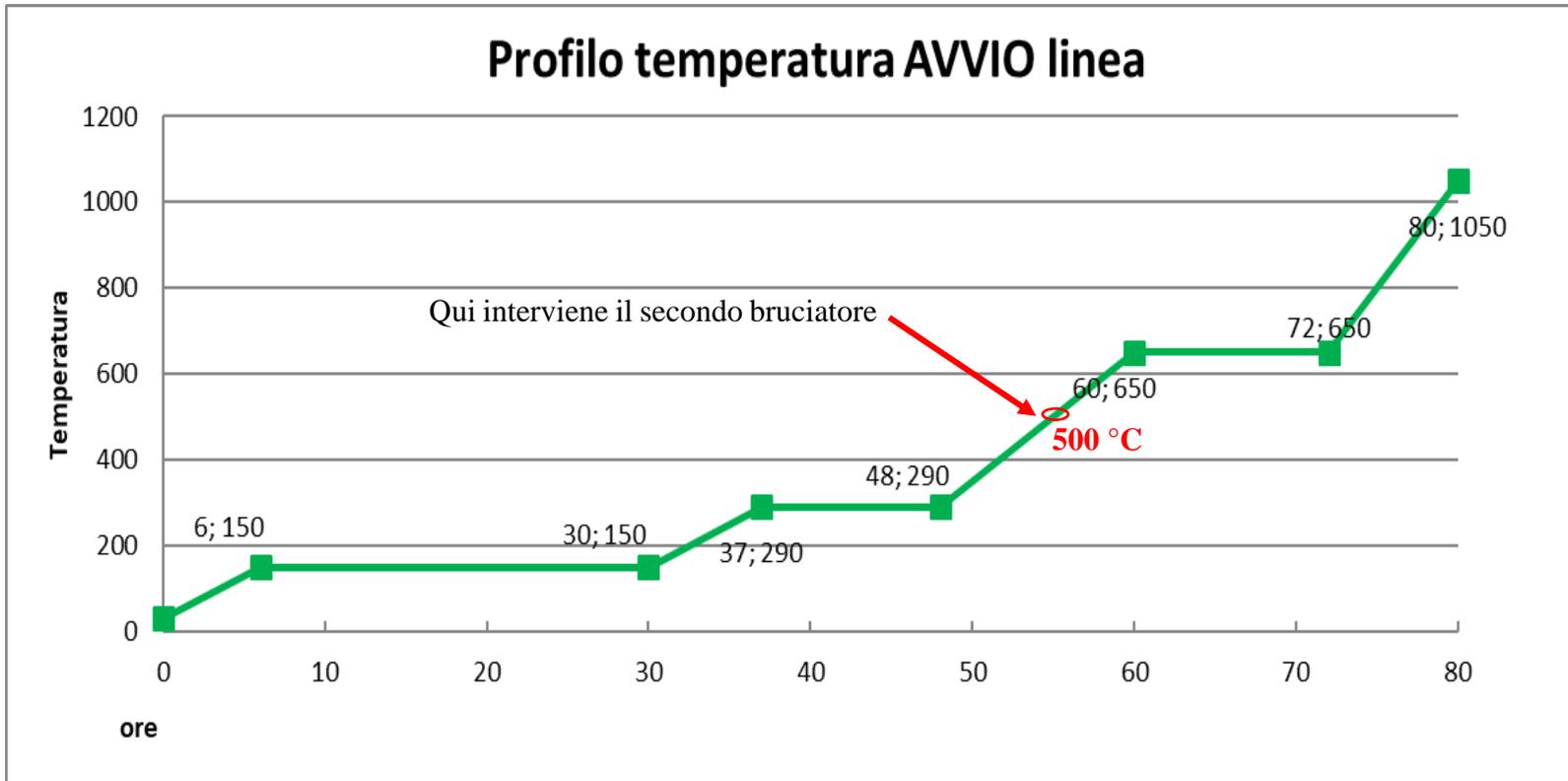


Figura- 17 Questo grafico mostra la rampa di temperatura per l'avvio della linea dopo un intervento sui materiali refrattari.

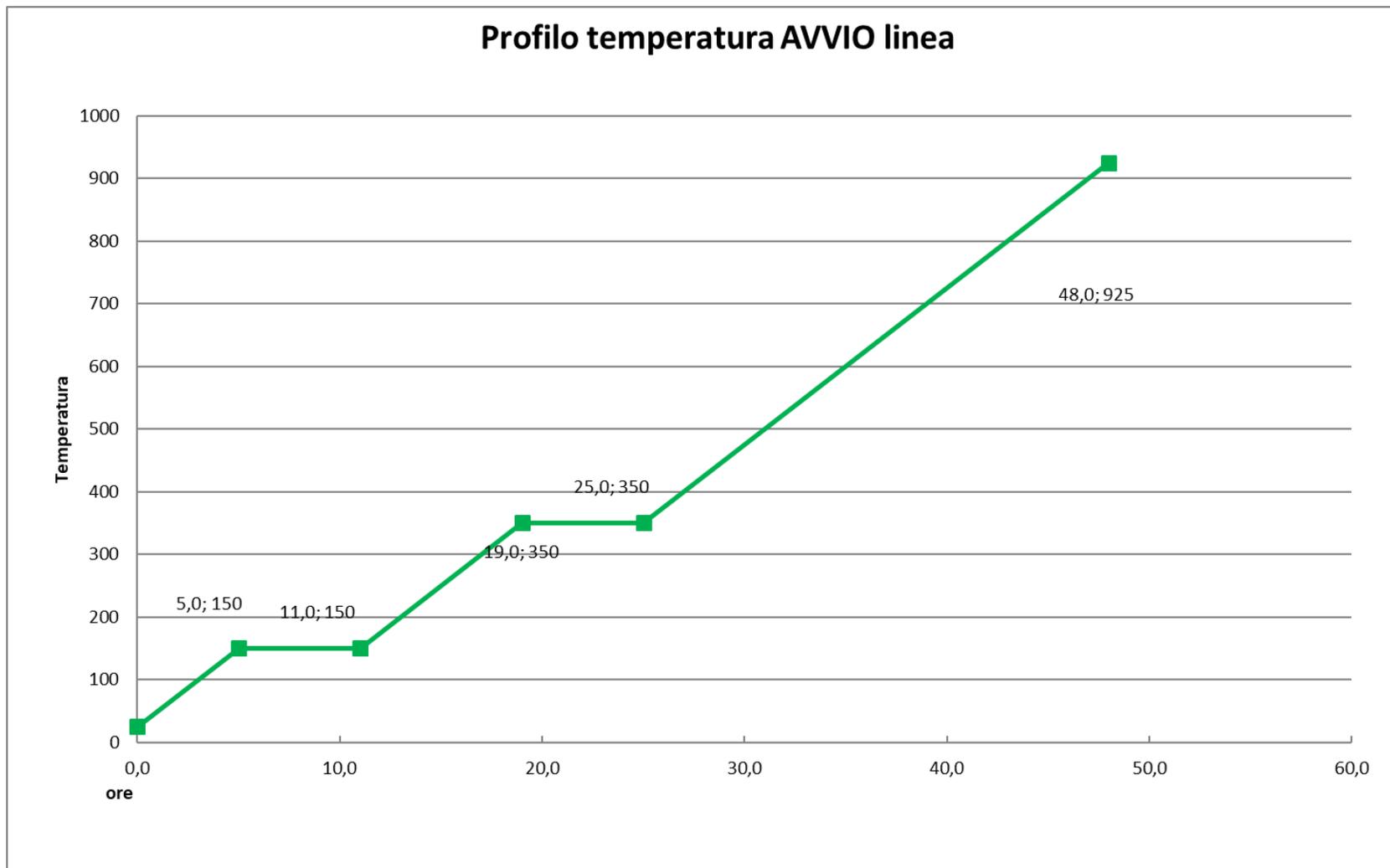


Figura- 18 Rampa di avviamento veloce delle linea dopo un intervento che non abbia causato importanti modifiche. Ad esempio, la manutenzione del catalizzatore .

Quindi, proseguendo con i calcoli, si trova il consumo del metano relativo all'avviamento delle 3 linee per l'anno 2019:

| | |
|-----|---|
| 416 | Ore/a di avviamento |
| 312 | Ore/a di funzionamento 1 solo bruciatore |
| 104 | Ore/a di funzionamento 2 bruciatori |
| 566 | portata primo bruciatore Sm^3/h |
| 450 | portata secondo bruciatore Sm^3/h |

235906 SM^3/a sarebbe il consumo di metano per l'avviamento delle tre linee per l'anno 2019. Dunque, l'energia relativa a questo consumo di metano farebbe parte del termine EI, perché durante la fase di avviamento non si verifica produzione di vapore perché non vengono caricati i rifiuti.

Inoltre, nel computo del calcolo del termine EI, bisogna tener conto dell'energia elettrica acquistata per l'auto consumo dell'impianto.

$$E_{\text{elettrica, acquistata}} = 1.607,1 \text{ MWh} = 5.785,56 \text{ GJ}$$

$$EI = E_{\text{elettrica, acquistata}} + E_{\text{relativa, al, consumo, di, metano}} = 5.785,56 + \frac{235.906 * 39,0178}{1.000}$$

Dove 39,0178 sarebbe il PCI del metano in MJ/kg (da bolletta)

$$\mathbf{EI = 14.990,10 \text{ GJ/a}}$$

Ora determinare il termine Ef mediante il consumo relativo di metano è diventato facile, perché basterebbe fare la differenza tra il consumo totale di metano relativo all'anno 2019 e il consumo di metano rientrante nel calcolo del EI. Quindi, il consumo di metano relativo alla produzione di vapore sarebbe uguale 147.053 SM^3/a

$$\mathbf{EF = 5.737,70 \text{ GJ/a}}$$

Calcolo del termine Ew

La presente trattazione si focalizza esclusivamente sulla modalità ordinaria di valutazione del PCI del rifiuto trattato, mediante la stesura del bilancio dell'energia secondo un metodo ispirato alla norma EN 12952-15. la parte della norma di maggiore interesse è quella relativa al calcolo indiretto del rendimento di caldaia. Tale metodo utilizza il bilancio dell'energia di un opportuno volume di controllo per determinare il contenuto energetico del combustibile utilizzato. Dal punto di vista concettuale, l'approccio seguito è schematizzato nella Figura 17. lo schema di riferimento serve per comprendere come

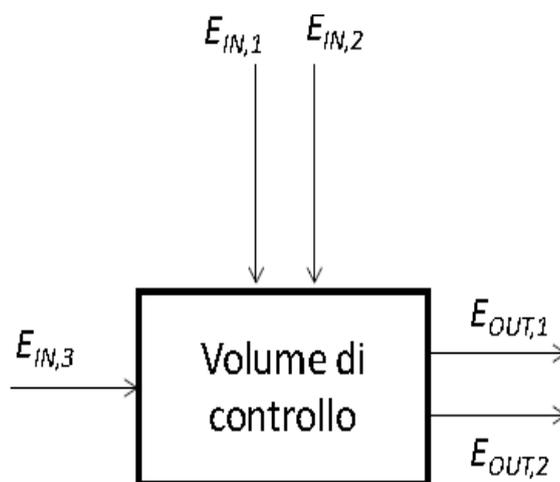


Figura- 19 Schema di riferimento per la realizzazione del bilancio dell'energia: il confine del volume di controllo individua tutti gli addendi del bilancio, ossia i flussi energetici che lo attraversano. (“Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani,” (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.12)

viene realizzato il bilancio dell'energia relativo al volume di controllo ed individua tutti gli addendi del bilancio, ossia i flussi energetici che lo attraversano.

Quindi il bilancio dell'energia consiste nell'imporre che la somma algebrica di tali flussi energetici sia complessivamente nulla, computando flussi entranti e uscenti con segni opposti. In altre parole, la somma dei flussi entranti, in virtù del bilancio dell'energia, deve eguagliare la somma dei flussi uscenti. Se un termine della sommatoria algebrica è incognito, l'applicazione del bilancio dell'energia (cioè l'applicazione della complessiva nullità di tale sommatoria) ne consente la determinazione.

$$\sum_{INPUTS} (E_{IN,i}) = \sum_{OUTPUTS} (E_{OUT,j})$$

$$E_{IN,x} = \sum_{OUTPUTS} (E_{OUT,j}) - \sum_{INPUTS} (E_{IN,i})$$

Sostanzialmente questa metodologia chiamata metodo “indiretto” viene utilizzata perché l'altra metodologia “metodo diretto”, tramite la quale si possa determinare il termine E_w (mediante la sua formula $E_w = \text{quantità di rifiuto trattato in un anno} \times PCI$), non può essere utilizzata essendo il termine PCI incognito, dato che i rifiuti trattati non sono di natura omogenea in termini di proprietà chimica e fisica. Quindi, si procede al calcolo del termine E_w tramite il metodo indiretto.

Nel caso del metodo indiretto che si basa sul calcolo del rendimento della caldaia, è necessario quantificare innanzitutto, l'effetto utile prodotto, cioè la produzione di

vapore / acqua calda, poi tutti gli altri flussi energetici uscenti dal volume di controllo, che sono solitamente perdite, e, infine, tutti i flussi energetici entranti oltre al combustibile. Il contenuto energetico del combustibile utilizzato costituisce l'incognita del bilancio.

La corretta applicazione di questa metodologia presuppone due passaggi chiave:

- la definizione di un opportuno volume di controllo, che con il suo confine individui i flussi energetici misurati e/o facilmente quantificabili;
- la quantificazione di tutti i flussi energetici, diversi dal combustibile, in ingresso / uscita da tale volume di controllo.

Per poter trovare il bilancio dei flussi di energia entranti ed uscenti dal volume di controllo, bisogna per primo trovare il flusso di massa entrante ed uscente per poi associare ad esso il relativo contributo energetico. Bisogna considerare che non ci sarà soltanto un bilancio di massa ed un bilancio di energia ma quattro bilanci in totale, due di masse e due di energia. Questo è per il semplice motivo che il lato acqua vapore è separato dal lato aria fumi da una superficie fisica. Per poter procedere con il calcolo in modo corretto, sono state realizzati quattro tabelle, come la seguente figura.

| | | Portata t/a | Energia TJ/a |
|---------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|
| Input | Calore lordo scambiato | - | -XXX |
| | Rifiuto (E_W) | +XXX | +XXX |
| | Combustibili ausiliari (@ xxx MJ/kg) | +XXX | -XXX |
| | Aria preriscaldata (@ xxx°C) | +XXX | +XXX |
| | Aria fredda (@ xxx°C < 25°C) | +XXX | -XXX |
| | Acqua liquida (@ -xxx MJ/kg) | +XXX | -XXX |
| | Reagenti (@ +/-xxx MJ/kg) | +XXX | +/-XXX |
| | Altri input (@ +/-xxx MJ/kg) | +XXX | +XXX |
| Output | Fumi uscita caldaie (@ xxx°C) | -XXX | -XXX |
| | Incombusti (@ xxx MJ/kg) | -XXX | -XXX |
| | Altri output (@ xxx MJ/kg) | -XXX | -XXX |
| | Perdite per irraggiamento e conv. | - | -XXX |
| Totale | | | 0,00 |

Figura- 20 Esempificazione della procedura di soluzione del bilancio dell'energia per il lato fumi della caldaia ("Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell'Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani," (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.10)

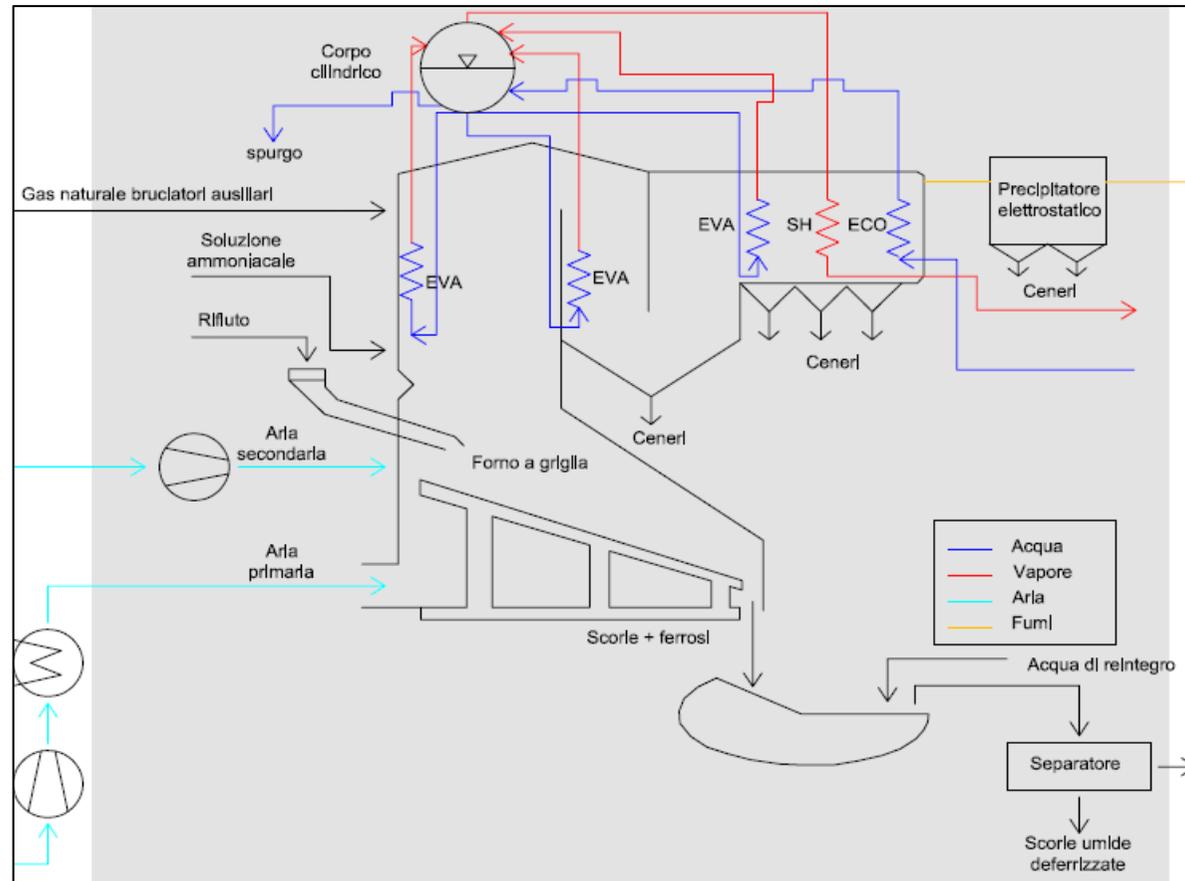


Figura- 21 Rappresentazione schematica del volume di controllo per il sistema di un termovalorizzatore (“Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani,” (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/ imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>, p.14)

a. Bilancio di massa lato acqua vapore

| | | |
|-------------------------|-----------|-------|
| produzione media vap. C | 8,67 | t/ora |
| produzione media vap. B | 8,14 | t/ora |
| produzione media vap. A | 8,89 | t/ora |
| prod.TOT.vap. | 197.167,4 | t/a |
| Q.spurgo | 4.929,184 | t/a |
| Q.acqua alimento | 202.096,6 | t/a |

b. Bilancio energia lato acqua

Una volta noto il bilancio di massa, si può ricavare il bilancio d'energia conoscendo, l'entalpia del vapore dato che sono noti la pressione e la temperatura. La seguente tabella riassume il bilancio di energia relativo al lato acqua-vapore

| | Q[t/a] | T[°C] | p[bar] | h[kj/kg] | E[TJ/anno] |
|----------------|--------------|-------|--------|----------|------------|
| acqua.alimento | 201.402,51 | 110 | 50 | 464,9 | |
| spurgo | - 4.912,26 | 250 | 40 | 1085,6 | - 5,33 |
| vapore | - 196.490,26 | 340 | 40 | 3068 | - 602,83 |
| | | | | | - 608,16 |

Figura- 22 Bilancio di energia lato fumi

c. Bilancio massa lato fumi

Al fine di semplificare lo svolgimento dei bilanci di massa sulla linea fumi e senza introdurre alcuna approssimazione, è possibile schematizzare la fase gassosa dei fumi in uscita dalla caldaia come una somma delle seguenti tre componenti complementari:

- *FAS*: Fumi Anidri Stechiometrici. Sono i fumi teoricamente prodotti dalla combustione completa senza eccesso di comburente. Sono pertanto composti dai prodotti anidri di combustione e dalle componenti dell'aria secca associate all'ossigeno consumato in tale combustione
- *EAS*: Eccesso d'Aria Secca. Si tratta dell'eccesso d'aria secca che si trova nei fumi in aggiunta ai FAS. Proviene dall'eccesso d'aria utilizzato durante la combustione e da tutti gli ulteriori apporti d'aria secca sia in caldaia, sia lungo la linea di trattamento fumi (per esempio l'aria falsa, l'aria di eventuali bruciatori di riscaldamento fumi, etc.)
- *VA*: Vapore Acqueo – è l'acqua presente nei fumi sotto forma di vapore

In base alla portata "tal quale" dei fumi al camino (che, di fatto, corrisponde alla portata della fase gassosa) e alle rispettive concentrazioni di vapore acqueo e ossigeno, è possibile

determinare l'entità delle tre componenti gassose sopra introdotte. Si utilizzano le seguenti formule matematiche:

$$VA = Q_{cam.TQ} * X_{H_2O.cam.TQ}$$

$$EAS = Q_{cam.TQ} * \frac{X_{O_2.cam.TQ}}{X_{O_2.0}}$$

$$FAS = Q_{cam.TQ} - VA - EAS$$

Dallo SME sono state ricavate le seguenti misurazioni relative alle caratteristiche dei fumi a camino. Dove X_{H_2O} indica la % di umidità nei fumi, X_{O_2} indica la % di ossigeno misurato a camino e $X_{solidi.secca}$ indica la % di polveri nei fumi a camino.

| | | | | |
|----------|--------|--------------------|---------------|--------------------|
| Q.fumi.C | 23.139 | Nm ³ /h | 173.901.154,5 | Nm ³ /a |
| Q.fumi.B | 26.002 | Nm ³ /h | 208.029.001 | Nm ³ /a |
| Q.fumi.A | 27.824 | Nm ³ /h | 209.333.864 | Nm ³ /a |
| Q.fumi | 76.965 | Nm ³ /h | 591.264.019,5 | Nm ³ /a |

La misurazione della portata dei fumi è stata fatta a camino perché in uscita dalla caldaia Non esiste un misuratore di portata, ed è vero che i fumi prima di arrivare a camino passino attraverso la linea di trattamento dei fumi, però seguendo le linee guide si possa stimare che la portata dei fumi a camino ed in uscita dalla caldaia sia la stessa. Questa approssimazione è lecita in quanto la portata dei reagenti aggiunti alla portata dei fumi lungo la linea di trattamento è trascurabile. Infatti, una parte di essa rimane intrappolata nel filtro a maniche, e la parte restante è totalmente trascurabile.

| | | |
|--------------------------------------|-------|------|
| X _{H₂O.cam.C} | 15,05 | % |
| X _{H₂O.cam.B} | 14,24 | % |
| X _{H₂O.cam.A} | 13,07 | % |
| X _{H₂O.cam} | 14,12 | % |
| X _{O₂.t.q.cam.C} | 12,61 | % |
| X _{O₂.t.q.cam.B} | 13,6 | % |
| X _{O₂.t.q.cam.A} | 13,73 | % |
| X _{O₂.t.q.cam} | 13,31 | % |
| X _{solidi.secca.C} | 41,29 | kg/a |
| X _{solidi.secca.B} | 2,02 | kg/a |
| X _{solidi.secca.A} | 13,32 | kg/a |
| X _{solidi.secca} | 56,63 | kg/a |

Una volta quantificati tutti i principali flussi in uscita dal volume di controllo della caldaia e i flussi in ingresso noti, è possibile impostare il bilancio di massa lato fumi della caldaia in termini di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi*, nonché in termini globali. Questi bilanci sono tra loro accoppiati, Tra i termini noti compaiono l'*EAS*, i *FAS* e il *VA* complessivamente uscenti dal volume di controllo e quantificati in precedenza, La soluzione di questo sistema lineare chiude il bilancio di massa lato fumi della caldaia, ed è riassunto nella seguente tabella.

| Flussi in uscita (output) | produzione specifica e fattori di conversione | | | | | | Quantità complessiva | | | |
|--|---|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------|
| | Q[um/a] | Rifiuti[t/a] | EAS [Nm ³ /um] | FAS [Nm ³ /um] | VA [Nm ³ /um] | Solidi [t/um] | EAS [Nm ³ /a] | FAS [Nm ³ /a] | VA [Nm ³ /a] | Solidi[t/a] |
| EAS [Nm ³ /a] | 358619361,3 | | 1 | | | | 358619361,3 | | | |
| FAS [Nm ³ /a] | 149158178,7 | | | 1 | | | | 149158178,7 | | |
| VA [Nm ³ /a] | 83486479,55 | | | | 1 | | | | 83486479,55 | |
| solidi secchi dalla caldaia [t/a] | 676,94 | | 0 | 0 | 0 | 1 | | | | 676,94 |
| incumbusti secchi [t/a] | 143,28 | | -8908 | 8908 | 0 | -1 | -1276338,24 | 8908 | | -143,28 |
| umidità scorie [t/a] | 3429,6 | | 0 | 0 | 1244 | 0 | | | 4266422,4 | |
| totale output | | | | | | | 357343023 | 149167086,7 | 87752901,95 | 533,66 |
| Flussi in ingresso (input) | | | | | | | | | | |
| Gas naturale Sm ³ /a | 382959 | | 0 | 8,282 | 2,015 | 0 | | 3171666,438 | 771662,385 | |
| soluzine ammoniacale($\lambda=2,2$, $\epsilon=0,8$) t/a | 481,701 | | -594,4 | 572,9 | 1423 | 0 | -286323,0744 | 275966,5029 | 685460,523 | |
| acqua per ammoniaca m ³ /a | 2729,639 | | 0 | 0 | 1244 | 0 | | | 3395670,916 | |
| vapore soffiatori m ³ /a | 1119,975694 | | 0 | 0 | 1244 | 0 | | | 1393249,764 | |
| acqua rientegro spegnimento scorie m ³ /a | 6859,2 | | 0 | 0 | 1244 | 0 | | | 8532844,8 | |
| ceneri del rifiuto t/a | 13718,4 | | | | | 1 | | | | 13718,4 |
| umidità del rifiuto t/a | 24165,694 | 1 | 0 | 0 | 1244 | 0 | | | 30062123,34 | |
| SC1 del rifiuto t/a | 50457,27862 | 1 | -2574 | 2700 | 584 | 0 | -129877035,2 | 136234652,3 | 29467050,72 | |
| SC2 del rifiuto t/a | 18587,56138 | 1 | -1142 | 10600 | 1664 | 0 | -21226995,09 | 197028150,6 | 30929702,13 | |
| aria di combustione (su base secca) Nm ³ /a | 782.050.484,05 | 0 | 1 | 0 | 0,01045 | 0 | 782050484,1 | | 8172427,558 | |
| totale input | | | | | | | 630660130,7 | 336710435,8 | 113410192,1 | 13718,4 |

Figura- 23 Bilancio di massa lato fumi-rifiuti

Relativamente al contenuto della Tabella precedente, si precisano i seguenti aspetti:

- il consumo di gas naturale da parte dei bruciatori ausiliari è quello relativo al periodo di funzionamento delle tre linee in tutte le condizioni di esercizio;
- il consumo d'acqua per il reintegro dei bagni di spegnimento scorie è stimato secondo le indicazioni delle linee guide.

d. Bilancio energia lato fumi

L'applicazione standard del metodo di calcolo indiretto ha come principale obiettivo la determinazione del contenuto energetico dei rifiuti inceneriti (termine Ew) che corrisponde, quantitativamente, alla differenza tra l'energia complessivamente associata ai flussi entranti ed uscenti al volume di controllo. Per chiudere il bilancio d'energia, infatti, è necessario quantificare l'energia associata a ciascun flusso materiale (ormai noti) tenendo in considerazione le diverse componenti energetiche che lo caratterizzano: l'eventuale contributo chimico (PCI) e quello legato al suo stato fisico (l'entalpia), quest'ultimo funzione della temperatura. Dunque, il bilancio di energia lato fumi è riassunto nella seguente tabella.

| Output | Quantita [um/a] | T [°C] | CPI [kJ/um*K] | entalpia [kJ/um] | PCI [MJ/um] | En.annua[TJ/a] | % di Ew |
|--|-----------------|--------|---------------|------------------|-------------|--------------------|---------|
| scorie t/a | 10288,8 | 80 | 1031,5 | 56732,5 | | 0,583709346 | |
| umidità delle scorie t/a | 3429,6 | 80 | 4185 | 230175 | -2442 | -8,3750832 | |
| ferrosi secchi senza incumbusti t/a | 143,28 | 80 | 446,4 | 24554,2 | | 0,003518126 | |
| incombusti si fondo griglia e ferrosi t/a | 258 | 80 | 829,9 | 45642,9 | 33000 | 8,514 | |
| polveri caldaia t/a | 676,94 | 450 | 840 | 357000 | | 0,24166758 | |
| incombusti nelle polveri caldaia t/a | 20 | 450 | 1205 | 512146,3 | 33000 | 0,66 | |
| polveri trascinate all'uscita della caldaia senza incombusti t/a | 800 | 205,3 | 840 | 151452 | | 0,1211616 | |
| incombusti trascinati all'uscita della caldaia t/a | 10 | 205,3 | 956 | 172533,4 | 33000 | 0,33 | |
| EAS Nm ³ /a uscita caldaia | 358619361,3 | 205,3 | 1,308 | 321,9228672 | | 115,447773 | |
| FAS Nm ³ /a uscita caldaia | 149158178,7 | 205,3 | 1,413 | 347,7652992 | | 51,87203864 | |
| VA Nm ³ /a uscita caldaia | 83486479,55 | 205,3 | 1,518 | 373,6077312 | | 31,19119421 | |
| incombusti gassosi (CO) t/a | 1,355 | | | | 10109 | 0,013697695 | |
| totale output | | | | | | 200,603677 | |
| Input | | | | | | | |
| energia scambiato tra lato fumi-rifiuti e lato acqua-vapore | | | | | | 608,1648479 | |
| aria primaria di combustione secca Nm ³ /a | 782.050.484,05 | 85 | 1,308 | 174,5 | | 136,4678095 | |
| umidità associata Nm ³ /a | 3573426,45 | 158,2 | 1,518 | 202,2 | | 0,722546828 | |
| aria secondaria di combustione Nm ³ /a | 91.205.087,00 | 26,1 | 1,308 | 1,4 | | 0,127687122 | |
| umidità associata Nm ³ /a | 952913 | 26,1 | 1,518 | 1,7 | | 0,001619952 | |
| aria di combustione aggiuntiva Nm ³ /a | 83518167 | 21,1 | 1,308 | -5,1 | | -0,425942652 | |
| umidità associata Nm ³ /a | 872765 | 21,1 | 1,518 | -5,9 | | -0,005149314 | |
| gas naturale ai bruciatori ausiliari Sm ³ /a | 382959 | | | | 34,751 | 13,30820821 | |
| vapore soffiatori fuliggine t/a | 1119,975694 | | | | 185,35 | 0,207587495 | |
| soluzione ammoniacale | 481,701 | | | | 1717 | 0,827080617 | |
| acqua di iniezione ammoniacale M ³ /a | 2729,639 | | | | -2442 | -6,665778438 | |
| acqua di reintegro bagni di spegnimento scorie t/a | 6859,2 | | | | -2442 | -16,7501664 | |
| totale input | | | | | | 936,5840278 | |
| rifiuti, t/a - Ew TJ/a | 69044,84 | | | | | 713,9009402 | |

Figura- 24 Bilancio di energia lato fumi-rifiuti

$$EW = 713.900,940 \text{ GJ/a}$$

Dopo aver determinato il termine Ew si può risalire al PCI medio dei tutti i rifiuti trattati nell'anno 2019, come in seguito:

$$PCI = \frac{Ew}{\text{tonnellate rifiuti processati anno 2019}}$$

$$PCI = 0,01034 \text{ [TJ/a]} = 10339,670 \text{ [kJ/kg]} = 2471,241 \text{ [Kcal/kg]}$$

e. Calcolo del fattore di correzione climatica CCF

Il fattore *CCF* (“*Climate Correction Factor*”) è definito sulla base della media di lungo periodo dei gradi giorno (*HDD* = “*Heating Degrees Day*” - secondo la definizione Eurostat) della località considerata, in modo differenziato in base alla data d'autorizzazione ed entrata in esercizio dell'installazione, per lungo periodo si intende un arco d'anni non inferiore a 20. L'impianto in considerazione è autorizzato prima del 1° settembre 2015, quindi si applica la formula del **EU1**, ovvero;

$$CCF = 1 \text{ se } HDD \geq 3.350$$

$$CCF = 1,25 \text{ se } HDD \leq 2.150$$

$$CCF = -(0,25/1.200) \times HDD + 1,698 \text{ quando } 2.150 < HDD < 3.350$$

| | anno | HDDanno da dati |
|----|------|-----------------|
| 20 | 2000 | 1483,7 |
| 19 | 2001 | 2030,7 |
| 18 | 2002 | 1731,7 |
| 17 | 2003 | 1361,05 |
| 16 | 2004 | 1728,35 |
| 15 | 2005 | 1159,6 |
| 14 | 2006 | 1786,7 |
| 13 | 2007 | 1698,75 |
| 12 | 2008 | 1785 |
| 11 | 2009 | 1939,45 |
| 10 | 2010 | 2184,2 |
| 9 | 2011 | 1973,2 |
| 8 | 2012 | 2052,1 |
| 7 | 2013 | 2148,4 |
| 6 | 2014 | 1607,3 |
| 5 | 2015 | 1896 |
| 4 | 2016 | 1903 |
| 3 | 2017 | 1935 |
| 2 | 2018 | 1892,4 |
| 1 | 2019 | 1823,5 |
| | | 1714,83 |

Figura- 25 HDD relativo agli ultimi 20 anni

$$HDD \text{ medio} = \frac{\sum_1^{20} HDD_i}{20} = 1.714,83$$

Poiché $HDD_{\text{medio}} 1.714,83 \text{ } ^\circ\text{C} < 2.150$ si risulta che **CCF = 1.25**

Calcolo dell'indice R1

La seguente tabella riassuntiva contiene tutte le principali grandezze d'interesse che concorrono al calcolo dell'indice R1 e che costituiranno i valori "nominali", o di riferimento, per l'analisi condotta.

| Input energia al sistema | | |
|---|------------|-----------------|
| Parametri | Valore | Unità di misura |
| Ew: Energia contenuta nei rifiuti trattati | 713.900,94 | GJ/a |
| Ef: Energia importata per la produzione di vapore | 5.737,68 | GJ/a |
| EI: Altra energia importata | 14.990,09 | GJ/a |
| Output del sistema | | |
| Ep: Energia prodotta | 448.285,44 | GJ/a |
| Coefficiente correttivo climatico | | |
| CCF | 1,25 | |

Figura- 26 Questa tabella riporta tutte le variabili entranti nel calcolo dell'indice di efficienza R1

Di conseguenza il calcolo dell'indice di efficienza risulta essere:

$$R1 = \frac{Ep - (Ef + EI)}{0,97 \times (Ew + Ef)} \times CCF = 0,766$$

In questa parte di tesi è stata considerata la metodologia per la valutazione dell'indice R1 sviluppata Dalla Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile della Regione Lombardia in collaborazione con il Centro Studi MatER⁴.

Tale metodologia segue le linee guide europee⁵ per la definizione dell'indice di recupero energetico R1. La applicazione di tale metodo all'impianto di termovalorizzazione di Sesto San Giovanni è stata condotta sfruttando la metodologia di calcolo indiretta per la determinazione del PCI dei rifiuti trattati, identificando tutti i flussi materiali ed energetici d'ingresso e uscita al volume di controllo e le diverse grandezze cumulate, conducendo in tal modo alla determinazione dell'indice R1 e del PCI dei rifiuti trattati.

Valutando il risultato dell'indice di recupero energetico R1 ottenuto per l'anno 2019 nel rispetto della nota all'Allegato II della WFD, che è stata introdotta con lo scopo di discriminare quando l'incenerimento dei rifiuti urbani è classificabile come operazione

⁴ "Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell'Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani." Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017. <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/imprese/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>.

⁵ "DIRETTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO Del 19 Novembre 2008 Relativa Ai Rifiuti e Che Abroga Alcune Direttive." Gazzetta Ufficiale Dell'IT 'Unione Europea, 22 novembre, 2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>.

di recupero energetico (R1) e quando, invece, come operazione di smaltimento (D10), si può concludere questa parte affermando che, l'operazione di incenerimento dei rifiuti urbani relativa all'impianto di CORE a Sesto San Giovanni è classificabile come operazione di recupero energetico (R1) dato che l'indice di efficienza energetica relativo all'impianto è maggiore di 0,60. Quindi, l'inceneritore di CORE a Sesto San Giovanni può essere definito come un termovalorizzatore per l'anno 2019.

4. REVAMPING DELL'IMPIANTO NEL CONTESTO DELLA ECONOMIA CIRCOLARE

Definizione e principi di una economia circolare

Nell'Unione Europea si producono ogni anno più di 2,5 miliardi di tonnellate di rifiuti.⁶ L'UE sta aggiornando la legislazione sulla gestione dei rifiuti per promuovere la transizione verso un'economia circolare, in alternativa all'attuale modello economico lineare. L'economia circolare è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile. In questo modo si estende il ciclo di vita dei prodotti, contribuendo a ridurre i rifiuti al minimo. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore.

I principi dell'economia circolare contrastano con il tradizionale modello economico lineare, fondato invece sul tipico schema “estrarre, produrre, utilizzare e gettare”. Il modello economico tradizionale dipende dalla disponibilità di grandi quantità di materiali ed energia facilmente reperibili e a basso prezzo.

Il Parlamento europeo chiede l'adozione di misure anche contro l'obsolescenza programmata dei prodotti, strategia propria del modello economico lineare.

Secondo la definizione della Ellen MacArthur Foundation⁷, *“l'economia circolare è un termine generico per definire un'economia pensata per potersi rigenerare da sola. In una economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati ad essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera”*.

L'economia circolare è dunque un sistema economico pianificato per riutilizzare i materiali in successivi cicli produttivi, riducendo al massimo gli sprechi.

⁶ “Economia Circolare: Definizione, Importanza e Vantaggi: Attualità: Parlamento Europeo,” Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi | Attualità | Parlamento europeo, 10 Aprile, 2018, <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>)

⁷“Circular Economy - UK, USA, Europe, Asia & South America - The Ellen MacArthur Foundation,” Ellen MacArthur Foundation, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>)

Il modello economico lineare ‘take-make-dispose’ si basa sull’accessibilità di grandi quantità di risorse ed energia ed è sempre meno adatto alla realtà in cui ci troviamo ad operare. Le iniziative a sostegno dell’efficienza – che lavorano per la riduzione delle risorse e dell’energia fossile consumata per unità di produzione – da sole possono ritardare la crisi del modello economico.

Si pone quindi come necessaria la transizione dal modello lineare ad un modello circolare, che nella considerazione di tutte le fasi – dalla progettazione, alla produzione, al consumo, fino alla destinazione a fine vita – sappia cogliere ogni opportunità di limitare l’apporto di materia ed energia in ingresso e di minimizzare scarti e perdite, ponendo attenzione alla prevenzione delle esternalità ambientali negative e alla realizzazione di nuovo valore sociale e territoriale.

Quindi, si tratta di un ripensamento complessivo e radicale rispetto al modello produttivo classico, basato sull’**ipersfruttamento delle risorse naturali** e orientato all’unico obiettivo della massimizzazione dei profitti tramite la riduzione dei costi di produzione. Adottare un approccio circolare significa rivedere tutte le fasi della produzione e prestare attenzione all’intera filiera coinvolta nel ciclo produttivo. Questa attenzione passa per il rispetto di alcuni principi di base.

Il nuovo paradigma dell’Economia Circolare valorizza il principio dell’efficienza, non solo per le scelte energetiche, ma anche nell’uso o riuso razionale e appropriato di tutte le risorse durante tutte le fasi del ciclo produttivo: alla progettazione in chiave sostenibile e circolare del prodotto (durabilità, parti modulari e scomponibili, biodegradabilità, produzione con risorse rinnovabili e non tossiche) a monte e a una gestione corretta dei rifiuti a valle; alla sostituzione di materie prime vergini con materie prime seconde e di materie prime provenienti da fonti fossili con biomateriali; al controllo e alla gestione dei flussi di ritorno dei prodotti a fine vita e dei resi; alla scelta e alla creazione di una filiera sostenibile.

Nella sua applicazione, l’Economia Circolare presta particolare attenzione anche ai temi della verifica degli impatti socio-economico-ambientali e della valorizzazione dei benefici che le attività economiche possono apportare ai territori in cui si collocano e alle comunità che coinvolgono. Questo viene fatto attraverso l’applicazione del principio dell’inclusione sociale dei soggetti in condizioni di difficoltà, attraverso la comunicazione dei dati ambientali e la disseminazione dei risultati ai fini di creare maggiore

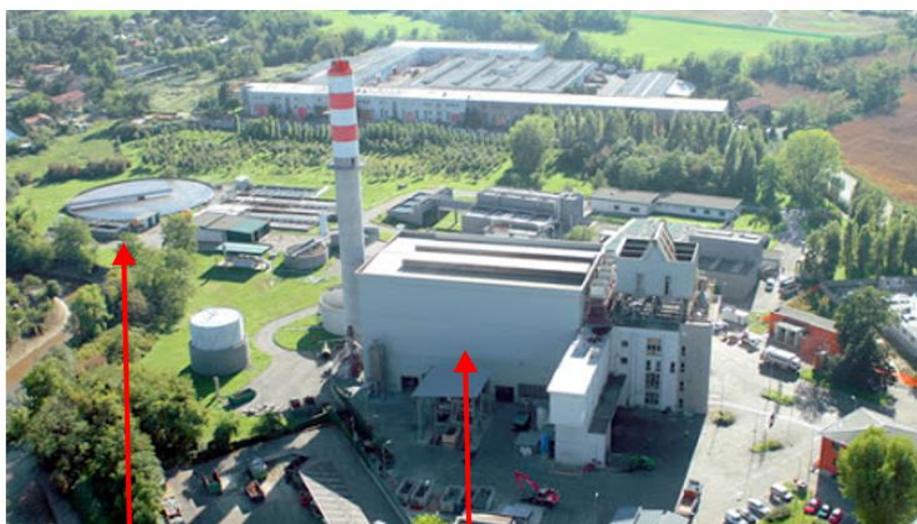
consapevolezza e condivisione del valore delle scelte operate dai singoli, anche in riferimento alle ricadute sui beni comuni.

Il revamping del termovalorizzatore in una Biopiattaforma nel contesto della economia circolare

Il revamping del termovalorizzatore in una Biopiattaforma è un progetto promosso dal Gruppo CAP e CORE. Il Gruppo CAP è un consorzio che gestisce il servizio idrico integrato nella Città Metropolitana di Milano e in diversi comuni delle province di Monza e Brianza, Pavia, Varese, Como.

La simbiosi tra l'attuale termovalorizzatore e il depuratore dell'acqua che si trova a breve distanza dal termo valorizzatore, permetterà di convertire l'area, situata in via Manin a Sesto San Giovanni, in un polo green e altamente innovativo. La nuova struttura prevedrà due linee produttive:

- la prima dedicata al trattamento dei fanghi derivanti dalla depurazione delle acque per la produzione di energia termica e fertilizzanti;
- la seconda di digestione anaerobica per il trattamento dei rifiuti umidi (FORSU) per la produzione di biometano.



il depuratore dell'acqua di CAP

Il termovalorizzatore di CORE

Figura- 27 Gli impianti attuali

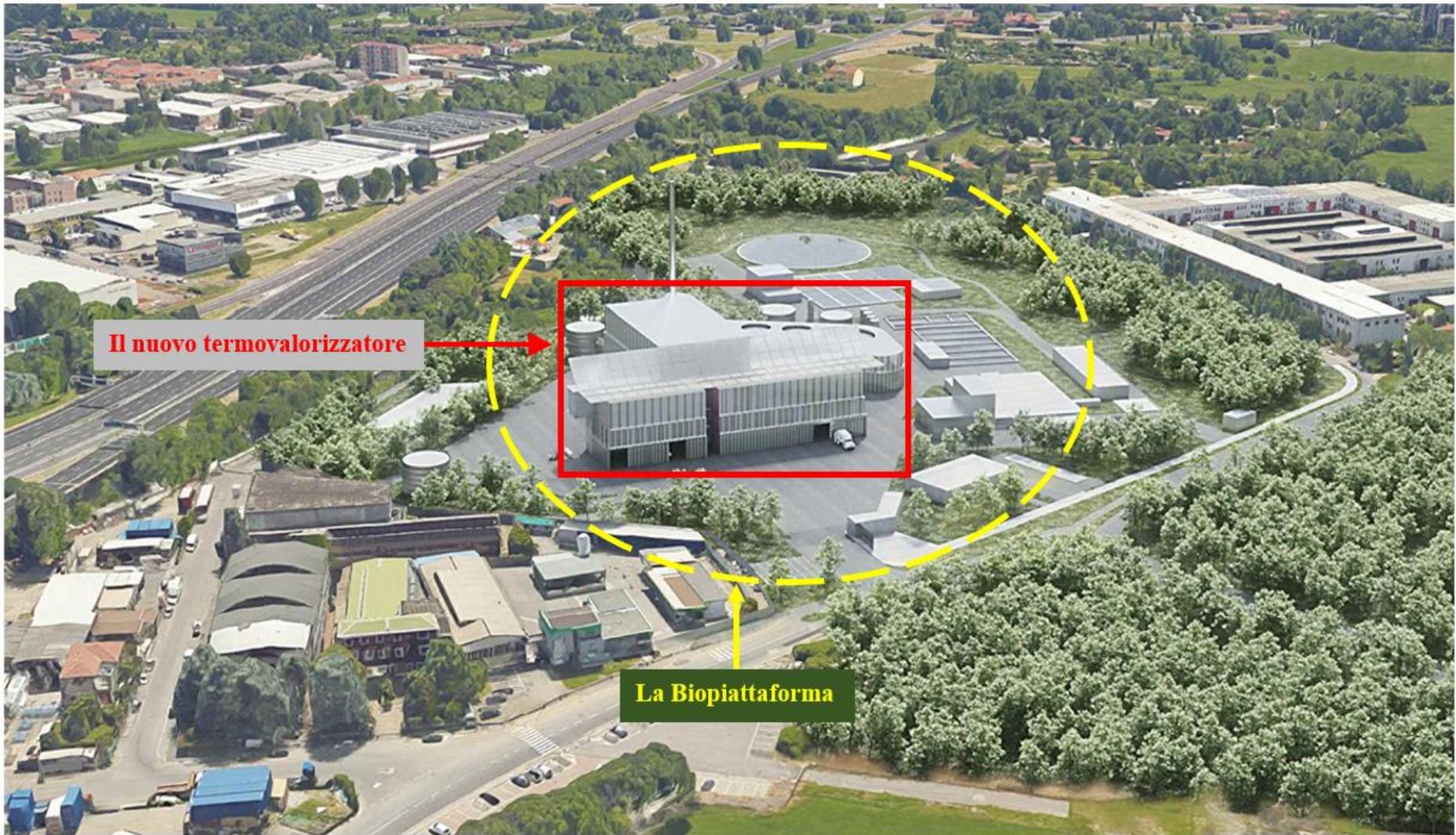


Figura- 28 Il nuovo progetto della Biopiattaforma

La nuova Biopiattaforma ed il recupero del fosforo

La futura Biopiattaforma sarà parte di un anello di una serie di impianti e processi che tra di loro chiuderanno il giro della economia circolare, permettendo di recuperare energia dai fanghi e nello stesso tempo, recuperando anche delle materie prime.

La Biopiattaforma offrirà la possibilità di recuperare il fosforo dalle ceneri in uscita dal termovalorizzatore. Tali ceneri sono il risultato della combustione dei fanghi provenienti dal depuratore dell'acqua. Questa operazione permetterà di recuperare il fosforo per poi valorizzarlo di nuovo nella filiera agricola. Tale processo permetterà di recuperare la materia prima che andava perduta in discariche.

Il fosforo è, infatti, materia prima, critica per l'Europa, mostrando una dipendenza dalle importazioni dai Paesi extraeuropei quasi totale, questo perché la risorsa primaria è fortemente localizzata in aree specifiche del pianeta. “L'Europa nord-occidentale importa l'88% del fabbisogno di fosforo, **circa 6,37 milioni di tonnellate per anno** (Eurostat COMEXT database, 2016), da nazioni non appartenenti all'UE. Gli equilibri commerciali sono quindi fortemente influenzati dalla dipendenza da fonti di energia e materiali fossili ovvero dall'aspetto geopolitico. **L'uso finale della risorsa è prettamente quello di fertilizzante minerale per l'agricoltura**”⁸.

Panoramica generale sulla situazione del recupero del fosforo in Europa

Dallo studio eseguito da van Dijk et al. (2016), si può ricavare un bilancio generale europeo del fosforo riguardo ai dati dell'anno 2005 rispetto al 2016, dal quale si può osservare l'aumento dei consumi di fosforo (P). Nella tabella seguente sono riportati i quantitativi complessivi di fosforo considerato come perduto a valle dei processi di produzione agricola, animale, cibo, industriale e nel consumo umano finale che costituiscono il ciclo antropico. I quantitativi sono riportati in funzione dell'output finale dei diversi settori di consumo.

⁸ Roberto Canziani and Roberto Di Cosmo, “STATO DELL'ARTE E POTENZIALITÀ DELLE TECNOLOGIE DI RECUPERO DEL FOSFORO DAI FANGHI DI DEPURAZIONE,” *Ingegneria Dell'Ambiente* 5, no. 3 (Marzo 2018): pp. 149-170, doi.org/10.32024/ida.v5i3.p01, p.150

| Settore di consumo | % P perso (van Dijk et al., 2016) | Quantitativo di P perso (Mt/anno) | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| | | 2005 | 2016 ^a |
| Fanghi di depurazione | 34,6 | 0,51 | 1,21 |
| Effluente impianti di depurazione | 5,7 | 0,08 | 0,20 |
| Impianti di depurazione decentralizzati | 5,5 | 0,08 | 0,19 |
| Acque reflue non collettate | 4,9 | 0,07 | 0,17 |
| Acque reflue municipali non trattate | 2,5 | 0,04 | 0,09 |
| Acque reflue decentralizzate non trattate | 1,6 | 0,02 | 0,06 |
| Scarti alimentari (industriali e urbani) | 26,8 | 0,39 | 0,94 |
| Scarti di cartiera, non adatti all'agricoltura e lignei, altre attività industriali, ruscellamento | 6,0 | 0,09 | 0,21 |
| Scarti di cibo per animali, deiezioni animali, decessi animali e umani | 12,4 | 0,18 | 0,43 |
| P totale perso | | 1,46 | 3,50 |
| P totale in ingresso | | 2,39 | 6,37 |
| % P perso nel ciclo antropico | | 61% | 55% |

^a Per il 2016 i calcoli sono stati effettuati considerando le percentuali di P perso riportate da van Dijk et al. (2016), e considerando una frazione media complessiva di P perso nel ciclo antropico pari al 55%, minore rispetto a quella del 2005 in quanto si ipotizza un sostanziale miglioramento della gestione del P nei processi produttivi (es: il minor uso di P per i detersivi).

Figura- 29 Quantitativi di fosforo perso per settore di consumo estrapolati dal bilancio europeo del fosforo proposto da van Dijk et al. (2016)

(Roberto Canziani and Roberto Di Cosmo, "STATO DELL'ARTE E POTENZIALITÀ DELLE TECNOLOGIE DI RECUPERO DEL FOSFORO DAI FANGHI DI DEPURAZIONE," *Ingegneria Dell'Ambiente* 5, no. 3 (Marzo 2018): pp. 149-170, doi.org/10.32024/ida.v5i3.p01, p. 151)

Se in via del tutto ipotetica si riportassero le percentuali di ripartizione del fosforo perduto per settore di consumo del 2005 all'anno 2016 secondo van Dijk et al. (2016) e, si considerasse l'ipotesi di una diminuzione del 5% del quantitativo di fosforo perduto all'interno del ciclo dei processi antropici, così come nella tabella precedente, sarebbe possibile stimare in circa **116.500 t P/anno perduto, di cui 38.400 t P/anno sono riferibili al P disperso nei fanghi e nell'effluente dei processi di depurazione**. Il calcolo porterebbe a stimare che **la quantità di fosforo recuperabile dai processi di trattamento delle acque reflue pari al 17% del quantitativo annuo acquistato**.

Indexmundi (www.indexmundi.com) riporta l'andamento dei prezzi dei fertilizzanti nel corso degli ultimi 20 anni. Occorre puntualizzare come il costo sia riferito a standard specifici per ogni tipologia di materia prima.

| Tipologia di fertilizzante | | Costo specifico (€/t) | | %P ₂ O ₅ |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------|------|--------------------------------|
| | | 2005 | 2017 | |
| TSP | Superfosfato concentrato | 167 | 230 | 45 |
| DAP | Fosfato diammonico | 210 | 320* | 47 |
| - | Rocce fosfatice | 35 | 67 | 31 |

** Il costo del fosfato diammonico aggiornato al marzo 2018 e riportato da Agribusiness (2018) è pari a 324 €/t, escluse le spese di trasporto via nave (22-24 €/t) per DAP nord africano.*

Figura- 31 Costo specifico e percentuale di P₂O₅ per il triplo superfosfato (TSP), fosfato di-ammonico (DAP) e rocce fosfatice (FAO, 2017)
(Ibid.)

| Fase acquosa | | Fanghi | | Ceneri | |
|--------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|--|
| Sezione | Processo | Sezione | Processo | Sezione | Processo |
| 1 | Precipitazione | 3.1 | Lisciviazione chimica a umido | 4 | Termo-chimico a base di cloruri (es: MgCl ₂) |
| 1 | Scambio ionico | 3.2 | Ossidazione a umido | | Termo-chimico a base di sali di sodio (es: Na ₂ SO ₄) |
| 2.1; 2.2 | Precipitazione/ Cristallizzazione | 3.2 | Ossidazione a umido super critica | | Estrazione chimica, per lisciviazione acida delle ceneri |
| 2.2 | Cristallizzazione | 3.3 | Gassificazione con fusione dei fanghi | | |
| | | 3.3 | Carbonizzazione idro-termica | | |

Figura- 30 Processi di recupero del fosforo applicabili a diverse matrici, in diverse sezioni di un impianto di depurazione.

(Ivi, p.153)

5. IL NUOVO TERMOVALORIZZATORE PER L'INCERNIMENTO DEI FANGHI

Questo capitolo ha lo scopo di fornire una descrizione dell'impianto destinato alla valorizzazione termica dei fanghi di depurazione, che sarà realizzata all'interno del più vasto progetto di costruzione della Biopiattaforma di Sesto San Giovanni. In particolare, si descrive l'impianto di trattamento termico dei fanghi di depurazione prodotti nei depuratori gestiti da CAP.

La futura biopiattaforma di Sesto S.G. dovrà rispondere alle esigenze di CAP relative ad un trattamento centralizzato di tutti i fanghi di depurazione prodotti nei numerosi impianti in gestione.

All'interno di questo progetto saranno previsti in particolare la riconversione di alcuni impianti esistenti:

- trasformazione dell'attuale termovalorizzatore di Sesto San Giovanni ad impianto dedicato alla valorizzazione termica dei fanghi da depurazione;
- trasformazione dei digestori anaerobici del depuratore di Sesto San Giovanni in digestori della FORSU.

Lo sfruttamento dagli impianti esistenti e futuri permetterà una soluzione di trattamento integrata, tecnicamente ed economicamente sostenibile.

Dati di dimensionamento

Tutti i dati relativi al dimensionamento riportati in questo paragrafo fanno riferimento al (doc. n. 25080-120-001, Rev. 4, del 26.01.2018), sviluppato durante il Progetto Preliminare. Per la futura linea di valorizzazione termica dei fanghi di depurazione sono confermati i dati dimensionamento già adottati in fase di progettazione preliminare.

La capacità complessiva di trattamento sarà di un valore pari a **65.000 t/a**. Di cui, **fanghi essiccati 3.000 t/a** con un **tenere di secco** pari al **90%**, **fanghi disidratati** di una quantità pari a **62.000 t/a** con un **tenore di secco** pari al **22,8%**.

Architettura complessiva dei processi di trattamento

Il processo di valorizzazione termica dei fanghi prevede un trattamento di preessiccamento dei fanghi disidratati prima della loro introduzione nel forno. Questo trattamento di preessiccamento ha lo scopo di ridurre il contenuto di acqua nei fanghi introdotti nel forno, fino al punto di garantire un'adeguata condizione di autotermia del

processo di combustione dei fanghi stessi. La suddetta condizione di autotermia si raggiunge nel momento in cui il grado di siccità dei fanghi complessivamente introdotti nel forno è tale, da permettere la combustione degli stessi senza dover ricorrere all'apporto di sorgenti termiche esterne (es. bruciatore a metano).

Il trattamento di preessiccamento dei fanghi avverrà tramite un essiccatore installato che tratterà i fanghi disidratati alla bocca del forno, ovvero prima dell'introduzione degli stessi nel forno di combustione. L'essiccatore utilizzerà come sorgente di calore il vapore a bassa pressione scaricato in contropressione dalla turbina a vapore. L'utilizzo di questo vapore per il trattamento dei fanghi disidratati andrà ovviamente a discapito della disponibilità di vapore da dedicare alla cessione di calore per il teleriscaldamento.

Il trattamento di pre-essiccamento fanghi alla bocca del forno permette di conseguire la seguente configurazione di esercizio:

- azzeramento del consumo di gas metano per il sostegno della combustione;
- riduzione dell'umidità contenuta nei fumi di combustione emessi al camino, con conseguente diminuzione del rischio di formazione del "pennacchio" di vapore;
- stabilizzazione delle condizioni di combustione dei fanghi all'interno del forno, in quanto il trattamento di preessiccamento dei fanghi rende più omogeneo e stabile il "combustibile" introdotto nel forno, svincolandolo per esempio dalle variazioni stagionali del tenore di secco dei fanghi disidratati provenienti dai depuratori.

L'essiccatore verrà installato in un locale tecnico ad esso dedicato e posto nelle immediate vicinanze del forno di valorizzazione termica.

Relativamente al teleriscaldamento, per quanto una parte rilevante di vapore scaricato dalla turbina venga utilizzato per il preessiccamento dei fanghi, resta comunque un contributo interessante da cedere alla rete di teleriscaldamento.

Descrizione della sezione del nuovo termovalorizzatore interessate al processo

Il futuro impianto di valorizzazione termica sarà composto dai seguenti sottosistemi:

- conferimento e stoccaggio di fanghi disidratati ed essiccati;
- alimentazione dei fanghi disidratati;
- preessiccamento dei fanghi disidratati;
- miscelatore fanghi;
- combustione;
- trattamento fumi;
- recupero energetico.

a) Conferimento e stoccaggio di fanghi disidratati ed essiccati

Presso il sito di Sesto S.G. è previsto il conferimento sia di fanghi disidratati, provenienti direttamente dai diversi depuratori gestiti da CAP, che di fanghi essiccati, provenienti altri impianti di essiccamento.

Per il conferimento e lo stoccaggio dei **fanghi disidratati** verrà utilizzata una porzione di una delle due fosse rifiuti esistenti. Questa fossa dispone di un volume di accumulo complessivo pari a circa 1000 m³. Questo volume di accumulo potrebbe garantire un'autonomia di funzionamento del futuro forno pari a circa 5 giorni di funzionamento in continuo, anche in assenza di conferimenti dall'esterno.

Invece, per il conferimento dei **fanghi essiccati** provenienti da essiccatori esterni sarà previsto un sistema di stoccaggio con un silos dedicato, della capienza di circa 110 m³ geometrici, per un volume utile complessivo di circa 100 m³.

b) Alimentazione dei fanghi disidratati

Il fango disidratato, contenuto nella fossa di accumulo, verrà prelevato da un carroponete dedicato e dotato di benna bivalve (carroponete ridonato, 2 unità). La benna scaricherà il fango all'interno di due silos di ricezione. Sul fondo dei silos di ricezione è previsto un telaio mobile, che, muovendosi in maniera alternata, convoglierà il fango disidratato verso una coclea di estrazione, situata centralmente sotto il silo di ricezione stesso. L'azionamento del telaio mobile sarà di tipo idraulico.

La suddetta coclea trasporterà il fango disidratato verso la pompa di alimentazione dei fanghi verso il preessiccatore. Prima di arrivare alla pompa è stato previsto un sistema di rimozione di eventuali materiali estranei ai fanghi (pezzi di ferro, pietre, ecc.), che,

qualora raggiunta la pompa, potrebbero compromettere il buon funzionamento della stessa, bloccandola.

La figura seguente riassume la sezione di alimentazione dei fanghi.

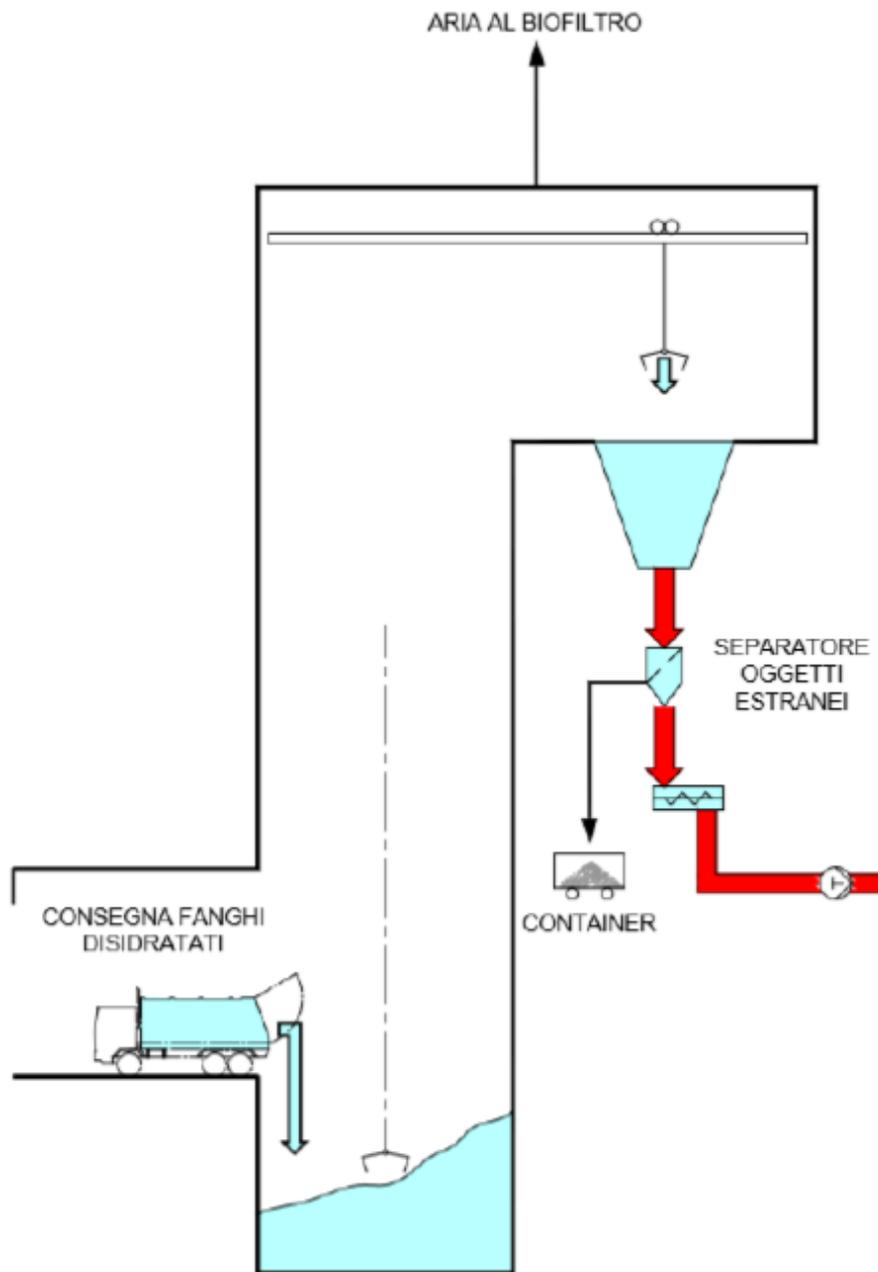


Figura- 32 Sezione di alimentazione dei fanghi disidratati

c) Preessiccamento dei fanghi disidratati

Per assicurare una combustione di tipo **autotermico**, ovvero affinché la combustione dei fanghi si sostenga da sola senza l'apporto di ulteriore calore da una fonte esterna (es. bruciatore a metano), è necessario preessiccare **i fanghi disidratati in ingresso all'impianto, che hanno un tenore di sostanza secca normalmente compreso tra il 22% ed il 27%, fino ad un tenore di secco compreso tra il 35% ed il 40%**, a seconda delle caratteristiche chimiche del fango stesso.

Nel caso della futura linea fanghi di Sesto S.G., è stato considerato un tenore di **sostanza secca in entrata alla fase di preessiccamento del 22.8% ed in uscita del 33.8 %**. Considerando inoltre il successivo step di miscelazione con i fanghi essiccati (contraddistinti da una percentuale di **T.S. del 90%**), **il tenore di secco in entrata al forno, in grado di mantenere la combustione senza apporto di calore da fonte esterna, sarà del 37.6%**. Questi valori sono stati stimati tenendo conto del PCI del fango. Per questo processo di pre-essiccamento si utilizzano normalmente degli **essiccatori del tipo a film sottile oppure a dischi**. In accordo a questa tecnologia un sottile strato di fango disidratato viene a contatto con una parete metallica molto calda (es. riscaldata sull'altro lato da vapore con una temperatura di 170°C e 6 bar, oppure olio diatermico). In questo modo una quota parte di acqua ancora contenuta nei fanghi disidratati evapora molto rapidamente ed il tempo di contatto del fango con la parete calda determina la percentuale di acqua evaporata.

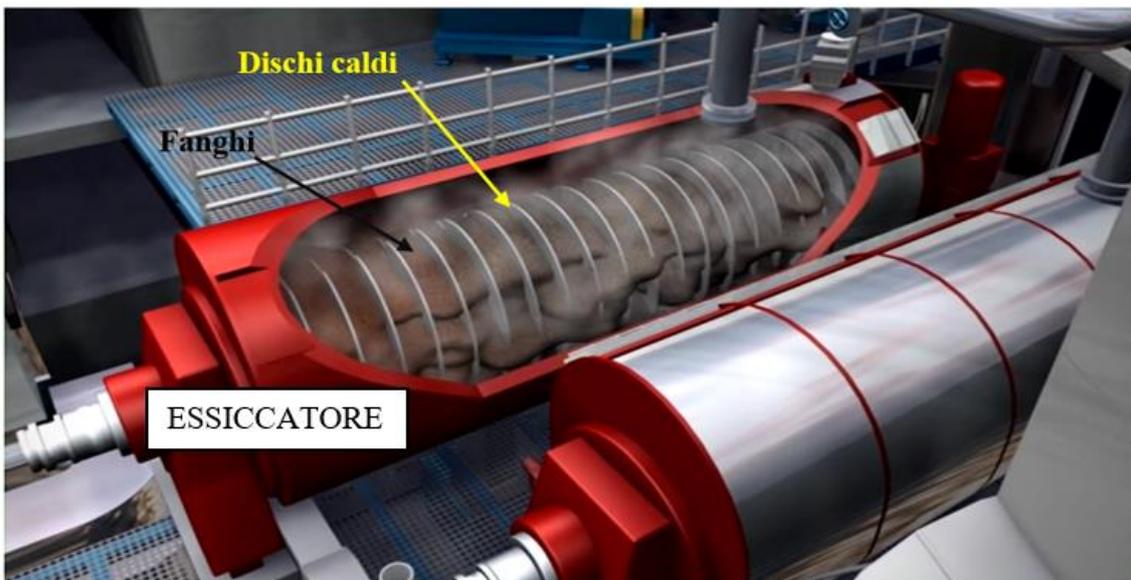


Figura- 33 Essiccatore di fanghi a dischi

d) Miscelatore fanghi

I fanghi conferiti all'impianto disidratati, una volta subito il processo di preessiccamento, verranno quindi miscelati insieme a quelli direttamente ricevuti sotto forma di essiccati, **i primi con tenore di secco pari a 33.8%, i secondi pari a 90%**. Dal miscelatore il **fango miscelato, con tenore di secco complessivo di 37.6%**, verrà trasportato per mezzo di una coclea direttamente nel forno.

e) Combustione

Per il sistema di combustione del futuro impianto di valorizzazione termica dei fanghi è stato scelto un forno a letto fluido. Si tratta di forni verticali in acciaio, a sezione tipicamente circolare e, di regola, rivestiti internamente da materiale refrattario.

All'interno del forno è presente uno strato di sabbia minerale che, grazie all'insufflazione di aria di fluidizzazione, forma un letto fluido ad elevata temperatura (750÷850°C). Mediante un ventilatore la sabbia viene mantenuta in sospensione attraverso l'insufflazione di aria a partire dalla base del forno. L'apporto di aria primaria, 11.399 nm³/ora, sarà sufficiente a mantenere il letto sabbioso in sospensione e contemporaneamente apportare il quantitativo di ossigeno necessario alla combustione dei fanghi. La parte superiore del forno costituisce la camera di post-combustione, nella quale, in condizioni altamente turbolente, ha luogo la completa ossidazione delle componenti organiche. Qui verrà insufflata l'aria secondaria, 1.267 Nm³/ora. **In definitiva l'aria insufflata nel forno sarà per il 90% aria primaria immessa ad una temperatura di 290 °C e per il restante 10% aria secondaria ad una temperatura di 50 °C.** La geometria della camera della zona di **postcombustione** a valle dell'ultima immissione d'aria comburente (aria secondaria) è dimensionata in maniera da garantire il rispetto di un **tempo di residenza minimo dei fumi di 2 secondi ad una temperatura superiore a 850 °C** per evitare il più possibile la formazione delle diossine (figura 27). La temperatura nel forno è uniforme ed è controllata sulla base della temperatura dei fumi che abbandonano la camera di post-combustione. Nel caso in cui la temperatura non dovesse essere sufficientemente elevata, vengono azionati i bruciatori ausiliari alimentati con gas naturale, che si troveranno nella parte inferiore del forno. Il sostegno alla combustione da parte dei suddetti bruciatori è necessario in maniera continuativa nel caso di combustione di fanghi a basso contenuto di sostanza secca ($SS \leq 30\div 35\%$).

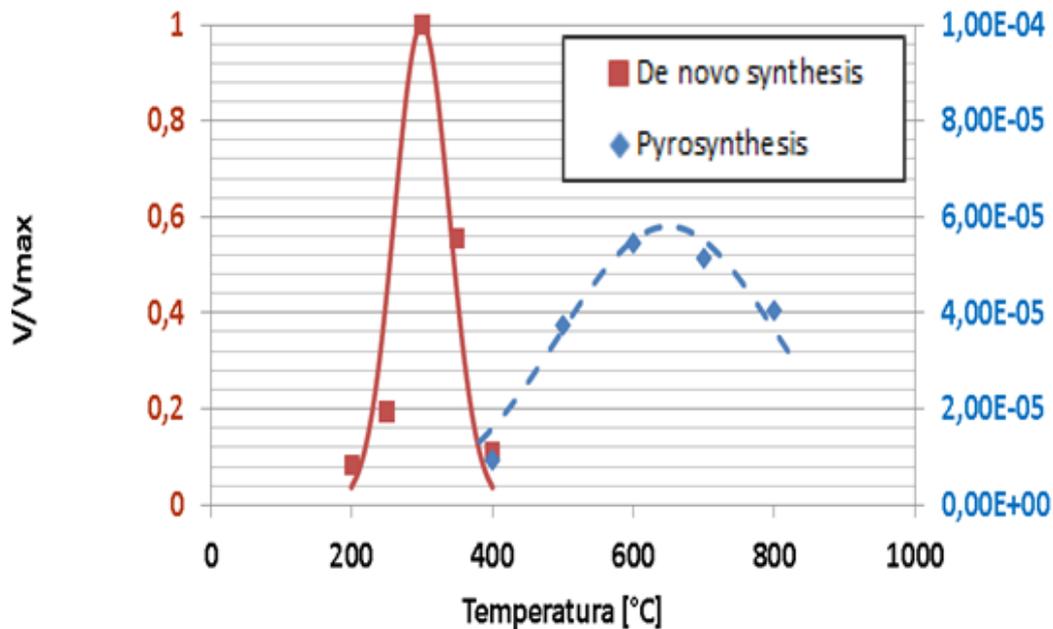


Figura- 34 Velocità di formazione delle diossine in funzione della temperatura

La camera di postcombustione sarà inoltre dotata di un sistema di raffreddamento d'emergenza in grado di impedirne il surriscaldamento mediante iniezione mirata di acqua industriale tramite apposite lance d'iniezione.

Una volta abbandonata la camera di post-combustione, i fumi vengono raffreddati in una **prima sezione di recupero energetico, destinata al preriscaldamento dell'aria di combustione**. In questa fase l'aria primaria verrà scaldata da 150° a 290°C e successivamente immessa nel forno.

Dopo questa prima sezione di recupero energetico, connessa con il funzionamento del forno stesso, il calore sensibile ancora contenuto nei fumi di combustione viene recuperato in una **seconda sezione di recupero termico, dove il calore viene utilizzato per produrre vapore surriscaldato**.

Dopo la sezione di recupero termico i fumi di combustione vengono avviati al relativo sistema di depurazione. Nel seguente paragrafo si riporta una descrizione del forno.

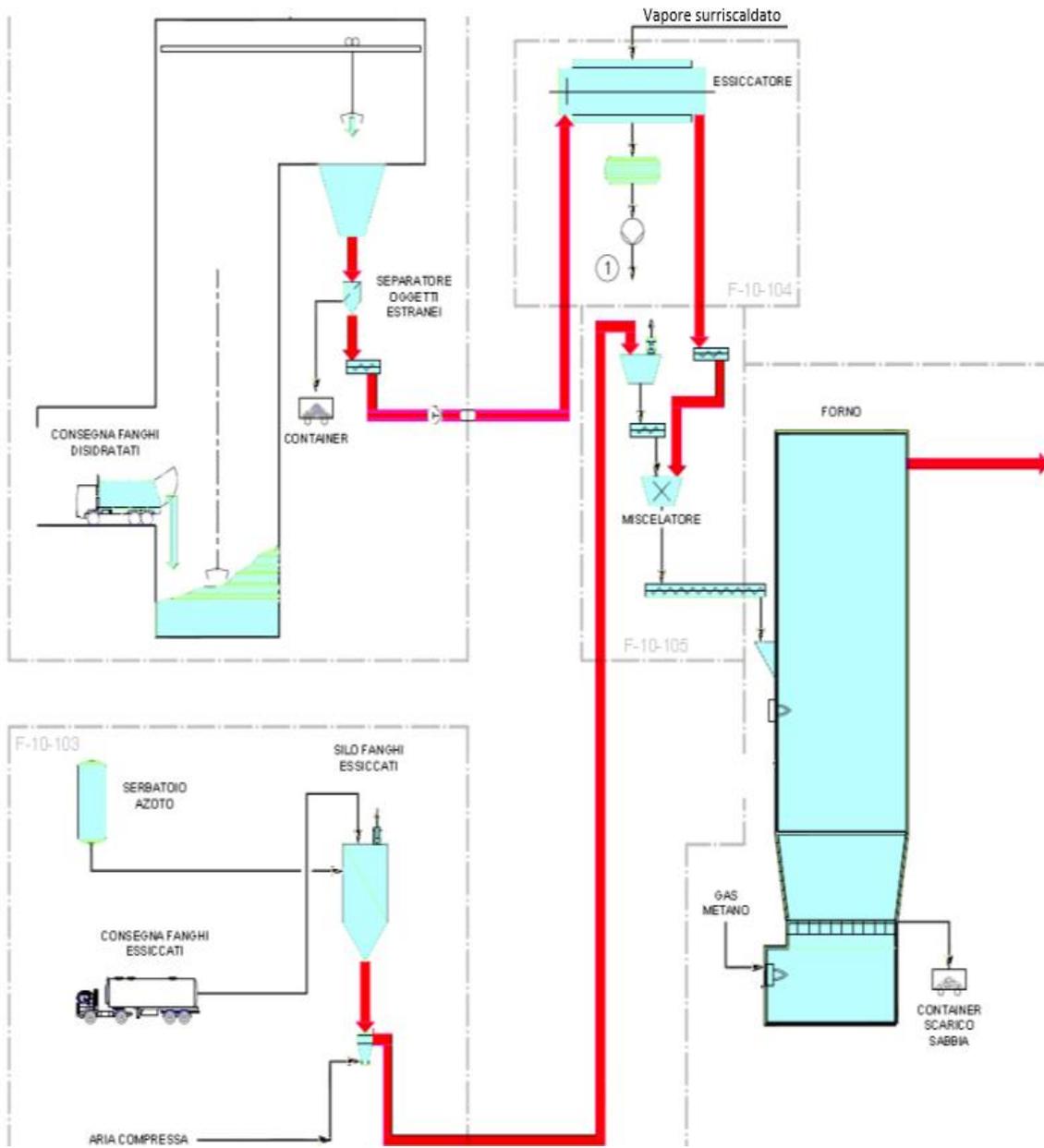


Figura- 35 In questa figura si può vedere le sezioni di stoccaggio, essiccamento, miscelatore fanghi, forno

1. Forno a letto fluido

In questo tipo di forno, il letto sabbioso si produce nella parte inferiore del forno, ovvero alla base della camera di combustione. Il letto sabbioso è sostenuto dall'insufflazione di aria di fluidizzazione/combustione ad una velocità limitata e compresa fra 1 e 3 m/s.

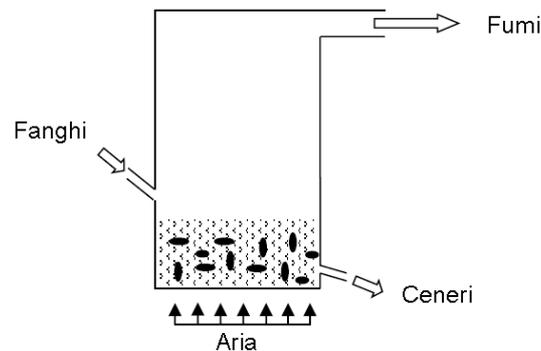


Figura- 36 Schema di principio di un letto a fluido bollente

I fanghi vengono alimentati come in figura al di sopra del letto sabbioso, mentre le ceneri pesanti e i residui di combustione vengono estratti dalla parte inferiore. I fumi abbandonano il forno per raggiungere le sezioni di recupero termico ed i successivi stadi di depurazione. Inoltre, è inevitabile che una ridotta frazione di sabbia viene trascinata con i fumi all'esterno del forno. La futura linea di trattamento termico sarà dotata di un silo di stoccaggio della sabbia per il periodico reintegro. Tipicamente il letto di sabbia è alto circa 0.8 m, mentre il fondo del forno è rivestito in materiale refrattario. Attraverso

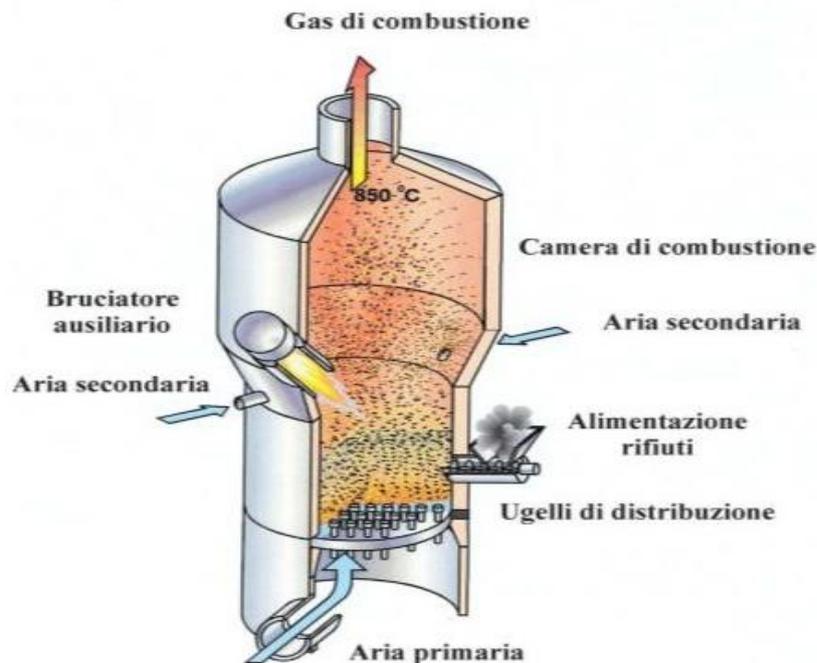


Figura- 37 Lo schema di forno a letto fluido bollente applicato a fanghi di depurazione

gli ugelli di insufflazione viene immessa con una portata tale da determinare l'espansione e la fluidizzazione del letto fino al 100% circa del volume iniziale a riposo.

Il range di funzionamento tipico di un forno a letto fluido si estende dall'80% al 100% della potenza termica di dimensionamento. Assumendo un PCI dei fanghi in entrata costante (3.450 kJ/kg) si può quindi affermare che la **portata di combustibile in ingresso** potrà anch'essa variare in maniera analoga da **4.8 t/h a 6 t/h** di fanghi mantenendo il mix disidratati / essiccati previsto.

Prima di inserire in camera di combustione i fanghi da valorizzare termicamente, il forno viene preriscaldato con l'utilizzo di bruciatori a gas metano fino a raggiungere la temperatura minima prescritta per legge di 850 °C. Il preriscaldamento deve avvenire ad una velocità controllata, che non dovrà superare i 30 °C / h, per evitare di danneggiare il materiale refrattario, che riveste e protegge le pareti metalliche del forno.

Una volta raggiunta la temperatura di esercizio potranno essere introdotti i fanghi di depurazione preessiccati. Man mano che la portata di fanghi e conseguentemente la loro potenza termica aumenterà, il bruciatore (comandato dalla temperatura alla testa del forno) diminuirà la sua potenza termica fino a venire completamente spento.

f) Sistema di trattamento dei fumi di combustione

Per il sistema di trattamento dei fumi di combustione si è scelto un sistema articolato nei seguenti componenti:

- mult ciclone;
- primo reattore per il dosaggio del bicarbonato di sodio e dei carboni attivi;
- primo filtro a maniche;
- secondo reattore per il dosaggio del bicarbonato di sodio e dei carboni attivi;
- secondo filtro a maniche;
- SCR DeNOx con dosaggio di soluzione ammoniacale;
- scambiatore di recupero fumi-acqua (ECO Esterno);

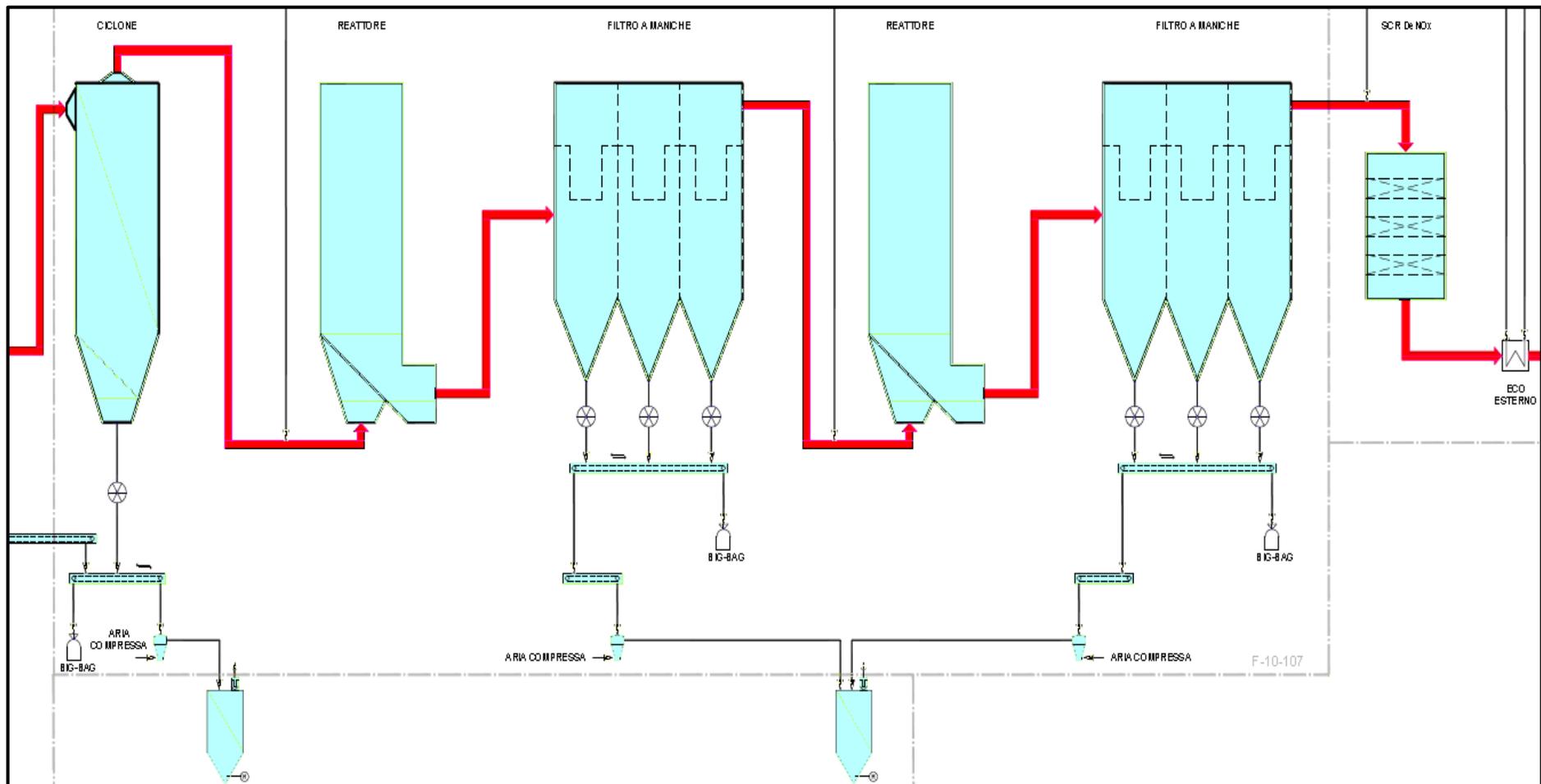


Figura- 38 P&I della linea di trattamento dei fumi del nuovo termovalorizzatore dei fanghi

1. Il multiciclone

Il multiciclone è un'apparecchiatura statica che separa il particolato contenuto nei fumi di combustione per l'effetto combinato della gravità e della forza centrifuga.

L'ingresso dei fumi nel multiciclone avviene secondo un percorso tangenziale, che costringe la corrente dei fumi ad effettuare un brusco avvitemento circolare lungo la parete dei singoli piccoli cicloni in senso discendente. Lungo questo percorso, il particolato più grossolano viene sostanzialmente separato dalla corrente dei fumi per centrifugazione e ricade per gravità sul fondo del ciclone, da dove viene estratto tramite una rotocella.

Attraverso il multiciclone è dunque possibile realizzare un **primo trattamento di depolverazione grossolana**, caratterizzato da una resa di abbattimento pari a circa il **90% del totale delle polveri** in ingresso.

Tendenzialmente il multiciclone sarà in grado di estrarre quelle polveri e ceneri derivanti dal processo di combustione, che hanno una granulometria maggiore di $10\ \mu m$, mentre **le particelle più fini saranno comunque intercettate dal successivo stadio di filtrazione a maniche**. Questo permette comunque, un'efficace estrazione di tutti i sottoprodotti più grossolani e della eventuale sabbia del letto trascinata dalla corrente dei fumi di combustione.

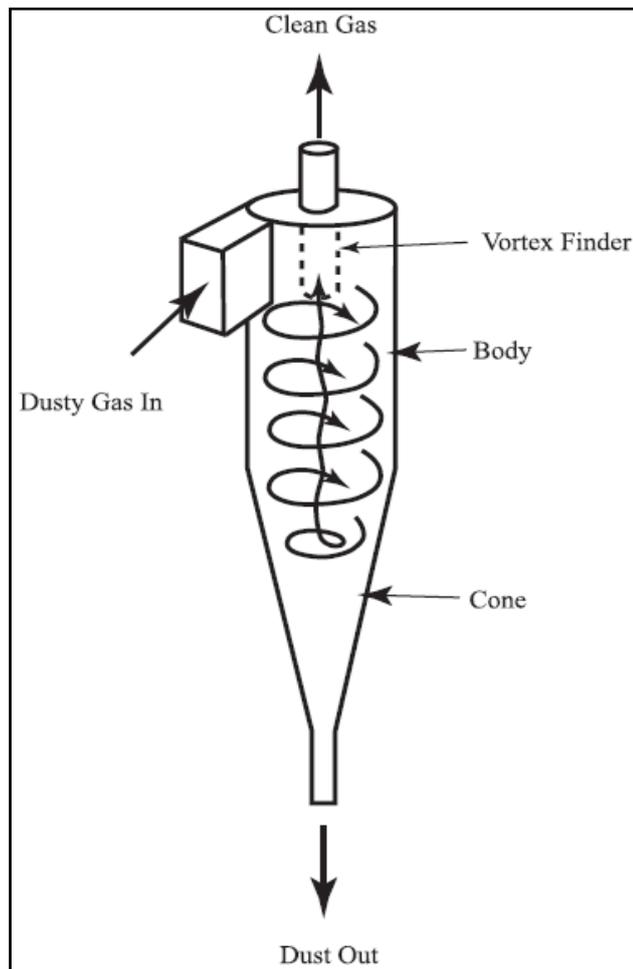


Figura- 39 Multiciclone

(Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.312)

2. Primo reattore per il dosaggio del bicarbonato di sodio e dei carboni attivi

A valle del ciclone, prima dell'ingresso nel successivo reattore, vengono immessi nel flusso dei fumi di combustione i reagenti chimici (**bicarbonato di sodio e carboni attivi**) necessari per il primo stadio di abbattimento delle sostanze inquinanti contenute nei fumi stessi.

Il carbone attivo ha la funzione di trattenere i metalli pesanti trappolandoli all'interno della sua **superficie porosa**. Invece, **il bicarbonato di sodio** viene utilizzato nel processo di depurazione dei fumi per affinare il processo di neutralizzazione degli inquinanti acidi contenuti nei fumi.

Il reattore è costituito da un volume chiuso, all'interno del quale i reagenti hanno il tempo per miscelarsi ed omogeneizzarsi con i fumi e che garantisce un sufficiente tempo di contatto fra le sostanze inquinanti contenute nei fumi ed i reagenti, in modo che il bicarbonato di sodio si possa dapprima attivarsi e successivamente combinare con gli inquinanti come (HCl, HF, SO₂, SO₃), mentre le particelle di carbone attivo assorbono i microinquinanti, quali metalli pesanti, furani e diossine. Il sistema di trattamento fumi della futura linea fanghi sarà dotato di due reattori verticali entrambi alimentati a bicarbonato di sodio e carboni attivi. I due reattori saranno intervallati dal primo dei due filtri a maniche previsti, e saranno caratterizzati entrambi da un tempo di residenza medio di 3.5 s.

3. Primo filtro a maniche

Il filtro a maniche è nella linea di trattamento fumi per abbattere soprattutto gli acidi, diossine e metalli pesanti presenti ancora nei fumi nonché le polveri fine non abbattute dal mult ciclone.

I filtri disporranno di maniche di tessuto realizzate in materiale filtrante, resistente alle alte temperature ed agli agenti aggressivi dei fumi stessi e capaci di trattenere le particelle solide. I reagenti precedentemente immessi si accumulano fino a formare uno strato sulla superficie esterna delle maniche. I fumi attraversano questo strato e le molecole di sostanze inquinanti ed i microinquinanti liberi entrano in contatto coi reagenti ancora attivi e sono così trattenuti. Quando lo strato sulle maniche raggiunge un determinato spessore, misurato indirettamente con la perdita di pressione dei fumi, un dispositivo scarica un colpo d'aria compressa all'interno di ogni manica. L'onda d'urto creata provoca la rimozione di parte del materiale accumulatosi sulla superficie, che cade per

gravità nelle sottostanti tramogge d'estrazione, e viene estratto tramite coclee e trasportato al silo d'accumulo dei residui solidi (PSR). La portata dei fumi stimata sarà di 18.200 Nm³/h, con una temperatura di 200°C. A tale portata è **previsto un consumo di bicarbonato pari a 150 kg/h e consumo di carboni attivi pari a 3 kg/h.**

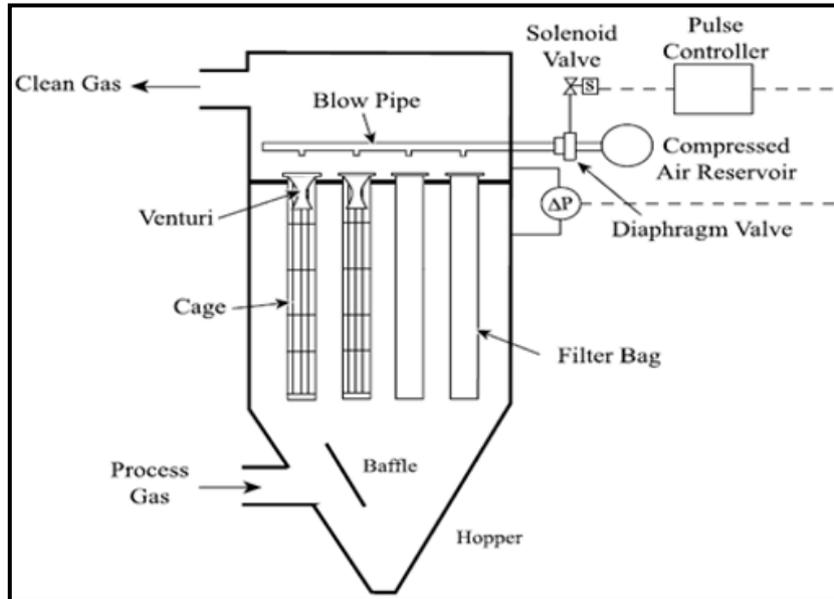


Figura- 41 P&I del filtro a maniche

(Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.356)

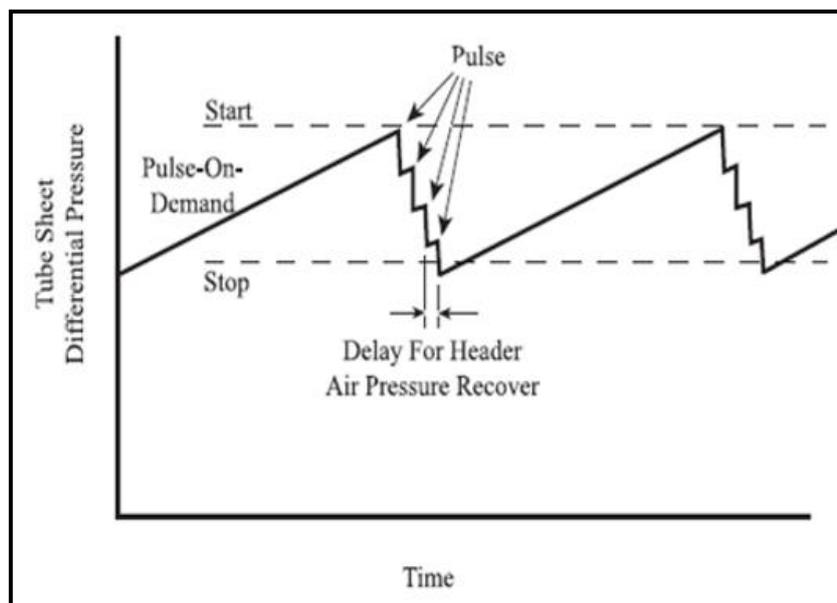


Figura- 40

(Karl B. Schnelle and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook (Boca Raton: CRC Press, 2002), p.356)

4. Secondo reattore per il dosaggio del bicarbonato di sodio e dei carboni attivi

A valle del primo filtro a maniche è installato il secondo reattore, che garantisce la possibilità di effettuare un secondo step abbattimento chimico delle sostanze inquinanti ancora contenute nei fumi di combustione è **previsto secondo i dati di progettazione un consumo di bicarbonato pari a 20 kg/h e consumo di carboni attivi pari a 2 kg/h.**

5. Secondo filtro a maniche

Il secondo filtro a maniche è installato a valle del secondo reattore ed effettuerà la depolverazione fine di combustione, nonché renderà possibile il completamento del secondo stadio di abbattimento chimico degli inquinanti ancora presenti nei fumi di combustione, rimuovendo al tempo stesso tutti i reagenti ed i prodotti di reazione finale, che si accumulano sulle maniche filtranti. Sono previsti 2 file di 140 maniche.

6. SCR DeNO_x

Come ultimo stadio di depurazione dei fumi sarà previsto un catalizzatore per l'abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x). Il sistema catalitico consente di ottenere valori d'emissione degli ossidi di azoto molto inferiori rispetto ai limiti normativi vigenti.

I fumi provenienti dal secondo filtro a maniche mantengono una temperatura sufficientemente elevata (circa 185 °C), al fine di rendere possibile l'attivazione delle reazioni di denitrificazione sulla superficie attiva del catalizzatore.

La portata che verrà trattata è pari a quella in uscita dal secondo filtro a maniche e pari a circa 19.500Nm³/h.

Prima dell'ingresso dei fumi nel catalizzatore viene iniettata all'interno dei condotti, tramite apposita lancia bifase, una portata controllata di soluzione ammoniacale (25%), il cui dosaggio avviene in funzione del valore degli NO_x misurati a monte ed a valle del catalizzatore. Dopo aver attraversato un miscelatore statico all'interno del quale l'ammoniaca è ben omogeneizzata nei fumi, quest'ultimi entrano nel catalizzatore avente volume stimato di 4.5 m³.

Esso è costituito da pacchi di moduli costruiti a nido d'ape o a piastre corrugate. I moduli sono in materiale ceramico poroso la cui superficie è arricchita da elementi catalizzanti (es. TiO₂, V₂O₅). All'interno del catalizzatore ha luogo la reazione riducente fra ammoniaca (NH₃) e ossidi di azoto (NO, NO₂), la quale ha come sottoprodotti azoto (N₂)

e acqua (H₂O). Non vi sono dunque prodotti residui inquinanti. Il consumo di soluzione ammoniacale, stimato in base ai dati di processo, sarà di 1.6/1.8 kg/ora.

7. Scambiatore di recupero fumi-acqua

A valle del catalizzatore DeNO_x sarà installato uno scambiatore di calore, che ha il compito di recuperare una parte del calore sensibile ancora contenuto nei fumi depurati, prima del loro definitivo rilascio in atmosfera attraverso il camino. I fumi depurati in uscita dal catalizzatore hanno ancora un'elevata temperatura residua (circa 170 °C). Attraverso questo scambiatore di calore, l'energia termica ancora contenuta nei fumi potrà essere recuperata ed essere utilizzata per preriscaldare l'acqua di alimento della caldaia.

L'acqua in arrivo dal serbatoio dell'acqua di alimentazione **avrà una temperatura di circa 130 °C** ma, grazie alla potenza termica ceduta dall'ultimo step di raffreddamento dei fumi, **verrà riscaldata a 148 °C** prima dell'immissione in caldaia per la produzione di vapore. Dato l'elevato contenuto di umidità nei fumi di combustione, che tipicamente caratterizza un impianto di valorizzazione termica dei fanghi di depurazione, **non si ritiene consigliabile scendere al di sotto dei 140 °C con le temperature dei fumi immessi in atmosfera, anche per non aumentare il rischio di rendere visibile il pennacchio di vapore** in corrispondenza del camino stesso.

6. CONCLUSIONI

Nella prima parte di questo lavoro di tesi è stato determinato l'indice di efficienza energetica R1 relativo all'impianto di CORE situato a Sesto San Giovanni. Tale indice di efficienza energetica è stato introdotto nel novembre 2008 in nota all'*Allegato II della Direttiva 2008/98/EC* al fine di qualificare le operazioni svolte negli impianti di trattamento termico dei rifiuti urbani in funzione del raggiungimento o meno di alcune soglie per l'efficienza energetica, definita dalla formula stessa, differenziate in base alla data d'entrata in esercizio dell'installazione considerata.

Il calcolo di tale indice e la sua comunicazione annuale in una relazione contenente diversi dati d'esercizio, è diventato un obbligo nella Regione Lombardia con il decreto *DGR IX/3019 del 15 febbraio 2012*.

La metodologia utilizzata in questo lavoro di tesi per la determinazione dell'indice di efficienza energetica R1 è stata formalizzata nel 10 Marzo 2015 dalla Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile della Regione Lombardia in collaborazione con Il Centro Studi MatER, con l'obiettivo di ridurre al minimo l'arbitrarietà nell'applicazione della formula R1 e in tutte le operazioni necessarie a tale valutazione.

La metodologia identifica tutti i flussi materiali ed energetici in ingresso e in uscita al volume di controllo e le diverse grandezze cumulate, conducendo alla determinazione dell'indice R1 e del PCI_{medio} dei rifiuti processati durante l'anno 2019.

L'indice di recupero energetico R1 ottenuto per l'anno 2019 nel rispetto della nota all'Allegato II della WFD e delle linee guide sviluppate dalla regione, dimostra che l'operazione di incenerimento dei rifiuti urbani relativa all'impianto di CORE a Sesto San Giovanni è classificabile come operazione di recupero energetico (R1). Quindi, l'inceneritore di CORE a Sesto San Giovanni può essere definito come un termovalorizzatore per l'anno 2019. Come spiegato in precedenza, dal punto di vista pratico, il raggiungimento della soglia R1 o meno non comporta drastiche scelte tecnologiche ma, piuttosto, determina forti implicazioni di natura economica, amministrativa ed autorizzativa.

Inoltre, per poter determinare l'indice di efficienza era necessario eseguire una fase preliminare di studio di tutte le sezioni dell'impianto interessate al processo di incenerimento per poter determinare i flussi di massa ed energia applicati al volume di controllo nel rispetto delle linee guide europee.

Nella seconda parte di questo lavoro di tesi è stato mostrato il concetto dell'economia circolare applicato ad un impianto per l'incenerimento dei fanghi da depurazione e la valutazione di tale disciplina che si presenta permeata dalle tematiche dell'ecologia, risulta anche incentrata sulla fattibilità economica e sugli aspetti di profitto. Infatti, non si parla mai di ridurre i consumi di energia o la produttività, ma si parla di efficientare e utilizzare in maniera più intelligente le risorse riducendo lo spreco soprattutto di materia prima. Pertanto, più che un percorso di contrapposizione all'industrializzazione risulta essere una contrapposizione al sistema consumistico.

Proprio per questo l'economia circolare risulta essere un vero primo passo verso una soluzione a molte delle questioni irrisolte dell'ultimo secolo: la fragilità dell'economia moderna, la limitatezza delle materie prime, lo spreco di risorse e materiali, la produzione incontrollata di rifiuti, la dipendenza da pochi fornitori esteri dell'energia e della materie prima. Tutti questi motivi giustificano la nuova tendenza del gruppo CAP gestore del servizio idrico integrato della Città metropolitana di Milano di realizzare il progetto di simbiosi industriale di Sesto San Giovanni, che unisce il termovalorizzatore e il depuratore in una biopiattaforma dedicata all'economia circolare.

BIBLIOGRAFIA

1. Viganò, Federico. “Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani.” Piacenza, 2017. <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-e-informazioni/impres/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>.
2. Schnelle, Karl B., and Charles A. Brown. *Air Pollution Control Technology Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
3. Canzani, Roberto, e Roberto Di Cosmo. “STATO DELL’ARTE E POTENZIALITÀ DELLE TECNOLOGIE DI RECUPERO DEL FOSFORO DAI FANGHI DI DEPURAZIONE.” *Ingegneria Dell’Ambiente* 5 (Marzo 2018): 149–70.
4. Oliveri, Vincenzo, e Anna Bonura. “EMISSIONE DI PCDD/F DA IMPIANTI DI INCENERIMENTO RIFIUTI URBANI,” n.d.
5. “DIRETTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO Del 19 Novembre 2008 Relativa Ai Rifiuti e Che Abroga Alcune Direttive.” *Gazzetta Ufficiale Dell’Unione Europea*, Novembre 19, 2008. https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/normativa/rifiuti/consolidato_Rifiuti_05lug2018.pdf.
6. “Economia Circolare: Definizione, Importanza e Vantaggi: Attualità: Parlamento Europeo.” *Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi | Attualità | Parlamento europeo*, Aprile 10, 2018. <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>.
7. “Circular Economy - UK, USA, Europe, Asia & South America - The Ellen MacArthur Foundation.” *Ellen MacArthur Foundation*. Accessed February 26, 2020. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>.
8. Neuwahl, Federic, Gianluca Cusano, Jorge Gomez Benavides, Simon Holbrook, and Serge Roudier. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
9. EC (European Commission), 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. *Off. J. Eur. Union* L 332, 91-111.
10. EC (European Commission), 2006. BREF WI – Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.
11. McDonald, J. R., Computer simulation of the electrostatic precipitation process, in *Proc. Int. Conf. Electrostatic Precipitation*, Air Pollution Control Assoc., Pittsburgh, October 1981.
12. *Gas Flow Model Studies*, Industrial Gas Cleaning Institute, Pub. No. E-P7, Rev I, Washington, D.C., 1969.
13. *Impianti meccanici M* tenuto dal Prof. Saccani Cesare, Ing Guzzini Alessandro, 2019-2020, sito Web <http://www.diem.ing.unibo.it/personale/saccani/> (Ultimo accesso: Marzo 2020).

INDICE DELLE IMMAGINI

| | |
|--|----|
| Figura- 1 schema della caldaia presente nel termovalorizzatore di CORE | 10 |
| Figura- 2 andamento del rendimento del ciclo termodinamico Rankine in funzione del numero degli spillamneti | 11 |
| Figura- 3 PFD di principio del termovalorizzatore di Sesto San Giovanni..... | 12 |
| Figura- 4 Ciclo Rankine relativo al termovalorizzatore CORE di Sesto San Giovanni. 13 | |
| Figura- 5 P&I delle tre linee di trattamento fumi | 15 |
| Figura- 6 Andamento della resa di abbattimento degli NOx in funzione della temperatura (SNCR temperature window) | 17 |
| Figura- 7 Meccanismo di abbattimento delle ceneri leggere tramite l'elettrofiltro..... | 19 |
| Figura- 8 P&I dell'elettrofiltro a due campi..... | 20 |
| Figura- 9 P&I della sezione torri di lavaggio | 23 |
| Figura- 10 P&I dello scambiatore fumi-fumi | 24 |
| Figura- 11 P&I del filtro a maniche..... | 26 |
| Figura- 12 P&I della sezione filtro a maniche - camino..... | 27 |
| Figura- 13 Questa figura raggruppa le varie tipologie di inquinanti e parametri misurati a camino | 29 |
| Figura- 14 Questa immagine mostra quali siano le sezioni dell'impianto entranti nel volume di controllo..... | 34 |
| Figura- 15 Questa immagine mostra i componenti delle sezioni entranti nel volume di controllo evidenziati in grigio per il bilancio del flusso di energia..... | 35 |
| Figura- 16 Andamenti del fattore di correzione climatica "CCF" secondo le due definizioni europee: "EU1" ed "EU2"..... | 39 |
| Figura- 17 Questo grafico mostra la rampa di temperatura per l'avvio della linea dopo un intervento sui materiali refrattari. | 43 |
| Figura- 18 Rampa di avviamento veloce delle linea dopo un intervento che non abbia causato importanti modifiche. Ad esempio, la manutenzione del catalizzatore | 44 |
| Figura- 19 Schema di riferimento per la realizzazione del bilancio dell'energia: il confine del volume di controllo individua tutti gli addendi del bilancio, ossia i flussi energetici che lo attraversano. ("Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell'Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani," (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), | |

| | |
|---|----|
| http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/impres/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti , p.12)..... | 46 |
| Figura- 20 Esempificazione della procedura di soluzione del bilancio dell’energia per il lato fumi della caldaia (“Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani,” (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/impres/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti , p.10)..... | 47 |
| Figura- 21 Rappresentazione schematica del volume di controllo per il sistema di un termovalorizzatore (“Linee Guida Operative per Il Calcolo Annuale Dell’Indice Di Efficienza Energetica R1 Conseguito Dai Termovalorizzatori Di Rifiuti Urbani,” (Piacenza: Centro Studi MatER Materia & Energia da Rifiuti, 2017), http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-einformazioni/impres/sicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti , p.14)..... | 48 |
| Figura- 22 Bilancio di energia lato fumi | 49 |
| Figura- 23 Bilancio di massa lato fumi-rifiuti | 51 |
| Figura- 24 Bilancio di energia lato fumi-rifiuti | 52 |
| Figura- 25 HDD relativo agli ultimi 20 anni | 53 |
| Figura- 26 Questa tabella riporta tutte le variabili entranti nel calcolo dell’indice di efficienza R1 | 54 |
| Figura- 27 Gli impianti attuali | 58 |
| Figura- 28 Il nuovo progetto della Biopiattaforma..... | 59 |
| Figura- 29 Quantitativi di fosforo perso per settore di consumo estrapolati dal bilancio europeo del fosforo proposto da van Dijk et al. (2016)..... | 61 |
| Figura- 31 Processi di recupero del fosforo applicabili a diverse matrici, in diverse sezioni di un impianto di depurazione. | 62 |
| Figura- 30 Costo specifico e percentuale di P ₂ O ₅ per il triplo superfosfato (TSP), fosfato di-ammonico..... | 62 |
| Figura- 32 Sezione di alimentazione dei fanghi disidratati | 66 |
| Figura- 33 Essiccatore di fanghi a dischi..... | 67 |
| Figura- 34 Velocita di formazione delle diossine in funzione della temperatura..... | 69 |
| Figura- 35 In questa figura si può vedere le sezioni di stoccaggio, essiccamento, miscelatore fanghi, forno..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura- 36 Schema di principio di un letto a fluido bollente..... | 71 |
| Figura- 37 Lo schema di forno a letto fluido bollente applicato a fanghi di depurazione | 71 |
| Figura- 38 P&I della linea di trattamento dei fumi del nuovo termovalorizzatore dei fanghi | 73 |
| Figura- 39 Multiciclone | 74 |
| Figura- 41 | 76 |
| Figura- 40 P&I del filtro a maniche..... | 76 |

Ringraziamenti

Ringrazio mio padre, mia madre, mio fratello e mia nonna per aver creduto in me e per avermi supportato ogni giorno della mia vita.

Ringrazio Angelina per tutto il bene che mi ha dato dal momento in cui l'ho conosciuta e di esserci stata sempre presente a condividere con me ogni momento di difficoltà e di gioia, e di aver sempre creduto in me.

Ringrazio tutti i miei amici di Bologna con cui ho preparato gli esami e condiviso le gioie e i sacrifici che solo l'UNIBO sa regalare.

“A lesson without pain is meaningless. For you cannot gain anything without sacrificing something else in return, but once you have overcome it and made it your own...you will gain an irreplaceable fullmetal heart.”

Hiromu Arakawa