



## **Centro Studi MatER** Materia & Energia da Rifiuti

per



### **Regione Lombardia**

**Direzione Generale Ambiente, Energia e  
Sviluppo Sostenibile**

# **Linee guida operative per il calcolo annuale dell'indice di efficienza energetica R1 conseguito dai termovalorizzatori di rifiuti urbani**

**Federico Viganò**

Ricercatore di *Sistemi per l'Energia e l'Ambiente*  
Dipartimento di Energia - Politecnico di Milano

**Piacenza,  
20 novembre 2017**

*Disponibile online alla pagina:*

<http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/servizi-e-informazioni/impresesicurezza-ambientale-e-alimentare/gestione-dei-rifiuti>

*< Pagina intenzionalmente lasciata bianca >*

## Premessa

Il Centro Studi MatER, nell'ambito di un accordo di collaborazione con la Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile della Regione Lombardia, ha sviluppato queste linee guida operative per il calcolo dell'indice di recupero energetico R1 annualmente conseguito dai termovalorizzatori di rifiuti urbani.

La formula 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 come "recupero energetico" (R1) o "smaltimento" (D10) 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.

Nel giugno 2011, la Direzione Generale Ambiente della Commissione Europea ha pubblicato delle linee guida (EC, 2011) non cogenti per chiarire svariati aspetti interpretativi e applicativi.

Tale obiettivo è stato raggiunto solo parzialmente, sussistendo ancora spazi interpretativi ampi con rimandi ad altri documenti<sup>1</sup>, di limitata diffusione, per la soluzione di problemi cruciali quali la quantificazione dell'energia complessivamente contenuta nei rifiuti annualmente trattati (il termine  $E_w$  nella formula R1).

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.

L'esperienza maturata da RL nei primi anni d'applicazione del citato DGR ha evidenziato forti disuniformità tra le procedure di valutazione adottate dai gestori dei vari impianti lombardi, da cui la necessità di formalizzare una metodologia univoca che riduca al minimo l'arbitrarietà nell'applicazione della formula R1 e in tutte le operazioni propedeutiche a tale valutazione.

La formalizzazione di tale procedura costituisce l'obiettivo del presente documento.

Queste linee guida sono state rilasciate in forma di bozza il 10 marzo 2015. Da tale data, LEAP<sup>2</sup> le ha utilizzate per svolgere quindici valutazioni, relative a nove diversi impianti di termovalorizzazione rifiuti del Nord-Italia. L'esperienza maturata ha suggerito alcune modifiche che sono state introdotte nella presente versione definitiva.

---

<sup>1</sup> Si tratta dei documenti FDBR (2000 e 2013) e RF (2008) ispirati alla norma tecnica EN 12952-15 (CEN, 2003).

<sup>2</sup> LEAP, Laboratorio Energia Ambiente Piacenza (<http://www.leap.polimi.it>), è una società consortile a responsabilità limitata partecipata dal Politecnico di Milano, che svolge attività di ricerca e di supporto tecnico-scientifico nei settori dell'energia e dell'ambiente. Il Centro Studi MatER (<http://www.mater.polimi.it>) è un progetto di LEAP sotto il coordinamento scientifico del Dipartimento di Energia e del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano.

## Sommario

Premessa.....	i
Sommario.....	ii
Nomenclatura.....	v
Acronimi e abbreviazioni.....	v
Specie chimiche.....	vi
Simboli.....	vi
Pedici.....	vii
1 L'indice di efficienza energetica R1.....	1
1.1 Il termine $E_P$ .....	5
1.2 Il termine $E_F$ .....	7
1.3 Il termine $E_I$ .....	8
1.4 Il termine $E_W$ .....	8
1.5 Il fattore climatico CCF.....	9
2 La determinazione del termine $E_W$ .....	11
2.1 La norma tecnica EN 12952-15.....	11
2.2 Il volume di controllo della caldaia.....	13
2.2.1 Il periodo di funzionamento.....	15
3 Il bilancio di massa della caldaia.....	17
3.1 Il bilancio di massa del lato acqua della caldaia.....	17
3.2 Impostazione del bilancio di massa lato fumi.....	19
3.3 I fumi all'uscita della caldaia.....	20
3.3.1 Portata e caratteristiche dei fumi al camino.....	20
3.3.2 Le componenti dei fumi.....	23
3.3.3 Apporto / sottrazione delle componenti dei fumi lungo la linea di trattamento.....	23
3.3.4 Il caso dell'EAS e le grandezze all'uscita della caldaia.....	26
3.3.5 Svolgimento dei calcoli.....	29
3.4 I solidi.....	30
3.4.1 L'umidità delle scorie.....	31
3.4.2 Gli incombusti nelle scorie e nelle polveri.....	31
3.4.3 Svolgimento dei calcoli.....	32
3.5 Il rifiuto.....	32
3.6 Gli apporti d'aria.....	35
3.7 Il ricircolo dei gas combustibili.....	36
3.8 Gli altri flussi in ingresso alla caldaia.....	36
3.9 Il bilancio di massa del lato fumi della caldaia.....	38
4 Il bilancio dell'energia della caldaia.....	39
4.1 Il bilancio dell'energia del lato acqua/vapore della caldaia.....	39
4.2 Il bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.....	39
4.2.1 Entalpia chimica.....	40
4.2.2 Entalpia fisica.....	41

4.2.3	Energia associata ai flussi materiali .....	43
4.2.4	Gli incombusti.....	44
4.2.5	La degradazione dell'energia meccanica .....	44
4.2.6	Svolgimento dei calcoli.....	45
5	Applicazione della metodologia di valutazione dell'indice R1 .....	49
5.1	L'elaborazione delle registrazioni orarie.....	49
5.2	Esempio completo di valutazione dell'indice R1 .....	51
5.2.1	Ep: Energia Prodotta.....	60
5.2.2	E <sub>F</sub> : Energia dei combustibili ausiliari ("Fuels") .....	61
5.2.3	E <sub>I</sub> : Energia Importata .....	61
5.2.4	CCF: Fattore di correzione climatica .....	62
5.2.5	R1: Efficienza energetica .....	62
5.3	Contenuto energetico dei rifiuti diverso dal termine E <sub>w</sub> .....	62
5.4	Esempi di utilizzo interno di calore.....	64
5.5	Casi di riscaldamento dei fumi.....	65
5.5.1	Combustibile ausiliario per riscaldare i fumi in presenza di recupero a valle .....	66
5.5.2	Combustibile ausiliario per riscaldare i fumi in assenza di recupero a valle .....	66
5.5.3	Vapore per riscaldare i fumi in presenza di recupero a valle.....	66
5.5.4	Vapore per riscaldare i fumi in assenza di recupero a valle.....	66
5.6	Altri esempi di definizione dell'unità d'incenerimento .....	66
Appendice A: calcolo degli apporti specifici di EAS, FAS, VA e Solidi per diverse sostanze e miscele .....		67
A.1	Gas naturale.....	69
A.2	Bruciatori a gas naturale.....	69
A.3	Bruciatori a gasolio .....	70
A.4	Calce magnesiaca .....	72
A.5	Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR .....	73
A.6	Acqua liquida .....	74
A.7	Soluzione ammoniacale per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR o SNCR .....	75
A.8	Urea solida per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR.....	76
A.9	Urea in soluzione acquosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR .....	77
A.10	Bicarbonato di sodio in polvere nei sistemi di neutralizzazione a secco .....	79
A.11	Idrossido di calcio in polvere nei sistemi di neutralizzazione a secco .....	79
A.12	Latte di calce in sistemi a semisecco.....	81
A.13	Sistemi di lavaggio e di neutralizzazione a umido.....	83
A.14	Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri.....	84
A.15	Ceneri, Umidità, SC <sub>1</sub> e SC <sub>2</sub> .....	85
Appendice B: calcolo dei PCI per diverse sostanze e miscele.....		87
B.1	Gas naturale.....	88
B.2	Gasolio.....	88
B.3	Calce magnesiaca .....	88
B.4	Ammoniaca gassosa .....	89

B.5	Acqua liquida .....	89
B.6	Soluzione ammoniacale.....	89
B.7	Urea solida.....	90
B.7	Urea in soluzione acquosa.....	90
B.8	Bicarbonato di sodio solido.....	91
B.9	Idrossido di calcio solido.....	92
B.10	Latte di calce .....	92
B.11	Incombusti solidi .....	92
B.12	CO – Monossido di carbonio.....	92
Appendice C: calori specifici di diverse sostanze e miscele.....		93
C.1	EAS .....	93
C.2	FAS.....	94
C.3	VA.....	94
C.4	FAS da combustione di gas naturale .....	95
C.5	FAS da combustione di gasolio.....	95
C.6	Incombusti .....	96
C.7	Ammoniaca gassosa .....	97
C.8	Scorie secche, senza ferrosi e incombusti .....	97
C.9	Polveri secche senza incombusti .....	97
C.10	Ferrosi senza incombusti .....	97
Elenco delle fonti .....		99

## Nomenclatura

### Acronimi e abbreviazioni

<i>BAT</i>	<i>Best Available Techniques</i>
<i>BREF</i>	<i>Best available techniques Reference document</i>
<i>CCF</i>	<i>Climate Correction Factor</i>
<i>CDR</i>	Combustibile Derivato dai Rifiuti
<i>CSS</i>	Combustibile Solido Secondario
<i>DGR</i>	Decreto della Giunta Regionale
<i>Dlgs</i>	Decreto legislativo
<i>DM</i>	Decreto Ministeriale
<i>DCS</i>	<i>Distributed Control System</i>
<i>eas</i>	Apporto specifico di <i>EAS</i>
<i>EAS</i>	Eccesso d'Aria Secca
<i>EC</i>	<i>European Commission</i>
<i>EU</i>	<i>European Union</i>
<i>fas</i>	Apporto specifico di <i>FAS</i>
<i>FAS</i>	Fumi Anidri Stechiometrici
<i>HDD</i>	<i>Heating Degree Days</i> - secondo la definizione Eurostat
<i>IAPWS</i>	<i>International Association for the Properties of Water and Steam</i>
<i>IED</i>	<i>Industrial Emissions Directive</i> - La Direttiva 2010/75/EU
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>MATTM</i>	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>PCI</i>	Potere Calorifico Inferiore
<i>PM</i>	<i>Particulate Matter</i>
<i>PSR</i>	Prodotti Sodici Residui
<i>RL</i>	Regione Lombardia
<i>RSU</i>	Rifiuto Solido Urbano
<i>SCR</i>	<i>Selective Catalytic Reduction</i> - Sistema de- <i>NO<sub>x</sub></i> catalitico
<i>SNCR</i>	<i>Selective Non-Catalytic Reduction</i> - Sistema de- <i>NO<sub>x</sub></i> non catalitico
<i>SME</i>	Sistema di Monitoraggio delle Emissioni
<i>solidi</i>	Apporto specifico di <i>Solidi</i>
<i>Solidi</i>	Solidi contenuti in sospensione nei fumi, ovvero scaricati come tali da vari punti dell'impianto.
<i>TLR</i>	Teleriscaldamento
<i>va</i>	Apporto specifico di <i>VA</i>
<i>VA</i>	Vapore Acqueo
<i>WFD</i>	<i>Waste Framework Directive</i> - La Direttiva 2008/98/EC del 19/11/2008
<i>WI</i>	<i>Waste Incineration</i>
<i>WID</i>	<i>Waste Incineration Directive</i> - La Direttiva 2000/76/EC sostituita dalla <i>IED</i>

## Specie chimiche

<i>C</i>	Carbonio atomico (= elemento Carbonio)
<i>CO</i>	Monossido di carbonio (una specie gassosa incombusta che si trova in tracce nei <i>FAS</i> )
<i>CO<sub>2</sub></i>	Biossido di carbonio (una specie gassosa di completa combustione, componente dei <i>FAS</i> )
<i>Ca</i>	Calcio atomico (= elemento Calcio)
<i>CaCl<sub>2</sub></i>	Cloruro di calcio
<i>Ca(OH)<sub>2</sub></i>	Idrossido di calcio (c.d. "calce")
<i>Cl</i>	Cloro atomico (= elemento Cloro)
<i>F</i>	Fluoro atomico (= elemento Fluoro)
<i>H</i>	Idrogeno atomico (= elemento Idrogeno)
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Acqua (in forma gassosa <i>VA</i> )
<i>HCl</i>	Acido cloridrico
<i>HF</i>	Acido fluoridrico
<i>N</i>	Azoto atomico (= elemento Azoto)
<i>N<sub>2</sub></i>	Azoto molecolare (componente dell'aria - <i>EAS</i> - e dei <i>FAS</i> )
<i>NH<sub>3</sub></i>	Ammoniaca
<i>NO<sub>x</sub></i>	Ossidi d'azoto
<i>(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO</i> oppure <i>CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O</i>	Urea
<i>Na</i>	Sodio atomico (= elemento Sodio)
<i>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	Carbonato di sodio
<i>NaCl</i>	Cloruro di sodio
<i>NaF</i>	Fluoruro di sodio
<i>NaHCO<sub>3</sub></i>	Bicarbonato di sodio
<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	Solfato di sodio
<i>O</i>	Ossigeno atomico (= elemento Ossigeno)
<i>O<sub>2</sub></i>	Ossigeno molecolare (componente dell'aria - <i>EAS</i> )
<i>S</i>	Zolfo atomico (= elemento Zolfo)
<i>SO<sub>2</sub></i>	Biossido di zolfo
<i>SO<sub>3</sub></i>	Triossido di zolfo

## Simboli

<i>α</i>	Contenuto volumetrico / molare di vapore acqueo associato all'aria secca espressa nella medesima unità di misura
<i>G</i>	Grandezza estensiva, normalmente espressa su base oraria (es. portata: <i>t/h</i> , <i>m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h</i> , etc.)
<i>Γ</i>	Portata fumi (tipicamente <i>m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h</i> )
<i>h</i>	Entalpia specifica di un flusso materiale ( <i>kJ/kg</i> , <i>kJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup></i> , etc.)

E	Energia annua ( $GJ/a$ , $TJ/a$ o grandezze equivalenti)
$\varepsilon$	Efficienza d'abbattimento di un processo depurativo
$\lambda$	Fattore di dosaggio del reagente ( $\lambda = 1$ indica, teoricamente, dosaggio stechiometrico)
m	Apporto massico specifico (tipicamente $t/t$ , $kg/t$ , $t/m_N^3$ , etc.)
M	Quantitativo massico normalmente riferito all'annualità d'esercizio considerata ( $kg/a$ , $t/a$ ), ovvero portata massica ( $kg/h$ , $t/h$ , etc.)
$\mathcal{M}$	Massa molare ( $kg/kmol$ )
U	Umidità assoluta (massa di acqua / massa di aria secca)
x	Concentrazione

### ***Pedici***

0	Valore effettivo di riferimento: per la concentrazione dell'ossigeno nell'aria ambiente secca, pari a 20,95% in termini volumetrici (Mackenzie and Mackenzie, 1995)
AF	Relativo all'aria falsa (cioè i contributi non misurati / misurabili) introdotta lungo la linea di trattamento fumi
ATT.	Riferito all'atterramento
cam	Riferito alla sezione di misura del camino dell'impianto / linea considerato/a
circ	Ricircolato all'interno del sistema considerato
EAS	Riferito all'EAS
EL	Elettrico, riferito a energia o potenza
exp	Esportato dal sistema considerato
H <sub>2</sub> O	Riferito all'acqua, sia in forma liquida, sia in forma gassosa (VA)
IN	Relativo a flussi entranti nel sistema considerato
F	Relativo ai combustibili ausiliari che contribuiscono alla produzione dell'effetto utile secondo le regole di valutazione dell'indice R1
i	Riferito alla specie / componente / flusso $i$ -esimo
I	Primo - riferito alla sezione della linea fumi a monte del punto convenzionale d'introduzione dell'aria aggiuntiva - corrisponde con la sezione convenzionale d'uscita caldaia
II	Secondo - riferito alla sezione della linea fumi a valle del punto convenzionale d'introduzione dell'aria aggiuntiva
I	Importato, secondo le regole di valutazione dell'indice R1
j	Riferito alla specie / componente / flusso $j$ -esimo
k	Riferito alla specie / componente / flusso $k$ -esimo
non-P	Contributo che non può essere conteggiato nel termine $E_p$ della formula R1 in coerenza con le relative regole di valutazione
N	Normale - riferito alle condizioni termodinamiche "normali" di 25 °C, 1 atm
O <sub>2</sub>	Riferito all'ossigeno
OUT	Relativo a flussi uscenti dal sistema considerato
P	Prodotto utile secondo le regole di valutazione dell'indice R1
PCI	Espresso con riferimento alla base/convenzione del PCI
R1	Definito/valutato coerentemente con le regole di valutazione dell'indice R1

- reag.* Riferito ai reagenti
- RIF.* Valore convenzionale di riferimento: per la concentrazione dell'ossigeno nell'aria ambiente secca, pari a 21,00% in termini volumetrici - per temperatura e pressione di definizione del PCI, pari a 25 °C, 1 atm
- secco* Espresso in base "Secca" o "Anidra"
- sed.* Riferito ai sedimenti
- spurgo* Riferito allo spurgo del cilindro del vapore (il c.d. *blow-down*)
- S* Standard - riferito alle condizioni termodinamiche "standard" di 15 °C, 1 atm
- T* Termico, riferito a energia o potenza
- TQ* Espresso in base "Tal Quale"
- W* Relativo ai rifiuti complessivamente ed effettivamente trattati secondo le regole di valutazione dell'indice R1

## 1 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:

$$R1 = \frac{E_P - (E_F + E_I)}{0,97 \cdot (E_W + E_F)} \cdot CCF \quad (1.1)$$

Dove:

$E_P$  è la produzione annuale equivalente di energia, comprendente sia l'energia termica (pesata con un fattore 1,1), sia l'energia elettrica (pesata con un fattore 2,6);

$E_F$  è l'energia fornita nell'anno all'unità d'incenerimento da combustibili ausiliari (non classificati come rifiuti) che abbiano contribuito alla produzione di vapore utile impiegato;

$E_I$  è l'energia complessivamente importata dall'unità d'incenerimento escludendo  $E_W$  ed  $E_F$ ;

0,97 è un fattore che considera le perdite di energia dovute alle ceneri di caldaia e all'irraggiamento;

$E_W$  è l'energia contenuta nel rifiuto complessivamente trattato;

$CCF$  “*Climate Correction Factor*”, è il coefficiente di correzione climatica.

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.

Le definizioni dei diversi termini della formula R1 riportate nell'Allegato II della *WFD* sono estremamente essenziali. Diverse precisazioni sopra riportate sono tratte dalle linee guida europee sull'interpretazione della formula R1 del giugno 2011 (EC, 2011) citate in Premessa.

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).

La definizione indica, inoltre, che il contenuto energetico dei rifiuti trattati, ossia il termine  $E_W$ , deve essere valutato con riferimento alla convenzione del Potere Calorifico Inferiore (PCI). È sempre la definizione a specificare i due "pesi" dell'energia elettrica e del calore prodotti dall'unità d'incenerimento con i quali le due forme d'energia concorrono alla determinazione del termine  $E_P$ , secondo la relazione:

$$E_P = 2,6 \cdot E_{EL,R1} + 1,1 \cdot E_{T,R1} \quad (1.2)$$

Dove i due addendi sono chiaramente le produzioni di energia elettrica ( $E_{EL,R1}$ ) e di calore ( $E_{T,R1}$ ) secondo i criteri d'applicazione della formula R1, come meglio illustrato nel seguito.

L'origine dei due "pesi", "2,6" e "1,1", è spiegata nel documento di riferimento circa le migliori tecniche disponibili relativo all'incenerimento dei rifiuti (il *BREF WI* = "*Best available techniques Reference document for Waste Incineration*") nella versione dell'agosto 2006 (EC, 2006), in vigore al tempo della definizione della *WFD*. A tale documento, richiamato anche nella definizione della formula R1, è delegata la definizione dei criteri di conformità per la sua applicazione; la versione dell'agosto 2006 (antecedente l'introduzione della formula R1, nel novembre 2008) tuttavia non ne tratta esplicitamente. Allo stato, è in corso il processo di revisione del *BREF WI*. La pubblicazione della nuova edizione è attesa per la fine del 2019.

Infine, la definizione della formula R1 fa riferimento unicamente agli impianti di incenerimento dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU).

Le citate linee guida europee sull'interpretazione della formula R1, pubblicate nel giugno 2011, hanno esteso, ampliato e integrato i fondamenti generali e hanno fornito precisazioni puntuali sui vari termini della formula.

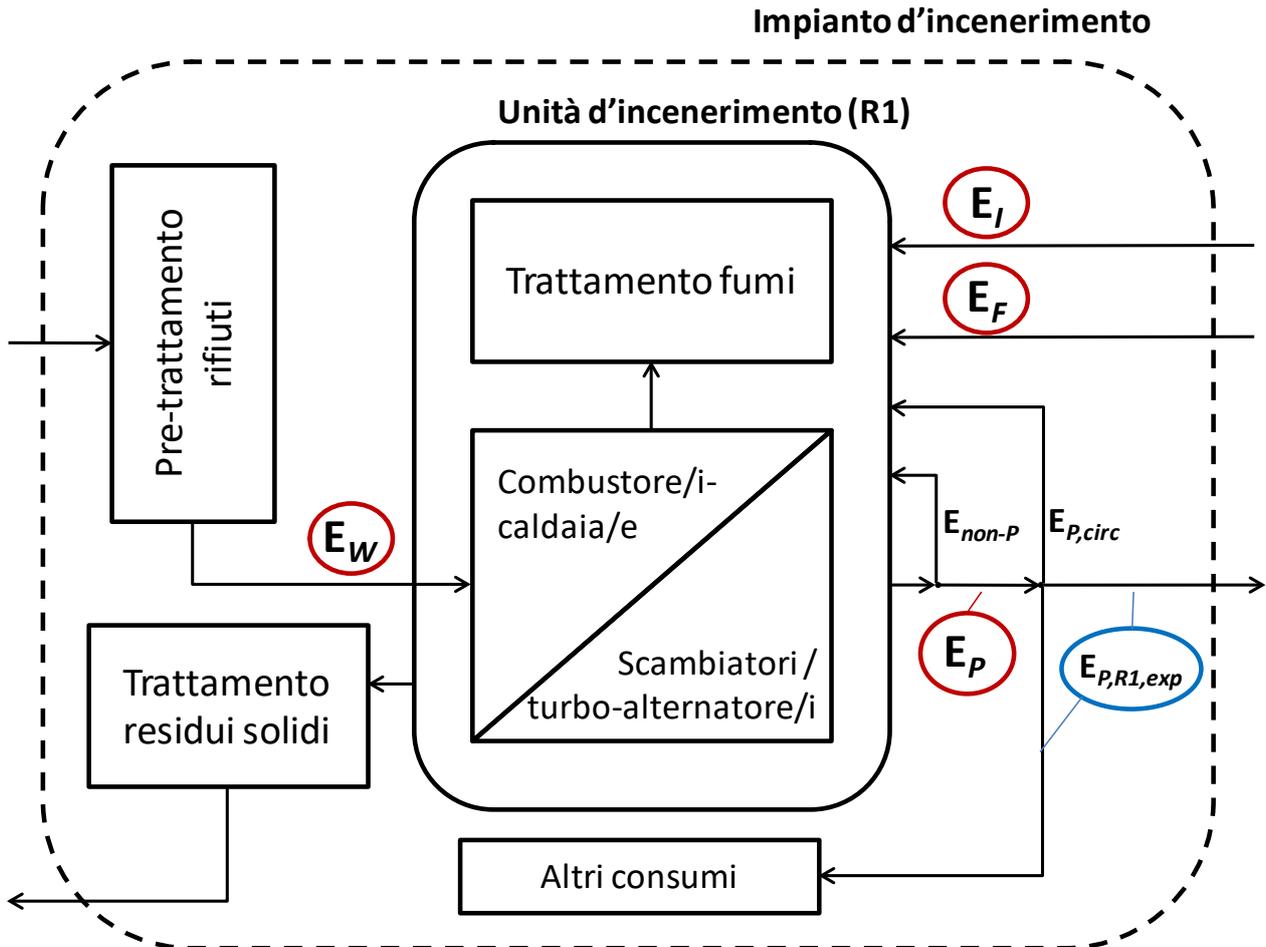
Questi i caratteri generali:

- la formula R1 è applicabile solo a unità dedicate all'incenerimento degli RSU, ossia unità che sono autorizzate e progettate in modo da poter trattare RSU indifferenziati, eventualmente pre-trattati;
- sono esclusi dall'applicazione della formula R1 tutti gli impianti di co-incenerimento e le installazioni dedicate al trattamento di rifiuti pericolosi, ospedalieri, fanghi di depurazione e rifiuti industriali;

- in accordo con il *BREF WI*, l'unità d'incenerimento cui fa riferimento la formula R1 comprende solo i componenti essenziali che realizzano i processi di incenerimento e recupero energetico, cioè la/e camera/e di combustione, la/e caldaia/e, il trattamento dei fumi di combustione, i dispositivi di conversione energetica e di recupero (come: scambiatori di calore, gruppo turboalternatore, pompe, motori, ventilatori, compressori, tracciamento delle tubazioni, sistemi di controllo e monitoraggio, etc.) e i sistemi che consumano calore necessari al corretto funzionamento dell'unità stessa;
- l'"unità d'incenerimento" è diversa dall'"impianto d'incenerimento" come era definito dalla *WID* (= "*Waste Incineration Directive*", la Direttiva 2000/76/EC) ed è tuttora definito dalla *IED* (= "*Industrial Emissions Directive*", la Direttiva 2010/75/EU), così come è diverso dall'"installazione" definita dalla *IED*;
- tutti i processi di pre-trattamento del rifiuto, siano essi vagliatura, triturazione, essiccamento, etc., così come tutti i (post-) trattamenti dei residui solidi, devono essere considerati esterni all'unità d'incenerimento alla quale riferirsi per l'applicazione della formula R1;
- per i sistemi ibridi, basati cioè sull'integrazione di unità d'incenerimento con turbine a gas, cicli a vapore alimentati con combustibili convenzionali, etc., è necessario tracciare il perimetro dell'unità d'incenerimento in modo da escludere tali cicli convenzionali (si veda oltre la trattazione relativa al termine  $E_P$ );
- particolare attenzione deve essere dedicata a tracciare il perimetro dell'unità d'incenerimento in modo da escludere tutte le installazioni al di fuori della responsabilità del gestore dell'impianto di incenerimento;
- il discrimine tra l'inclusione o meno del gruppo turboalternatore all'interno di un'unità di incenerimento è mutuato dal concetto di unità tecnica utilizzato nella definizione di "impianto di incenerimento" in accordo con l'art. 3(4) della *WID*;
- tutti i combustibili, convenzionali o rifiuti, che concorrono alla determinazione dei vari termini della formula R1, devono essere quantificati con riferimento alla convenzione del Potere Calorifico Inferiore (PCI);
- tutti i contributi energetici di natura elettrica e tutti quelli di natura termica che concorrono alla determinazione dei vari termini della formula R1 devono essere "pesati" rispettivamente mediante i due fattori "2,6" e "1,1", che assumono quindi il ruolo di coefficienti di conversione delle due forme d'energia in termini di energia primaria (espressa su base PCI).

Da queste considerazioni generali discende l'importanza della definizione dell'unità di incenerimento e del perimetro che la descrive. Mediante tale confine, è infatti possibile identificare i flussi energetici  $E_F$ ,  $E_I$  ed  $E_W$ .

La seguente Figura 1.1 esemplifica una comune definizione di unità d'incenerimento applicabile alla maggior parte degli impianti esistenti.



**Figura 1.1:** Schema esemplificativo che definisce l'unità d'incenerimento ai fini dell'applicazione della formula R1 come un sottoinsieme dell'impianto d'incenerimento. I termini  $E_F$ ,  $E_I$  ed  $E_W$  sono identificati contestualmente alla definizione del confine dell'unità d'incenerimento. Il termine  $E_P$ , invece, oltre a includere tutta l'energia prodotta ed esportata dall'unità d'incenerimento che trova un impiego utile ( $E_{P,R1,exp}$  - si veda il testo), include anche parte dell'energia prodotta che è utile impiegata all'interno della stessa unità d'incenerimento ( $E_{P,circ}$ ). Non include, invece, quella parte dell'energia prodotta il cui impiego influenza direttamente la produzione stessa di energia ( $E_{non-P}$ ).

Nel caso in cui un impianto comprenda sia linee d'incenerimento degli RSU, come definite in precedenza, sia linee dedicate al trattamento di altre tipologie di rifiuti, solo le prime sono soggette all'applicazione della formula R1. In questa situazione, se è presente un unico ciclo a vapore, comune alle diverse tipologie di linee, è necessario definire la/e unità d'incenerimento escludendo il turboalternatore. Per tali unità d'incenerimento, l'effetto utile del recupero energetico che concorre alla determinazione del termine  $E_P$  sarà l'intera produzione di vapore, eventualmente epurata di un'opportuna quota, secondo le precisazioni discusse oltre.

Una situazione analoga può verificarsi in presenza di linee d'incenerimento soggette a soglie differenti per l'indice R1, in conseguenza alle differenti date di autorizzazione ed entrata in esercizio.

Alcuni casi esemplificativi sono trattati nel successivo § 5.6.

I paragrafi che seguono riportano alcune precisazioni puntuali sui vari termini della formula R1.

## 1.1 Il termine $E_P$

Questo termine quantifica l'energia prodotta, ossia prodotta e utilmente impiegata. 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.

Tutta l'energia esportata dall'unità d'incenerimento, come precedentemente definita (flusso  $E_{P,R1,exp}$  in Figura 1.1), deve essere conteggiata nel computo di questo termine ogni qualvolta trovi un reale impiego, secondo l'accezione testé esposta. Per l'energia che è impiegata all'interno dell'unità d'incenerimento è, invece, necessario fornire ulteriori precisazioni.

Le linee guida europee elencano diversi impieghi d'energia all'interno dell'unità d'incenerimento come da considerare nel computo del termine  $E_P$ . Dall'analisi di tale elenco e alla luce del testo di spiegazione, si evince che quasi tutti i possibili impieghi interni dell'energia elettrica e termica prodotte siano da includere nel computo di  $E_P$ . Considerando quindi che tutta l'esportazione utilmente impiegata ( $E_{P,R1,exp}$ ) e la quasi totalità degli impieghi interni contribuiscono a  $E_P$ , si può affermare che tale termine deve conteggiare le intere produzioni lorde di energia elettrica e termica con la sola eccezione, specificata dalle linee guida europee, degli utilizzi che influenzano la produzione di vapore (flusso  $E_{non-P}$  in Figura 1.1).

Per via di questa eccezione, tra i possibili impieghi dell'elettricità e del calore prodotti da considerare nel computo di  $E_P$ , elencati nell'Allegato 3a delle linee guida europee, non compaiono: i consumi di vapore per alimentare i pre-riscaldatori dell'aria di combustione, i pre-riscaldatori rigenerativi del condensato, tra i quali il degasatore, etc.

Il principio di escludere gli impieghi dell'energia prodotta che influenzano la produzione di vapore è giustificata, dal punto di vista fisico, con l'evitare doppi conteggi del medesimo effetto utile: per esempio, nel caso del pre-riscaldamento dell'aria di combustione, si genera un aumento della produzione di vapore pari al consumo di vapore per il pre-riscaldamento stesso; di conseguenza, il vapore utilizzato a tale fine non sostituisce alcuna altra fonte energetica altrimenti richiesta.

In linea generale, tutti i consumi energetici legati ai dispositivi di manipolazione dell'aria di combustione, dei fumi, delle condense e dell'acqua alimento (ventilatori, pompe, etc.) influenzano la produzione di vapore. Si consideri che un ventilatore di tiraggio sulla linea fumi può indurre un aumento di temperatura anche superiore a 5 °C. Si ritiene, tuttavia, che il principio d'esclusione si applichi solo agli impieghi dell'elettricità e del calore prodotti che comportano l'introduzione diretta di energia termica (calore) a correnti di fluidi dalle quali è successivamente recuperato calore a beneficio della produzione degli effetti utili (elettricità, calore, ...). In questa logica, i ventilatori e le pompe hanno lo scopo di introdurre energia meccanica nelle correnti fluide trattate e anche se tale energia è inevitabilmente degradata alla forma termica (per via delle irreversibilità termodinamiche), influenzando sicuramente sulla produzione di vapore, i consumi associati non devono essere sottratti alle produzioni lorde nel computo di  $E_P$ . Secondo la medesima logica, è, invece, da sottrarre l'eventuale consumo d'elettricità da parte di riscaldatori elettrici dell'aria di combustione.

Un altro esempio di limitazione all'applicazione del principio d'esclusione riguarda i soffiatori di fuliggine a vapore. Anche in questo caso, il consumo di vapore ha lo scopo d'introdurre energia

meccanica nei fumi, nonostante contestualmente degradata alla forma termica. Tale consumo sostituisce, inoltre, l'impiego di altre fonti energetiche che sarebbero state richieste per ottenere il medesimo risultato di pulire le superfici di scambio della caldaia: potrebbe essere il maggiore consumo d'elettricità del sistema dell'aria compressa, se fossero impiegati soffiatori ad aria, oppure il consumo elettrico di sistemi a martelli, se si ricorresse a siffatto sistema di percussione. Anche il consumo di vapore da parte di eventuali soffiatori, quindi, non deve essere sottratto alle produzioni lorde nel computo di  $E_P$ .

Alcuni esempi riportati nell'Allegato 3a delle linee guida europee non approfondiscono adeguatamente l'analisi delle casistiche associate. Per esempio, tra gli impieghi di vapore da contabilizzare in  $E_P$  è citato l'uso per il riscaldamento dei fumi lungo la linea di trattamento. Le linee guida europee assumono che tale consumo di vapore concorra sempre al termine  $E_P$ . Tuttavia, esaminando le diverse casistiche riscontrabili nelle unità d'incenerimento e applicando i principi di sostituzione di un'altra fonte energetica e influenza sulla produzione degli effetti utili, si conclude che la situazione è ben più articolata. Una disamina puntuale delle diverse casistiche è presentata nel § 5.5, al quale si rimanda per approfondire il tema.

Le linee guida europee trattano ampiamente la valutazione del calore associato a flussi materiali, quali vapore e/o acqua calda, in presenza o meno di flussi di ritorno. Anticipando quanto trattato nel successivo § 4, si esprime l'energia specifica associata a un flusso materiale mediante l'entalpia, una grandezza di stato termodinamica che dipende dalla pressione (assoluta) e dalla temperatura. Per l'acqua/vapore i valori di entalpia nelle varie condizioni possono essere facilmente reperite in forma tabellare, oppure mediante appositi software, spesso anche freeware.

In generale, identificati tutti i flussi materiali di "mandata" (indicati col pedice "OUT"), ossia quelli che portano l'eventuale vapore/acqua calda a soddisfare gli impieghi utili, nonché gli eventuali flussi di "ritorno" (indicati col pedice "IN"), che riportano condense e altri cascami all'unità d'incenerimento, il calore a essi complessivamente associato è:

$$E_{T,R1,flussi} = \sum_i (M_{OUT,i} \cdot h_{OUT,i}) - \sum_j (M_{IN,j} \cdot h_{IN,j}) - (\sum_j M_{IN,j} - \sum_i M_{OUT,i}) \cdot h_0 \quad (1.3)$$

Dove i simboli "M" rappresentano i quantitativi annui complessivi dei vari flussi, i simboli "h" le corrispondenti entalpie medie e "h<sub>0</sub>" l'entalpia dell'acqua di reintegro, nel comune caso in cui  $\sum_j M_{IN,j} < \sum_i M_{OUT,i}$ , oppure dell'acqua di spurgo, nel caso più inusuale in cui  $\sum_j M_{IN,j} > \sum_i M_{OUT,i}$ . L'equazione (1.3) può essere utilizzata ogni qualvolta il sistema di mandata-ritorno del fluido termovettore (tipicamente vapore-acqua) sia sbilanciato, ossia caratterizzato dalla presenza di un reintegro, ovvero di uno spurgo. Quando tale circostanza non è verificata, deve risultare  $\sum_j M_{IN,j} = \sum_i M_{OUT,i}$ , ossia l'ultimo addendo dell'equazione 1.3 deve essere identicamente nullo, pena l'introduzione di un errore nella quantificazione dell'energia  $E_{T,R1,flussi}$ . Se in assenza di reintegro / spurgo il circuito non è bilanciato, sono evidentemente presenti errori di misura delle portate da sistemare mediante riconciliazione dei dati prima di procedere oltre.

## 1.2 Il termine $E_F$

Il termine  $E_F$  quantifica unicamente il consumo di combustibili ausiliari al fine di contribuire alla produzione di vapore utilmente impiegato. Tali combustibili non possono essere sostanze classificate come rifiuti, anzi devono essere conformi alla Direttiva 2009/30/EC circa la qualità dei combustibili. L'eventuale impiego di olio esausto come combustibile ausiliario non deve essere conteggiato in  $E_F$ , bensì in  $E_W$ , poiché trattasi di rifiuto. Analogamente per l'impiego di CDR/CSS (salvo che abbia raggiunto la condizione di "end-of-waste", come nel caso del "CSS combustibile"). Le linee guida europee 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". Questa definizione, che fa chiaramente riferimento ai termovalorizzatori inseriti in centrali a vapore più estese (tipiche del Centro-Nord-Europa), può essere tradotta, per un termovalorizzatore con turbina a vapore dedicata, nel combinato delle seguenti due condizioni:

- che l'utilizzo del combustibile ausiliario sia contestuale e contribuisca alla produzione di vapore;
- che tale produzione di vapore generi effetti che contribuiscono al termine  $E_P$  (nel caso più semplice arrivi in turbina, ovvero sia utilizzata per fornire energia termica venduta oppure utilizzata nell'impianto in modo conforme alle disposizioni circa il termine  $E_P$ ).

Tutto il combustibile utilizzato nei bruciatori di sostentamento, durante la marcia dell'impianto, deve normalmente essere conteggiato in  $E_F$ .

In  $E_F$  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  $E_P$ . In assenza di registrazioni puntuali, che permettano di distinguere se il consumo sia contestuale o meno alla produzione di  $E_P$ , le linee guida europee prevedono la possibilità di conteggiare in modo forfettario in  $E_F$  il 50% del combustibile utilizzato nelle fasi d'avviamento e fermata.

Le linee guida europee non chiariscono adeguatamente, a parere di chi scrive, il tema degli utilizzi di combustibile ausiliario per il riscaldamento dei fumi lungo la linea di trattamento. Aderendo ai principi che ispirano la distinzione tra  $E_F$  ed  $E_I$ , si ritiene che debbano essere conteggiati in  $E_F$  anche tali consumi, qualora il riscaldamento dei fumi sia seguito da un successivo recupero di calore che contribuisce alla produzione di effetti utili conteggiati in  $E_P$ . Tali consumi saranno invece computati in  $E_I$  negli altri casi (cioè in assenza di recupero termico a valle, oppure in presenza di recupero termico che non contribuisce alla produzione di effetti utilmente impiegati – per esempio: recupero costituito dal solo riscaldamento dei fumi mediante uno scambiatore gas-gas, o con anello d'acqua, etc.).

La seguente Tabella 1.1 identifica il termine della formula R1 al quale contribuisce la spesa energetica per il riscaldamento dei fumi lungo la linea di trattamento a seconda della tipologia di fonte energetica impiegata e della presenza o meno di recupero termico a valle del punto d'introduzione. Tale Tabella rappresenta il sommario della trattazione svolta nel successivo § 5.5.

**Tabella 1.1: Identificazione del termine della formula R1 al quale contribuisce la spesa energetica per il riscaldamento dei fumi lungo la linea di trattamento a seconda della tipologia di fonte energetica impiegata e della presenza o meno di recupero termico a valle del punto d'introduzione.**

Fonte energetica	Contribuisce al termine	
	in presenza di recupero a valle <sup>(1)</sup>	in assenza di recupero a valle
Combustibile ausiliario	$E_F$	$E_I^{(2)}$
Vapore autoprodotta	Nessuno	$E_P$

<sup>(1)</sup> oppure quando il recupero effettuato non contribuisce alla produzione di effetti utilmente impiegati, come nel caso del solo riscaldamento dei fumi mediante uno scambiatore gas-gas, o con anello d'acqua, etc.

<sup>(2)</sup> oppure anche in presenza di recupero a valle, purché non contribuisca alla produzione di effetti utilmente impiegati.

### 1.3 Il termine $E_I$

Il termine  $E_I$  quantifica tutte le altre importazioni di energia all'interno dell'unità d'incenerimento che non sono conteggiate in  $E_F$  ed  $E_W$ . Si tratta dei vari consumi di combustibile che non contribuiscono alla produzione di vapore utilmente impiegato (cfr. paragrafo precedente), così come le importazioni di elettricità finalizzate a soddisfare fabbisogni del processo di trattamento termico. Le importazioni di energia (elettricità, combustibili, calore) che non concorrono al trattamento dei rifiuti, ovvero alle fasi propedeutiche e conclusive dello stesso, non sono neppure da conteggiare nel termine  $E_I$ . Tipici esempi sono rappresentati dall'elettricità importata dalla rete elettrica durante le fermate di manutenzione, così come i consumi di combustibile per i gruppi elettrogeni in uso per alimentare l'impianto nei periodi di manutenzione, quando tutte le unità d'incenerimento sono ferme.

Tutti i flussi di ritorno associati a forniture di calore mediante flussi di vapore/acqua calda non devono essere conteggiati in  $E_I$ , in quanto già detratti nel computo di  $E_P$ .

### 1.4 Il termine $E_W$

Il termine  $E_W$  quantifica l'energia associata al rifiuto trattato dall'unità d'incenerimento. Come per tutte le altre sostanze (combustibili) considerate, tale energia è quantificata in termini di Potere Calorifico Inferiore (PCI).

Le linee guida europee specificano che il termine  $E_W$  si riferisce alla totalità del rifiuto trattato e non solo alla frazione di RSU. Ciò vale anche quando l'unità d'incenerimento tratta quantitativi anche rilevanti di rifiuti che non sono RSU.

Le linee guida europee affermano che la quantificazione del PCI medio annuo del rifiuto complessivamente trattato non può basarsi su analisi a campione, trattandosi di un metodo che richiederebbe una frequenza di campionamento insostenibile per fornire risultati statisticamente rappresentativi (cioè sufficientemente affidabili).

Il metodo di quantificazione suggerito è, invece, basato sul bilancio dell'energia della caldaia, ispirato alla norma EN 12952-15 per i test d'accettazione dei generatori di vapore a tubi d'acqua alimentati a combustibili solidi.

I §§ 2, 3 e 4 di questo documento illustrano dal punto di vista operativo tale metodo e la sua applicazione.

### 1.5 Il fattore climatico 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”):

$$CCF = 1,00 \quad \text{se } HDD \geq 3.350$$

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

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

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”):

$$CCF = 1,00 \quad \text{se } HDD \geq 3.350$$

$$CCF = 1,12 \quad \text{se } HDD \leq 2.150$$

$$CCF = - (0,12/1.200) \times HDD + 1,335 \quad \text{quando } 2.150 < HDD < 3.350$$

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:

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

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

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

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

Il recepimento italiano di tale normativa (DM del MATTM n. 134 del 19/05/2016, che ha modificato la nota dell'Allegato C alla parte IV del Dlgs 152/2006 che riporta la definizione dell'indice R1) precisa che i dati climatici necessari per determinare gli *HDD* e, successivamente, *CCF* devono provenire da una stazione meteorologica rappresentativa del sito in cui insiste l'impianto considerato, con preferenza per le stazioni dell'Aeronautica Militare.

La seguente Figura 1.2 mostra l'andamento del fattore di correzione climatica *CCF* secondo le due definizioni europee "EU1" ed "EU2".

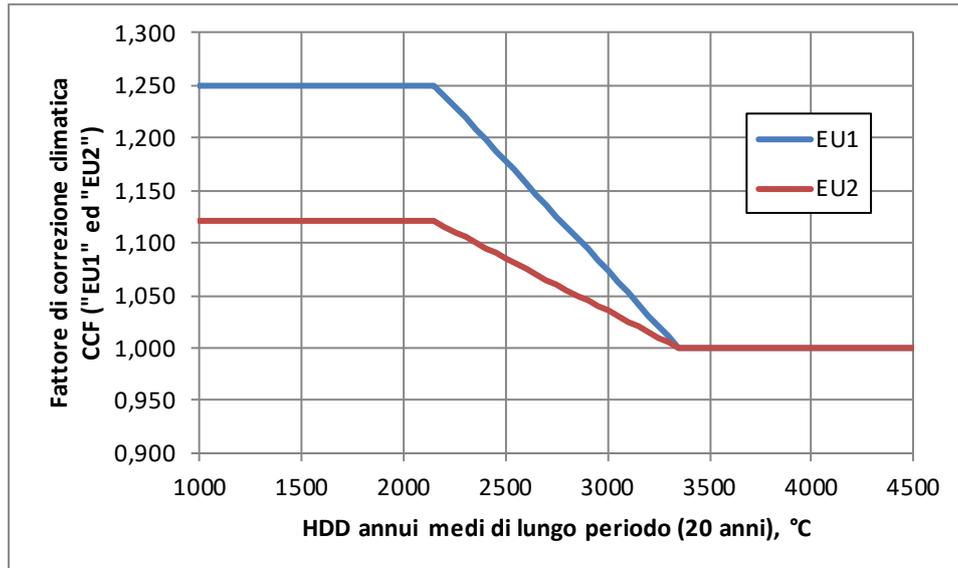


Figura 1.2: Andamenti del fattore di correzione climatica "CCF" secondo le due definizioni europee: "EU1" ed "EU2".

## 2 La determinazione del termine $E_w$

Quale migliore metodo per la quantificazione del termine  $E_w$ , le linee guida europee indicano il bilancio dell'energia di un opportuno volume di controllo, più piccolo di quello identificato come "unità d'incenerimento" (Figura 1.1), che deve comprendere il sistema combustore/i-caldaia/e, nonché eventuali altri sistemi ausiliari a seconda dell'opportunità.

Le linee guida europee fanno riferimento a due documenti<sup>3</sup>, uno tedesco e l'altro francese, ispirati alla norma tecnica EN 12952-15 (del 2003, recepita in Italia come UNI EN 12952-15 e in vigore dal 1° maggio 2005) "Caldaie a tubi d'acqua e installazioni ausiliarie - Parte 15: Prove di accettazione". La norma EN esclude esplicitamente dal proprio campo d'applicazione i generatori di vapore alimentati da rifiuti. I due documenti richiamati, invece, estendono le prescrizioni della norma EN anche a tali casi, sempre nell'ottica delle prove prestazionali per l'accettazione / collaudo di generatori di vapore.

In questa sede, facendo prevalente riferimento alla norma EN, oltre a estendere la trattazione ai generatori di vapore alimentati da rifiuti, in analogia ai due documenti citati, si riformula il metodo di valutazione per l'applicazione diretta a un intero anno d'esercizio. Il cambiamento del periodo temporale di riferimento non comporta semplicemente il passaggio da unità di misura medie su poche ore d'esercizio controllato a valori integrali su un intero anno, bensì introduce la necessità di tenere in debito conto anche aspetti comunemente evitati / trascurati durante un test di accettazione / collaudo, ma presenti e – a volte – anche significativi, in un esercizio annuale. È il caso, per esempio, dello spurgo del circuito del vapore, di operazioni di pulizia ad acqua della caldaia, etc.

Il principio base per la determinazione del termine  $E_w$  consiste nel considerare il sistema combustore-caldaia alla stregua di un calorimetro, utilizzando le misurazioni effettuate dalla strumentazione d'impianto per determinare il contenuto energetico dei rifiuti trattati (cioè il corrispondente PCI).

Le linee guida europee offrono anche la possibilità, considerata eccezionale, di determinare il PCI del rifiuto trattato mediante una relazione empirica fornita dal *BREF WI* (EC, nella versione dell'agosto 2006), a patto che tale formula sia stata adattata e calibrata al caso specifico mediante un preventivo bilancio dell'energia iniziale.

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.

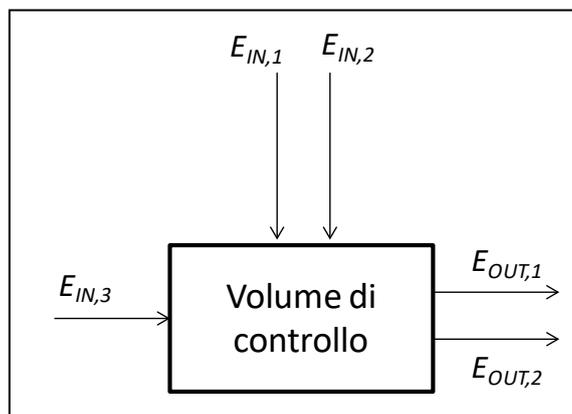
### 2.1 La norma tecnica EN 12952-15

La norma tecnica EN 12952-15 riguarda le prove d'accettazione normalmente pattuite contrattualmente tra il fornitore / costruttore di una caldaia a tubi d'acqua e il committente / acquirente. Rientra nella nutrita famiglia delle norme EN 12952 relativa ai vari aspetti progettuali, realizzativi e operativi delle caldaie a tubi d'acqua.

---

<sup>3</sup> Si tratta del documento dello FDBR (nella versione del 2000, ora superata dalla nuova edizione 2013), disponibile in Tedesco e Inglese, e del documento dello RF (2008), disponibile esclusivamente in Francese.

Nel contesto del presente documento, 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 seguente Figura 2.1 e dalla successiva Eq. 2.1.



**Figura 2.1:** 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. 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.

$$\begin{aligned} \sum_{INPUTS}(E_{IN,i}) &= \sum_{OUTPUTS}(E_{IN,j}) \\ \Rightarrow E_{IN,X} &= \sum_{OUTPUTS}(E_{IN,j}) - \sum_{INPUTS \neq X}(E_{IN,i}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

La Figura e l'equazione associata mostrano come la realizzazione del bilancio dell'energia consista nell'imporre che la somma di tutti i flussi energetici entranti nel volume di controllo considerato eguagli la somma di tutti i flussi energetici uscenti. Di conseguenza, se uno dei flussi energetici entranti è incognito, esso può essere determinato conoscendo tutti gli altri flussi entranti e uscenti mediante l'Eq. 2.1.

Nel caso del metodo indiretto per il calcolo del rendimento di 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 ed è, quindi, determinata mediante l'Eq. 2.1.

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.

Propedeutica alla realizzazione del bilancio dell'energia è la realizzazione del bilancio di massa. Infatti, molti flussi energetici sono associati a flussi materiali: l'esempio lampante è rappresentato dal combustibile, un flusso materiale al quale corrisponde il flusso energetico principale di una caldaia a combustione.

Il flusso energetico associato a un flusso materiale è comunemente valutato come prodotto dell'entità del flusso (per esempio la massa di combustibile consumato, oppure il volume di fumi scaricato nel periodo considerato) per il contenuto specifico d'energia.

Nel caso dei rifiuti, l'entità del flusso è misurata dalla massa di rifiuti trattata nell'anno, mentre il contenuto specifico d'energia è comunemente espresso mediante il Potere Calorifico Inferiore (PCI) medio nel periodo considerato.

La preventiva verifica del bilancio di massa è quindi cruciale affinché i flussi energetici che concorrono al bilancio dell'energia siano quantificati correttamente.

Atteso che la norma EN 12952-15, considerando solo la fase di collaudo, disciplina genericamente la stesura del bilancio di massa del generatore di vapore, il Capitolo 3 di questa trattazione è teso a fornire una rigorosa metodologia di valutazione di tale bilancio, applicabile su base annua. Infatti, la redazione del bilancio di massa del sistema combustore/i-caldaia/e su un intero esercizio annuale, basandosi sulle registrazioni effettuate dalla strumentazione d'impianto, considera una situazione molto più articolata di quella di un collaudo.

La norma EN 12952-15 prende in considerazione periodi di alcune ore di funzionamento stazionario del combustore-caldaia, mentre questa metodologia fa riferimento a un anno d'esercizio inclusivo di tutti i regimi di funzionamento sperimentati.

Da un lato il riferimento all'intero anno d'esercizio introduce alcune semplificazioni, come la superfluità d'assicurare le medesime condizioni del sistema all'inizio e alla fine della prova (stesso livello dell'acqua nel cilindro del vapore, stesso quantitativo di materiale combustibile presente nel combustore, etc.). Altresì, riduce l'influenza dei risultati da aspetti difficilmente quantificabili sul breve periodo, come la produzione di scorie e ceneri.

Dall'altro lato, riferirsi a un esercizio annuo impone di considerare anche aspetti del funzionamento del sistema combustore/i-caldaia/e trascurati dalla norma EN 12952-15, come l'intervento dei sistemi di pulizia caldaia (soffiatori, spruzzatori d'acqua, etc.), lo spurgo del sistema acqua/vapore, etc.

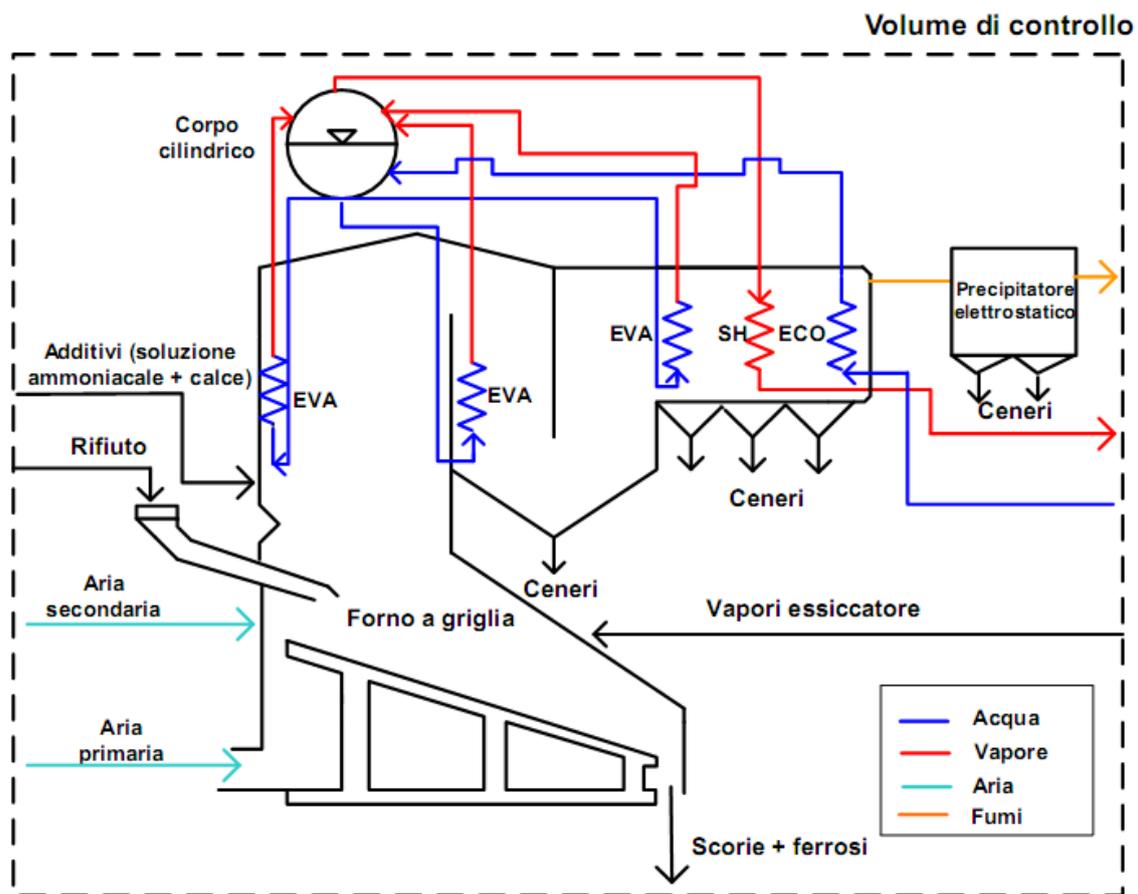
## ***2.2 Il volume di controllo della caldaia***

I bilanci di massa e dell'energia richiesti per la determinazione del rendimento di caldaia con il metodo indiretto consistono in sommatorie algebriche, complessivamente nulle (chiusura dei bilanci), di vari termini che rappresentano rispettivamente i quantitativi delle varie sostanze e i flussi energetici scambiati dal volume di controllo con il rimanente impianto circostante e l'ambiente esterno.

Mediante il proprio confine, il volume di controllo identifica, pertanto, i flussi materiali e i flussi energetici da considerarsi addendi delle sommatorie testé menzionate (si tratta del concetto rappresentato in Figura 2.1 e tradotto dall'Eq. 2.1, relativo al bilancio dell'energia). Il principio è analogo a quello applicato nel precedente § 1 per la definizione dei flussi energetici  $E_F$ ,  $E_I$  ed  $E_W$  che compaiono come termini nella formula R1.

Per limitare il numero di addendi di tali sommatorie, il volume di controllo deve essere il più piccolo possibile, compatibilmente con la disponibilità di dati che caratterizzano la sua interazione con la rimanente porzione dell'impianto e con l'ambiente circostante (cioè la misura / possibilità di quantificazione dei flussi di materia e di energia che individua). Normalmente, il volume di controllo ai fini della determinazione del rendimento di caldaia e, quindi, dell'energia associata al rifiuto trattato, è contenuto all'interno del volume di controllo che definisce l'unità d'incenerimento. Questo volume di controllo, di solito, contiene il sistema combustore/i-caldaia/e e pochi altri dispositivi ausiliari strettamente interconnessi.

La seguente Figura 2.2 rappresenta schematicamente la comune definizione del volume di controllo per una tipologia di combustore-caldaia molto diffusa.



**Figura 2.2: Rappresentazione schematica di un possibile volume di controllo per il sistema combustore/i-caldaia/e di un termovalorizzatore per rifiuti urbani a griglia. Tutti i flussi materiali intersecati dal confine del sistema compaiono come addendi nel bilancio di massa. Il bilancio dell'energia include anche flussi energetici non legati a flussi di materia (come le perdite per convezione e irraggiamento) che non sono qui rappresentati.**

Nei successivi §§ 3 e 4, il volume di controllo definito intorno al sistema combustore/i-caldaia/e è ulteriormente suddiviso in due sotto-volumi, chiamati "lato acqua / vapore" e "lato rifiuti / fumi". Tale addizionale suddivisione è giustificata dalla necessità di porre in evidenza i flussi d'accoppiamento tra i due sotto-volumi, segnatamente il calore netto scambiato, che è una grandezza fondamentale per la quantificazione dell'energia introdotta con i rifiuti (cioè il termine  $E_W$  della formula R1). Il confine di separazione tra questi due sotto-volumi è definito dalla

superficie fisica di contenimento del fluido termo-vettore (le pareti dei tubi, gli organi fisici delle macchine, etc.).

### **2.2.1 Il periodo di funzionamento**

Per formulare correttamente i bilanci di massa e di energia del sistema combustore/i-caldiaia/e, occorre considerare che il confine del volume di controllo non è un concetto puramente spaziale, bensì anche temporale. Realizzando bilanci su un intero esercizio, infatti, è fondamentale individuare quali periodi concorrono alla definizione dei totali annui (per le grandezze estensive) o dei valori medi annui (per le grandezze intensive). In presenza di impianti che comprendono più linee di trattamento, tali periodi possono essere - e normalmente sono - differenziati per le diverse linee dell'impianto.

Un maggior dettaglio nella definizione dei periodi di funzionamento consente anche di definire propriamente l'utilizzo di combustibili ausiliari, ossia la quota che contribuisce alla produzione di effetti utili e quindi al termine  $E_F$  della formula R1, piuttosto della rimanente quota che non contribuisce alla produzione di effetti utili ed è, pertanto, computata nel termine  $E_L$ .

Infine, l'import di energia quando non è in corso l'operazione di trattamento dei rifiuti, né le fasi propedeutiche o conclusive della stessa, non deve essere considerato nell'applicazione della formula R1. Tale formula classifica, infatti, l'operazione di trattamento e non l'impianto. I consumi energetici per la manutenzione dell'impianto non devono essere considerati, poiché non direttamente riconducibili al trattamento dei rifiuti.



### 3 Il bilancio di massa della caldaia

Il volume di controllo della caldaia, definito al precedente § 2.2 è ulteriormente suddiviso, in questo Capitolo, in due sotto-volumi: il lato acqua (o, più in generale, fluido termo-vettore) e il lato fumi. Mentre il bilancio di massa del primo di questi due sotto-volumi è relativamente agevole, per il lato fumi è necessario adottare diverse accortezze relative alla quantificazione dei vari flussi in uscita e in ingresso da tale sotto-volume, che sono descritte nei vari paragrafi che seguono. L'applicazione di questi accorgimenti è, poi, ulteriormente discussa nel conclusivo § 3.9, dove il bilancio di massa lato fumi è risolto.

#### 3.1 Il bilancio di massa del lato acqua della caldaia

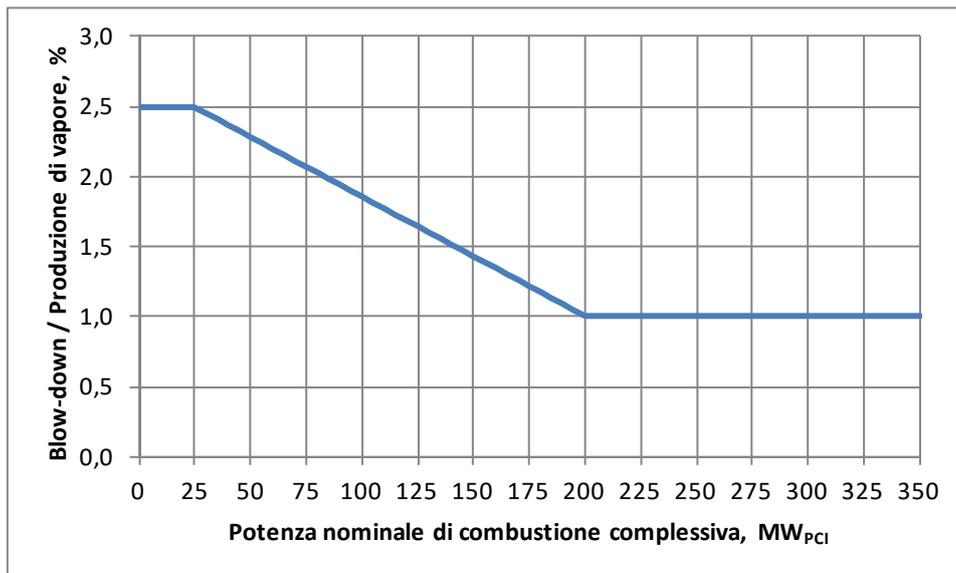
Il bilancio di massa del fluido termo-vettore della caldaia (solitamente acqua/vapore) è relativamente semplice, includendo un numero limitato d'ingressi/uscite:

- l'acqua d'alimento in ingresso alla sezione di economizzazione;
- l'acqua d'attemperamento qualora derivata prima della misura dell'acqua d'alimento;
- il vapore prodotto;
- lo spurgo del corpo cilindrico (il c.d. "blow-down");
- eventuali flussi di vapore derivati prima della misurazione del vapore complessivamente prodotto (per esempio: estrazioni di vapore dal corpo cilindrico per alimentare preriscaldatori d'aria, soffiatori di fuliggine, etc.).

Normalmente, la produzione annua di vapore e il consumo annuo d'acqua d'alimento sono registrati. Nel caso in cui non siano registrati eventuali consumi di vapore estratti direttamente dal corpo cilindrico, è necessario stimarne l'entità.

Lo spurgo del corpo cilindrico non è, di norma, misurato, ma per impianti di termovalorizzazione può essere assunto pari a una frazione della produzione complessiva di vapore compresa tra l'1,0 e il 2,5%, a seconda della taglia dell'impianto. Per cicli termici alimentati con potenza nominale di combustione complessiva pari o inferiore a 25 MW su base PCI, vale il limite superiore, mentre per potenze di combustione superiori a 200 MW<sub>PCI</sub>, si può adottare il limite inferiore. Per taglie intermedie è consigliata un'interpolazione lineare tra i valori suggeriti, come illustrato nella seguente Figura 3.1.

Per "potenza nominale di combustione complessiva" si intende la somma di tutte le potenze di combustione di targa delle caldaie che alimentano il medesimo ciclo a vapore. Nel caso di cicli a vapore a condensazione non cogenerativi, la potenza di combustione di 25 MW<sub>PCI</sub> corrisponde indicativamente a una potenza elettrica lorda di 5 MW, mentre la potenza di combustione di 200 MW<sub>PCI</sub> corrisponde all'incirca alla potenza elettrica lorda di 60 MW.



**Figura 3.1:** Grafico indicativo del rapporto tra *blow-down* e produzione di vapore in funzione della potenza nominale di combustione complessiva che alimenta il ciclo a vapore. Valido per i cicli a vapore dei termovalorizzatori di rifiuti urbani.

La chiusura del bilancio di massa consiste nell'imporre che la somma di tutti gli ingressi corrisponda esattamente alla somma di tutte le uscite: questo aspetto assume importanza cruciale affinché il successivo bilancio dell'energia restituisca valori rappresentativi.

Spesso, le registrazioni delle produzioni e dei consumi sono disponibili in termini di portate orarie, secondo un'opportuna frequenza di campionamento. Per determinare i corrispondenti consumi / produzioni annui, si faccia riferimento alla procedura descritta nel successivo § 3.3.5.

Normalmente, l'acqua alimento e il vapore prodotto sono i due flussi di gran lunga maggiori in termini quantitativi. Partendo dalle misure di portata di tali flussi, si giunge spesso a situazioni incongruenti, poiché piccole incertezze relative associate dalle due misure di portata si traducono in incertezze assolutamente inaccettabili sulla differenza di tali misure cumulata su un intero esercizio. Tale differenza costituisce il termine di chiusura del bilancio di massa e, pertanto, nasce la necessità di riconciliare i dati per ottenere una soluzione fisicamente possibile.

L'approccio suggerito dalla norma EN 12952-15 consiste nel privilegiare la misura della portata di vapore – più accurata, poiché normalmente effettuata con misuratori a boccaglio – rispetto alla misura della portata dell'acqua alimento – solitamente basata su meno accurati e più soggetti a usura misuratori a diaframma. In questo quadro, l'approccio qui suggerito consiste nel riconciliare il bilancio di massa acqua/vapore ritenendo valida la misura della portata di vapore, valutando / stimando tutti gli input/output minoritari del circuito e ricalcolando, con la chiusura del bilancio, la quantità d'acqua alimento consumata.

L'esempio completo di calcolo dell'indice R1 per un termovalorizzatore di RSU, riportato nel successivo § 5.2, include anche lo svolgimento del bilancio di massa del lato acqua/vapore secondo le indicazioni sopra riportate.

### 3.2 *Impostazione del bilancio di massa lato fumi*

Definendo il volume di controllo del combustore-caldaia in modo analogo allo schema rappresentato in Figura 2.2, si individuano diversi flussi materiali che possono essere classificati secondo quattro categorie, sulla base del procedimento richiesto per valutarne l'entità:

1. flussi d'entità nota, poiché solitamente misurata con sufficiente accuratezza (come il combustibile ausiliario o i vari reagenti introdotti in caldaia);
2. flussi la cui entità deve essere necessariamente stimata, poiché non misurati (come l'acqua di reintegro dei bagni di spegnimento scorie);
3. flussi la cui entità deve essere derivata sulla base di varie misurazioni effettuate anche al di fuori del volume di controllo (come i fumi);
4. flussi d'entità incognita, poiché non misurati o misurati con grande approssimazione (è il caso dell'aria di combustione).

I flussi della seconda e della quarta categoria non differiscono concettualmente gli uni dagli altri, ma sono volutamente raggruppati separatamente poiché è preferibile stimare in modo approssimativo i flussi di piccola entità (quelli della seconda categoria) e valutare, invece, mediante il bilancio di massa, l'entità dei flussi maggiori (quelli della quarta categoria).

I flussi materiali principali (cioè di maggiore entità) che entrano / escono dal volume di controllo lato fumi del sistema combustore-caldaia sono (in ordine di consistenza):

1. i fumi (in uscita);
2. l'aria di combustione (in ingresso);
3. i rifiuti trattati (in ingresso);
4. i residui solidi (in uscita).

Il terzo e il quarto flusso appartengono alla prima categoria, sono, cioè, normalmente misurati con sufficiente accuratezza.

Il primo flusso appartiene alla terza categoria, ossia è necessario valutarne l'entità sulla base di varie misurazioni effettuate in diversi punti dell'impianto.

L'entità del secondo flusso costituisce l'incognita principale del bilancio di massa. Infatti, anche quando l'aria di combustione è misurata con sufficiente accuratezza, il sistema combustore-caldaia presenta sempre degli ingressi d'aria non voluti / non controllati, causati dal fatto che il sistema è normalmente mantenuto in depressione rispetto all'ambiente circostante.

Una problematica rilevante in tema di realizzazione del bilancio di massa è rappresentata dal fatto che l'entità dei fumi (cioè l'addendo principale del bilancio di massa) è normalmente misurata in termini volumetrici. Per poter valutare il bilancio di massa, è normalmente necessario convertire tale quantità in termini massici, il che è concettualmente possibile conoscendo la massa molare dei fumi, che può essere calcolata in base alla composizione degli stessi.

Dal punto di vista pratico, la procedura delineata risulta, però, poco perseguibile, poiché fortemente mal condizionata: le incertezze associate ai dati di partenza (volume di fumi, concentrazioni dei costituenti principali) vengono amplificate durante la sequenza dei calcoli, portando a risultati irrealistici.

Se fossero presenti molte più misurazioni di quelle strettamente necessarie allo svolgimento dei calcoli, sarebbe possibile tentare un approccio di valutazione basato sulla riconciliazione dei dati, in modo da controllare la propagazione delle incertezze di misura verso i risultati. Nei termovalorizzatori di rifiuti, però, le misure disponibili sono poco più numerose del minimo indispensabile, precludendo, di fatto, anche la via della riconciliazione, con la conseguente necessità di seguire un approccio alternativo.

Si propone, in questa sede, di introdurre un modello descrittivo del rifiuto dal punto di vista della produzione volumetrica di fumi e del consumo volumetrico dell'aria di combustione (§ 3.5).

Tale modello è caratterizzato da un certo numero di parametri, che lo rendono adattabile a qualsiasi tipologia di rifiuto. Considerando questo modello di rifiuto, il bilancio di massa è applicato nella forma di più bilanci di componenti indipendenti che concorrono al bilancio di massa complessivo. Ciò in quanto il bilancio di massa può essere considerato la somma di un certo numero di bilanci delle varie specie atomiche che costituiscono la massa stessa e che sono indipendenti gli uni dagli altri. I bilanci delle componenti indipendenti illustrati nel prosieguo, sono combinazioni lineari dei bilanci delle specie atomiche e, dal punto di vista fisico, del tutto equivalenti ai fini del bilancio di massa complessivo. La soluzione di questo sistema di bilanci (§ 3.9), oltre a fornire come risultato l'entità dell'aria di combustione complessiva, fornisce anche i parametri del modello di rifiuto che meglio rappresenta quanto trattato mediamente all'interno del volume di controllo nel periodo di riferimento considerato.

I successivi paragrafi di questo Capitolo considerano i vari flussi in ingresso/uscita dal volume di controllo, descrivendoli in termini di contributi alle componenti indipendenti del bilancio di massa sopra menzionate e introdotte nel seguente § 3.3.

### ***3.3 I fumi all'uscita della caldaia***

La portata e le caratteristiche dei fumi sono normalmente registrate al camino dell'impianto. Al fine del bilancio di massa sul volume di controllo definito nel precedente § 2.2 (la "caldaia") è necessario riportare tali dati, con le opportune correzioni, in corrispondenza del confine di tale volume di controllo, ossia all'uscita della caldaia (che può essere posta, per convenienza, anche in sezioni intermedie della linea di trattamento fumi, come in Figura 2.2, dove è posta a valle del precipitatore elettrostatico).

Normalmente, tra l'uscita della caldaia e il camino dell'impianto è presente la linea di trattamento fumi, che può essere variamente configurata. In generale, la linea fumi modifica la portata e le caratteristiche dei fumi a causa dell'iniezione / estrazione di componenti dei fumi, come per effetto di reazioni chimiche. Non tutte le manipolazioni dei fumi attuate dalla linea di trattamento producono effetti della medesima entità: alcuni risultano assolutamente trascurabili ai fini della valutazione del bilancio di massa. Per rendere la presente trattazione applicabile a qualsiasi caso, senza introdurre alcuna approssimazione, tutti i possibili effetti sono quantificati e tenuti in debito conto.

#### **3.3.1 Portata e caratteristiche dei fumi al camino**

La portata dei fumi al camino è comunemente misurata mediante un trasduttore differenziale di pressione opportunamente calibrato (con cadenza almeno annuale). La misura effettuata è registrata

dal sistema di controllo dell'impianto (il *DCS* = “*Distributed Control System*”), ovvero dal Sistema di Monitoraggio delle Emissioni (SME).

L'unità di misura con la quale è normalmente misurata la portata dei fumi è il “normal-metro-cubo all'ora” ( $m_N^3/h$ ). Si tratta della portata volumetrica teorica della fase gassosa dei fumi qualora fossero portati nelle condizioni di riferimento “normali” di 1 atm e 0 °C. L'algoritmo di condizionamento del segnale, rilevato dal trasduttore differenziale di pressione, corregge la misura effettuata sulla base sia della curva di calibrazione, sia delle misure di pressione assoluta e temperatura dei fumi nel punto di campionamento, in modo da riportare la misura alle condizioni “normali” mediante il modello del gas ideale.

Oltre a tale condizionamento, di norma effettuato su tutti gli impianti, la misura può subire ulteriori elaborazioni, in modo da essere riferita a un'opportuna base. Le più diffuse basi sono:

- la base “Tal Quale”, ossia il riferimento all'effettiva composizione dei fumi nel punto di campionamento;
- la base “Secca” o “Anidra”, ossia riferita ai fumi privati del contenuto di vapore acqueo ( $H_2O$ );
- la base “Secca, riferita all'11%<sub>vol.</sub> di ossigeno”, ossia riferita ai fumi privati del contenuto di vapore acqueo e diluiti / concentrati con aria ambiente secca affinché il tenore finale di ossigeno ( $O_2$ ) sia l'11% in volume.

L'espressione della portata, con riferimento all'una piuttosto che all'altra base, richiede l'utilizzo di formule di conversione che coinvolgono le misure di concentrazione del vapore acqueo e dell'ossigeno effettuate nel medesimo punto di campionamento già menzionato.

Anche le concentrazioni di vapore acqueo e di ossigeno sono normalmente misurate al camino e registrate dal *DCS*, ovvero dallo SME. Comunemente, si tratta di concentrazioni volumetriche che, nel caso del vapore acqueo, sono normalmente espresse con riferimento alla base “tal quale”, mentre per l'ossigeno è possibile sia il riferimento alla base “tal quale”, sia il riferimento alla base secca. Sono espresse in termini percentuali (il “100%” rappresenta la totalità del flusso gassoso), ovvero come numeri frazionari (“1” rappresenta la totalità del flusso gassoso).

Al camino sono comunemente misurate molte altre grandezze.

Tra queste, quelle di maggiore interesse ai fini della presente trattazione sono i tenori volumetrici degli incombusti gassosi, segnatamente di monossido di carbonio (*CO*) e di Carbonio Organico Totale (*COT*). L'unità di misura normalmente impiegata per queste grandezze è il “milligrammo al normal-metro-cubo” ( $mg/m_N^3$ ), che può essere alternativamente sostituito da concentrazioni volumetriche che, attesa la contenuta entità numerica, sono quantificate in parti per milione (*ppm*). Anche per esprimere queste due concentrazioni possono essere utilizzate le tre basi sopra elencate.

Un'altra sostanza nel seguito considerata è il particolato (*PM* = “*Particulate Matter*”) trasportato dai fumi, indicato anche come “polveri” e classificato, in questa trattazione, nella categoria “Solidi”. Anche la concentrazione di questa sostanza è comunemente espressa in “milligrammi al normal-metro-cubo” ( $mg/m_N^3$ ).

Nelle espressioni matematiche che seguono, per ogni grandezza è indicata in pedice la relativa base, quando significativa:

- “TQ” per la base “Tal Quale”;
- “secco” per la base “Secca” o “Anidra”;
- “RIF.” per la base “Secca, riferita all’11%<sub>vol.</sub> di O<sub>2</sub>”; per la concentrazione convenzionale dell’ossigeno nell’aria ambiente secca, assunta pari al 21,00% in termini volumetrici;
- “O” per la concentrazione dell’ossigeno nell’aria ambiente secca, che è pari al 20,95% in termini volumetrici (Mackenzie and Mackenzie, 1995).

Per l’aria ambiente secca è necessario definire il tenore d’ossigeno effettivo ( $x_{O_2,0}$ ) e quello convenzionale ( $x_{O_2,RIF.}$ ), poiché quest’ultimo è utilizzato dalle normative vigenti per convertire le varie grandezze alla base convenzionale secca, riferita all’11% volumetrico di ossigeno. Nelle elaborazioni successive, che partiranno tutte da dati espressi in base “tal quale”, si utilizzerà, invece, il tenore di ossigeno effettivo dell’aria ambiente secca.

#### Conversione dei tenori di ossigeno / solidi / incombusti gassosi tra le basi “TQ” e “secco”

Detta “i” la specie considerata, sia essa ossigeno molecolare, monossido di carbonio o solidi trasportati (in tutte le unità di misura sopra menzionate), vale la relazione:

$$x_{i,cam.,TQ} = x_{i,cam.,secco} \cdot (1 - x_{H_2O,cam.,TQ}) \quad (3.1)$$

#### Conversione della portata fumi tra le basi “TQ” e “secco”

$$\Gamma_{cam.,TQ} = \frac{\Gamma_{cam.,secco}}{1 - x_{H_2O,cam.,TQ}} \quad (3.2)$$

#### Conversione della portata fumi tra le basi “secco” e “RIF.”

$$\Gamma_{cam.,secco} = \Gamma_{cam.,RIF.} \cdot \frac{x_{O_2,RIF.} - 11\%}{x_{O_2,RIF.} - x_{O_2,cam.,secco}} \quad (3.3)$$

#### Conversione dei tenori di incombusti gassosi / solidi tra le basi “secco” e “RIF.”

$$x_{i,cam.,secco} = x_{i,cam.,RIF.} \cdot \frac{x_{O_2,RIF.} - x_{O_2,cam.,secco}}{x_{O_2,RIF.} - 11\%} \quad (3.4)$$

### 3.3.2 Le componenti dei 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 come costituita dalle 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 (prevalentemente  $CO_2$ ) e dalle componenti dell'aria secca associate all'ossigeno consumato in tale combustione (prevalentemente  $N_2$ ).
- **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.

Queste tre componenti sono espresse con la stessa unità di misura della portata fumi (normalmente normal-metri-cubi all'ora). Ove necessario, è possibile considerare anche i solidi trasportati dal flusso gassoso, indicati come "Solidi".

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:

$$VA = \Gamma_{cam.,TQ} \cdot X_{H_2O,cam.,TQ} \quad (3.5)$$

$$EAS = \Gamma_{cam.,TQ} \cdot \frac{X_{O_2,cam.,TQ}}{X_{O_2,0}} \quad (3.6)$$

$$FAS = \Gamma_{cam.,TQ} - VA - EAS \quad (3.7)$$

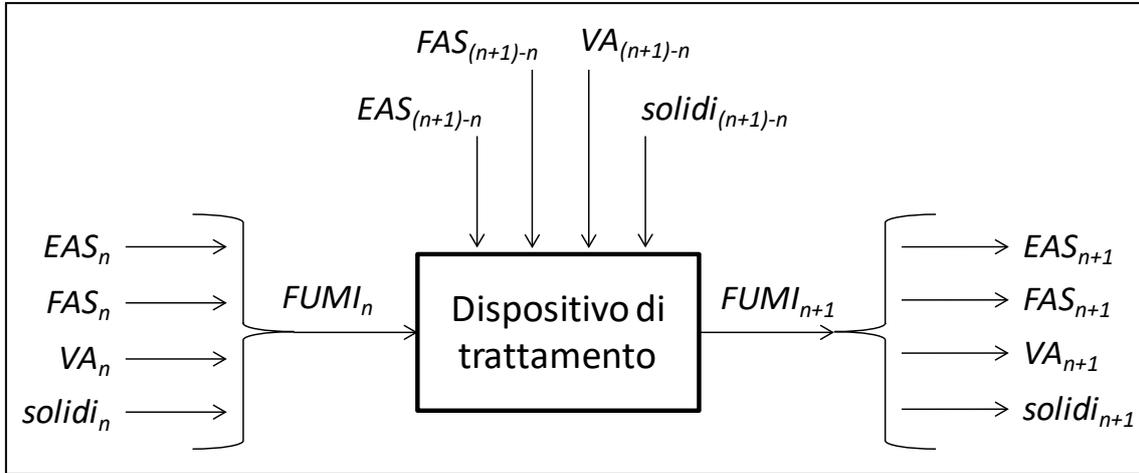
Esprimendo i tenori degli incombusti gassosi, oppure dei solidi, e la portata di fumi con unità di misura coerenti, le corrispondenti portate massiche sono determinate mediante le relazioni:

$$M_{i,cam.} \left[ \frac{mg}{h} \right] = \Gamma_{cam.,TQ} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot X_{i,cam.,TQ} \left[ \frac{mg}{m^3} \right] \quad (3.8)$$

### 3.3.3 Apporto / sottrazione delle componenti dei fumi lungo la linea di trattamento

Ogni dispositivo presente nella linea fumi introduce / sottrae / converte selettivamente le tre componenti gassose dei fumi, nonché i solidi trasportati. Per ogni dispositivo è possibile definire produzioni / consumi specifici delle varie componenti che, moltiplicati per un'opportuna variabile estensiva (per esempio la portata di combustibile per i bruciatori di riscaldamento fumi, la portata di reagente per la neutralizzazione dei gas acidi, etc.) forniscono il contributo complessivo del singolo processo.

Il generico dispositivo di trattamento fumi è esemplificato dallo schema in Figura 3.2, dove sono considerati positivi gli apporti delle varie componenti nella direzione di moto dei fumi, ossia dalla stazione “ $n$ ”, alla stazione “ $n+1$ ”.



**Figura 3.2:** Schema esemplificativo del bilancio di massa di un dispositivo presente lungo la linea di trattamento fumi. Sono considerati positivi gli apporti delle varie componenti dei fumi nella direzione di moto di questi ultimi.

Con riferimento allo schema in Figura 3.2 e partendo dalle condizioni dei fumi nella stazione di “valle” (la “ $n + 1$ ”), che è più prossima al camino, è possibile determinare le condizioni dei fumi nella stazione di monte (la “ $n$ ”) mediante semplici equazioni di bilancio:

$$EAS_n = EAS_{n+1} - EAS_{IN,(n+1)-n} \quad (3.9)$$

$$FAS_n = FAS_{n+1} - FAS_{IN,(n+1)-n} \quad (3.10)$$

$$VA_n = VA_{n+1} - VA_{IN,(n+1)-n} \quad (3.11)$$

$$M_{Solidi,n} = M_{Solidi,n+1} - M_{Solidi_{IN,(n+1)-n}} \quad (3.12)$$

Come anticipato, gli apporti delle componenti dei fumi che competono a un certo dispositivo di trattamento dipendono dal peculiare processo che esso realizza, ma - in generale - ognuno di essi può essere espresso come prodotto di un apporto specifico (indicato con simboli minuscoli, per distinguerlo dall'apporto complessivo, indicato, invece con simboli maiuscoli) e di una opportuna variabile estensiva (indicata, in generale, con il simbolo  $G$ ) che quantifica o costituisce un indice dell'entità complessiva degli apporti.

Quindi, in generale, si ha:

$$EAS_{IN,(n+1)-n} = eas_{(n+1)-n} \cdot G_{IN,(n+1)-n} \quad (3.13)$$

$$FAS_{IN,(n+1)-n} = fas_{(n+1)-n} \cdot G_{IN,(n+1)-n} \quad (3.14)$$

$$VA_{IN,(n+1)-n} = va_{(n+1)-n} \cdot G_{IN,(n+1)-n} \quad (3.15)$$

$$M_{Solidi\_IN,(n+1)-n} = solidi_{(n+1)-n} \cdot G_{IN,(n+1)-n} \quad (3.16)$$

L'Appendice A del presente documento riporta tutti i calcoli stechiometrici per la determinazione degli apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* che competono alle più comuni tipologie di sostanze iniettate in relazione ai vari dispositivi di trattamento fumi. I risultati di tali calcoli sono riassunti per comodità nella seguente Tabella 3.1.

**Tabella 3.1: Apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* che competono alle più comuni tipologie di apparecchiature di condizionamento fumi. Trattandosi di “apporti”, i valori numerici sono riportati con un segno positivo quando indicano l'introduzione della componente nel sistema considerato (o nella direzione di moto dei fumi), mentre con un segno negativo quando indicano una sottrazione/riduzione di tale componente.**

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	<i>eas</i>	<i>fas</i>	<i>va</i>	<i>solidi</i>
		m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	kg UM <sup>-1</sup>
Gas naturale	m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	-9,744	+8,738	+2,024	0,000
	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	-9,236	+8,282	+1,918	0,000
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,738	+2,024	0,000
				+9,744 α	
	m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,282	+1,918	0,000
				+9,236 α	
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto (con α=0,01045)	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,738	+2,126	0,000
	m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,282	+2,015	0,000
Gasolio	kg	-11,26	+10,52	+1,482	0,000
	l	-9,456	+8,833	+1,245	0,000
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto	kg	0,000	+10,52	+1,482	0,000
				+11,26 α	
	l	0,000	+8,833	+1,245	0,000
				+9,456 α	
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto (con α = 0,01045)	kg	0,000	+10,52	+1,600	0,000
	l	0,000	+8,833	+1,344	0,000
Calce magnesiacca	kg	0,000	-0,1413	+0,2125	+1,092
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	-4,712	+4,383	+1,974	0,000
		+6,282 ε/λ	-5,624 ε/λ		
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	-2,856	+2,721	+1,974	0,000
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	-0,0683	+0,226	+1,974	0,000
Acqua liquida	kg / l	0,000	0,000	+1,244	0,000
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	-1,154	+1,074	+1,423	0,000
		+1,539 ε/λ	-1,378 ε/λ		
	l	-1,047	+0,9737	+1,290	0,000
		+1,396 ε/λ	-1,249 ε/λ		
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	-0,6996	+0,6666	+1,423	0,000
	l	-0,6344	+0,6045	+1,290	0,000
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	-0,01673	+0,05528	+1,423	0,000
	l	-0,01517	+0,05013	+1,290	0,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

**Prosecuzione di Tabella 3.1: Apporti specifici di EAS, FAS, VA e Solidi che competono alle più comuni tipologie di apparecchiature di condizionamento fumi. Trattandosi di “apporti”, i valori numerici sono riportati con un segno positivo quando indicano l'introduzione della componente nel sistema considerato (o nella direzione di moto dei fumi), mentre con un segno negativo quando indicano una sottrazione/riduzione di tale componente.**

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	<i>eas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>fas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>va</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>solidi</i> kg UM <sup>-1</sup>
Urea solida per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	-2,672 +3,563 ε/λ	+2,859 -3,190 ε/λ	-0,7464	0,000
Soluzione acquosa al 45% in massa di urea per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	-1,202 +1,603 ε/λ	+1,286 -1,435 ε/λ	+1,020	0,000
	l	-1,351 +1,801 ε/λ	+1,445 -1,612 ε/λ	+1,146	0,000
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi	kg	0,000	+0,1314 -0,1314/λ	+0,1314 +0,1314/λ	+0,6364 +0,06387/λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi (con λ=1,3)	kg	0,000	+0,03032	+0,2325	+0,6855
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi	kg	0,000	-0,5808/λ	+0,5808/λ	+1,000 +0,4780/λ
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi (con λ=3,5)	kg	0,000	-0,1659	+0,1659	+1,137
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco	kg	0,000	-0,07576/λ	1,082 +0,07576/λ	+0,1304 +0,06235/λ
	l	0,000	-0,07583/λ	+1,083 +0,07583/λ	+0,1306 +0,06240/λ
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco (con λ=2,4)	kg	0,000	-0,03157	+1,113	+0,1564
	l	0,000	-0,03160	+1,114	+0,1566
Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri	kg	-8,908	+8,908	0,000	-1,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

<sup>(b)</sup> 0,15 kg di idrossido di calce in 1 l di acqua.

### 3.3.4 Il caso dell'EAS e le grandezze all'uscita della caldaia

Ogni dispositivo presente nella linea fumi può, quindi, apportare EAS, FAS, VA e Solidi. Tali apporti sono stati espressi come prodotti di apporti specifici e di opportune variabili estensive, che sono normalmente misurate e registrate dal DCS. Un'eccezione a questa regola generale è rappresentata da un quantitativo rilevante di EAS che normalmente si infila nella linea di trattamento fumi dall'ambiente circostante, portando con sé anche l'umidità (VA) a esso associata. Tale apporto indesiderato di aria ambiente, che si realizza principalmente in quanto la linea fumi è mantenuta in depressione rispetto all'ambiente ed è caratterizzata da tenute imperfette, è comunemente chiamata “aria falsa”.

Accanto all'aria falsa possono essere presenti ulteriori apporti d'aria ambiente non misurati e difficilmente quantificabili per via diretta. Si pensi, per esempio, all'eccesso d'aria di combustione introdotto nei fumi in corrispondenza di eventuali bruciatori di riscaldamento. La situazione è esemplificata dallo schema in Figura 3.3.

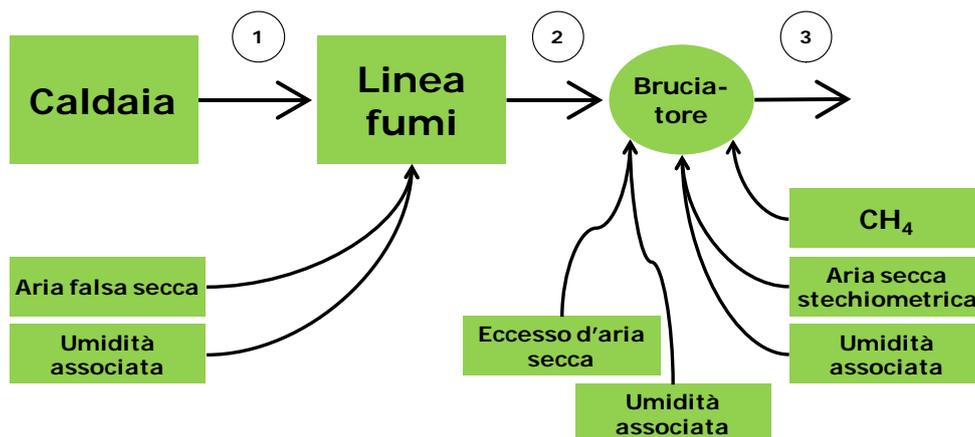


Figura 3.3: Schema esemplificativo di una linea fumi con indicazione delle introduzioni di aria ambiente non misurate.

Questi apporti “aggiuntivi” di *EAS* e *VA* non misurati possono essere determinati mediante un bilancio dell’ossigeno: tutti gli impianti misurano, infatti, la concentrazione di ossigeno anche in caldaia. Si determinano, in questo modo, gli apporti complessivi di *EAS* e *VA* a prescindere dagli effettivi punti d’introduzione lungo la linea fumi. Questo approccio è adeguato ai fini della determinazione della portata e delle caratteristiche dei fumi all’uscita della caldaia.

Pertanto, lo schema concettuale in Figura 3.3 è sostituito da quello nella seguente Figura 3.4.

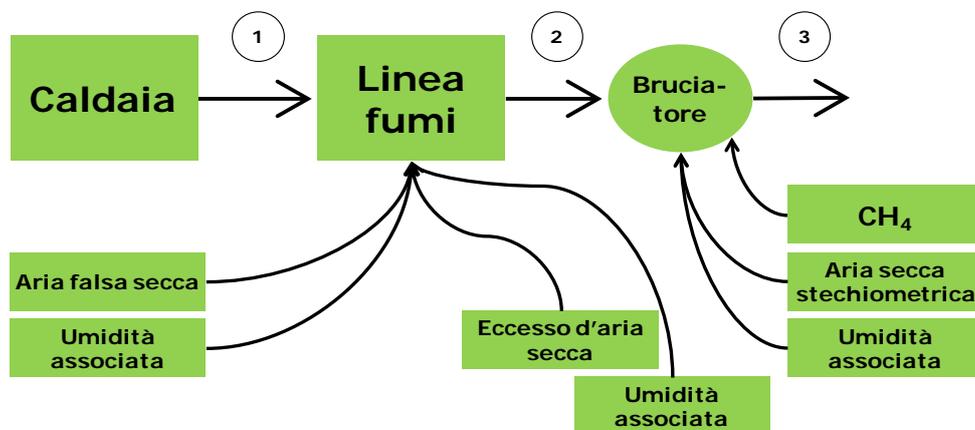
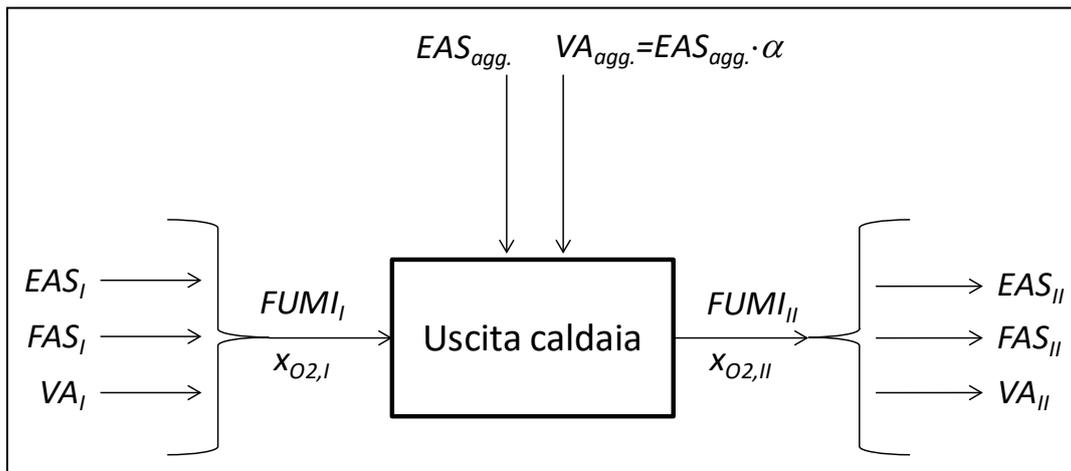


Figura 3.4: Schema esemplificativo di una linea fumi con raggruppamento concettuale di tutte le introduzioni di aria ambiente non misurate in un unico punto.

Secondo questo approccio, i bilanci per le varie componenti dei fumi sino all’uscita della caldaia sono condotti, in prima istanza, come se non fosse presente l’introduzione di *EAS* e *VA* aggiuntivi. È possibile, quindi, determinare il tenore d’ossigeno all’uscita della caldaia che risulterebbe da queste valutazioni secondo la seguente relazione 3.17:

$$x_{O_2,TQ} = \frac{EAS}{EAS+FAS+VA} \cdot x_{O_2,0} \quad (3.17)$$

Questa concentrazione di ossigeno costituisce la base per svolgere il bilancio dell’ossigeno secondo lo schema concettuale in Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Schema concettuale della diluizione dei fumi operata dall'aria aggiuntiva. Convenzionalmente, tale diluizione è localizzata in corrispondenza della sezione d'uscita della caldaia, intendendo la sezione della linea fumi in corrispondenza del confine del volume di controllo combustore\i-caldaia\.

L'apporto di VA associato all'EAS aggiuntivo dipende dall'umidità dell'aria ambiente, secondo l'equazione 3.18, dove il parametro  $\alpha$  è il contenuto volumetrico d'umidità, legato all'umidità assoluta secondo la successiva equazione 3.19.

$$VA = EAS \cdot \alpha \quad (3.18)$$

$$\alpha \left[ \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,EAS}^3} = \frac{kmol_{H_2O}}{kmol_{EAS}} \right] = U \left[ \frac{kg_{H_2O}}{kg_{EAS}} \right] \cdot \frac{\mathcal{M}_{EAS} \left[ \frac{kg_{EAS}}{kmol_{EAS}} \right]}{\mathcal{M}_{H_2O} \left[ \frac{kg_{H_2O}}{kmol_{H_2O}} \right]} = U \cdot \frac{28,97}{18,02} = 1,608 \cdot U \quad (3.19)$$

Per l'umidità assoluta dell'aria ambiente è ragionevole impiegare un valore medio annuo. Il bilancio dell'ossigeno fornisce, quindi, l'apporto aggiuntivo d'EAS secondo la relazione:

$$EAS_{AGG} = \frac{EAS_{II} \cdot x_{O2,0} - (EAS_{II} + FAS_{II} + VA_{II}) \cdot x_{O2,I,TQ}}{x_{O2,0} - x_{O2,I,TQ} \cdot (1 + \alpha)} = \frac{1 - x_{O2,I,TQ}/x_{O2,II,TQ}}{1 - x_{O2,I,TQ}/x_{O2,0} \cdot (1 + \alpha)} \cdot EAS_{II} \quad (3.20)$$

I pedici "I" e "II" indicano, con riferimento alla Figura 3.5, rispettivamente la stazione immediatamente precedente e immediatamente successiva all'introduzione dell'aria aggiuntiva.

Una volta determinato l'apporto d'EAS "aggiuntivo", sono immediatamente determinate le tre componenti gassose dei fumi all'uscita della caldaia e, quindi, la portata complessiva corrispondente:

$$EAS_I = EAS_{II} - EAS_{AGG} \quad (3.21)$$

$$FAS_I = FAS_{II} \quad (3.22)$$

$$VA_I = VA_{II} - \alpha \cdot EAS_{AGG} \quad (3.23)$$

$$\Gamma_I = EAS_I + FAS_I + VA_I \quad (3.24)$$

Se il tenore d'ossigeno all'uscita della caldaia fosse disponibile su base secca invece che su base "tal quale", l'Eq. 3.20 dovrebbe essere riformulata nel seguente modo:

$$EAS_{AGG} = \frac{EAS_{II} \cdot x_{O_2,0} - (EAS_{II} + FAS_{II}) \cdot x_{O_2,I,secco}}{x_{O_2,0} - x_{O_2,I,secco}} = \frac{1 - x_{O_2,I,secco}/x_{O_2,II,secco}}{1 - x_{O_2,I,secco}/x_{O_2,0}} \cdot EAS_{II} \quad (3.25)$$

Dove, per comodità è stato introdotto anche il tenore di ossigeno su base secca che si riscontrerebbe in uscita dalla caldaia in assenza dell'introduzione dell'aria falsa. Tale concentrazione è valutabile con una relazione analoga all'Eq. 3.17:

$$x_{O_2,secco} = \frac{EAS}{EAS + FAS} \cdot x_{O_2,0} \quad (3.26)$$

### 3.3.5 Svolgimento dei calcoli

Si assume che le registrazioni archiviate per l'intero anno d'esercizio abbiano almeno cadenza oraria. Tali registrazioni sono frutto di un processo di media delle misure campionate con cadenza normalmente inferiore al minuto.

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

Questa circostanza è dovuta al fatto che le medie delle varie grandezze considerate non sono tra loro indipendenti, bensì correlate. Si consideri, per esempio, il tenore d'ossigeno e la portata fumi. A parità di carico d'esercizio dell'impianto è possibile ottenere una portata di fumi più o meno elevata a seconda dell'eccesso d'aria adottato per svolgere la combustione, regolato, di norma, ciclicamente dal sistema di controllo della combustione. Ciò significa che quando l'eccesso d'aria è elevato, sia la portata fumi, sia il tenore d'ossigeno sono elevati e vale il viceversa quando, invece, l'eccesso d'aria è contenuto. La componente *EAS*, pertanto, è una funzione quadratica dell'eccesso d'aria. Conseguentemente, la media del prodotto tra portata fumi e tenore d'ossigeno è diversa dal prodotto della portata media di fumi e del tenore medio d'ossigeno. Questa approssimazione è insita anche nelle valutazioni effettuate partendo dalle registrazioni orarie, in quanto frutto di medie dei campionamenti effettuati, ma lo è in misura significativamente maggiore e inaccettabile utilizzando le medie giornaliere, oppure settimanali, mensili o annue, in luogo delle medie orarie.

Utilizzando un foglio di calcolo è possibile assegnare a ogni linea del foglio un'ora dell'anno, dedicando ogni colonna a una delle varie grandezze registrate:

- la portata dei fumi al camino;
- il tenore di ossigeno al camino;
- il tenore di vapore acqueo al camino;

- le varie grandezze estensive che caratterizzano i dispositivi lungo la linea di trattamento fumi;
- il tenore d'ossigeno in caldaia.

Altre colonne del foglio di calcolo potranno contenere i risultati orari dei vari calcoli effettuati.

Particolare attenzione deve essere riservata alla selezione delle ore di funzionamento da considerare, in quanto il DCS normalmente registra le varie grandezze anche durante i periodi di fermata delle linee. I criteri da applicare per effettuare questa selezione / classificazione delle ore di funzionamento sono discussi nel successivo § 5.1.

Dedicando una riga del foglio di calcolo per ogni ora dell'anno ed esprimendo tutte le grandezze estensive su base oraria, la somma di ogni colonna relativa a una variabile estensiva restituisce il valore cumulato annuo di tale grandezza. Se, invece, si utilizza una scansione temporale delle registrazioni differente (ma comunque uniforme), alla somma della colonna dovrà essere anteposto un opportuno fattore integrante al fine di ottenere i valori cumulati annui.

### 3.4 I solidi

Il bilancio dei solidi scaricati da un termovalorizzatore fornisce un'indicazione circa il tenore di sostanze inerti contenute nel rifiuto. Tali inerti, detti "ceneri", costituiscono quella frazione inorganica del rifiuto che durante la combustione prende parte alle reazioni chimiche solo in misura minoritaria<sup>4</sup>, sicché si può ragionevolmente ritenere che la relativa massa rimanga costante durante l'intero processo.

Normalmente si distinguono tre tipologie di scarichi solidi:

- le scorie;
- le polveri di caldaia;
- le polveri dagli abbattitori presenti sulla linea fumi che possono, eventualmente, essere miscelate con i prodotti della neutralizzazione dei gas acidi e dell'assorbimento dei microinquinanti.

Un flusso minoritario di solidi, trascurabile nel bilancio di massa del combustore-caldaia, è quello trasportato dai fumi al camino.

La contabilizzazione dei solidi scaricati è spesso effettuata separatamente per le scorie, per le polveri di caldaia, insieme a quelle del primo stadio di depolverazione (prima dell'iniezione di reagenti), e per i prodotti solidi del trattamento dei fumi. Tuttavia, vi sono casi in cui le varie tipologie di solido vengono miscelate tra loro e contabilizzate insieme.

Come rappresentato in Figura 2.2, è conveniente includere nel volume di controllo della caldaia anche il primo stadio di depolverazione, in modo che i solidi trasportati dai fumi in uscita da tale volume di controllo costituiscano una frazione irrilevante del totale.

Come sarà illustrato nel § 4, relativo al bilancio dell'energia della caldaia, è comunque necessario allocare i vari quantitativi di solidi scaricati ai diversi punti d'estrazione, poiché a ogni punto d'estrazione corrisponde una differente temperatura e quindi un diverso contenuto energetico.

---

<sup>4</sup> Al riguardo si rimanda alla trattazione svolta nel materiale supplementare associato all'articolo scientifico di Fellner et al. (2007).

In assenza di informazioni specifiche circa la ripartizione dei solidi, si possono adottare i valori orientativi riportati nella seguente Tabella 3.2, differenziati per i termovalorizzatori a griglia e per quelli a letto fluido.

**Tabella 3.2: Valori orientativi della ripartizione dei solidi inorganici introdotti nel sistema combustore/i-caldiaia/e tra i vari punti di scarico. Si consideri che in corrispondenza di tali punti, oltre alle ceneri provenienti dal rifiuto, possono essere scaricati anche altri solidi, come sabbia di riempimento dai letti fluidi o, in generale, prodotti di reazione di eventuali reagenti introdotti.**

	<b>Tipo di combustore:</b>	<b>Griglia</b>	<b>Letto fluido</b>
Ceneri del rifiuto scaricati dal combustore, %		85	30
Ceneri del rifiuto scaricate dalla caldaia, %		10	60
Ceneri del rifiuto scaricate dal primo stadio di depolverazione (tipo ESP), %		5	10
Ceneri del rifiuto trascinate oltre dai fumi, %		<0,5	<0,5

### 3.4.1 L'umidità delle scorie

Negli impianti a griglia, le scorie sono frequentemente estratte mediante un sistema a bagno d'acqua. Conseguentemente, il materiale scaricato risulta piuttosto umido e solo una frazione è costituita dalle ceneri del rifiuto, mentre un'altra frazione è costituita da acqua liquida.

Spesso, negli impianti si opera una deferrizzazione delle scorie immediatamente a valle dell'estrazione. Con estrazione delle scorie a bagno d'acqua, è ragionevole ritenere che i materiali ferrosi separati presentino un contenuto trascurabile d'umidità. La rimanente parte delle scorie ha, invece, natura idrofila e presenta tenori d'umidità dell'ordine del 15% o più in massa.

### 3.4.2 Gli incombusti nelle scorie e nelle polveri

Oltre alle ceneri contenute nei rifiuti, scorie e polveri possono contenere anche prodotti d'incompleta combustione. Tali prodotti possono essere equiparati a carbonio in stato grafítico. La normativa vigente impone dei limiti sul contenuto complessivo di carbonio nei solidi scaricati. In assenza di informazioni specifiche, si può assumere che i solidi scaricati presentino tenore di carbonio del 2% in massa su base secca.

Gli incombusti presenti nei solidi scaricati interagiscono anche con il bilancio dei fumi in caldaia, in quanto il carbonio, se si fosse ossidato, avrebbe prodotto *FAS* consumando *EAS*.

La precedente Tabella 3.1 riporta, pertanto, anche gli apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* che competono agli incombusti solidi, come derivazione riportata in Appendice A, considerando gli incombusti come un flusso in uscita dal volume di controllo, da associare agli altri solidi in uscita dal volume di controllo già inclusivi degli incombusti solidi. Maggiori dettagli sono riportati in Appendice A.

### 3.4.3 Svolgimento dei calcoli

Disponendo dei quantitativi di solidi complessivamente scaricati in un anno da un impianto e, eventualmente, allocandoli ai vari punti d'estrazione, è possibile determinare la massa di ceneri contenuta nei rifiuti trattati.

#### Esempio per un termovalorizzatore a griglia

Siano:

$M_{scorie}$  la massa di scorie di fondo-griglia contabilizzata dopo l'estrazione dei materiali ferrosi;

$M_{ferrosi}$  la massa di materiali ferrosi estratta dalle scorie di fondo griglia;

$M_{polveri}$  la massa di polveri provenienti dalla caldaia e dal primo stadio di depolverazione;

$M_{particolato}$  la massa di polveri trascinate dai fumi dopo il primo stadio di depolverazione.

Assumendo un tenore d'umidità per le scorie del 15%, la massa di scorie secche sarà:

$$M_{scorie,secche} = M_{scorie} \cdot (1 - 15\%) \quad (3.27)$$

Assumendo che tutti i solidi scaricati presentino un contenuto d'incombusti del 2% in massa, la massa di ceneri contenuta nel rifiuto trattato sarà:

$$M_{ceneri} = (M_{scorie,secche} + M_{ferrosi} + M_{polveri} + M_{particolato}) \cdot (1 - 2\%) \quad (3.28)$$

In modo analogo è possibile determinare la massa di incombusti:

$$M_{incombusti} = (M_{scorie,secche} + M_{ferrosi} + M_{polveri} + M_{particolato}) \cdot 2\% \quad (3.29)$$

## 3.5 Il rifiuto

La quantità di rifiuto trattata in un anno è un dato registrato, normalmente con valenza fiscale / amministrativa.

Le caratteristiche medie annue di tale rifiuto, invece, sono incognite: innanzitutto il Potere Calorifico Inferiore (PCI), ma anche la composizione (contenuto di carbonio, idrogeno, etc.).

La ricostruzione completa della composizione del rifiuto trattato partendo dalle misurazioni effettuate sull'impianto non è agevole, quantomeno per la difficoltà nel distinguere l'origine della produzione di vapore acqueo tra l'umidità del rifiuto e il contenuto d'idrogeno della sostanza combustibile. Tale ricostruzione, comunque, non è neppure di particolare interesse ai fini della valutazione dell'indice R1.

Di maggiore rilevanza è, invece, la determinazione dell'aria richiesta dalla combustione del rifiuto, in quanto le misurazioni dell'aria comburente, quando disponibili, sono scarsamente affidabili (i misuratori sono calibrati raramente e sono solitamente presenti diversi ingressi d'aria non quantificati). Si segue, pertanto, un approccio semplificato, in grado di fornire una stima piuttosto

accurata dell'effettivo fabbisogno d'aria comburente mediante un semplice modello di rifiuto sviluppato appositamente per questo fine.

Il rifiuto è eterogeneo, composto da numerosi materiali: carta, cartone, plastica, organico, metalli, etc.

La composizione chimica della parte combustibile della maggior parte delle classi di materiali è nota solo in termini statistici, poiché ognuna di esse si compone di diversi materiali in proporzioni variabili. Ne consegue che le produzioni specifiche di *EAS*, *FAS* e *VA* associate alla parte combustibile delle varie categorie di materiali sono note con la stessa incertezza che caratterizza le rispettive composizioni. Ciò nonostante, se si dispongono i punti rappresentativi (che possono essere considerati le medie delle distribuzioni statistiche testé menzionate) delle parti combustibili delle varie categorie di materiali in un piano "produzione di *fas*" - "consumo stechiometrico d'aria secca (*eas*)", si ottiene il grafico in Figura 3.6.

Il grafico illustra come i suddetti punti rappresentativi si dispongano bene su una retta. Definendo due tipologie di Sostanza Combustibile ("*SC*"), una che si colloca all'estremo inferiore sinistro della retta e l'altra all'estremo superiore destro, è possibile riprodurre il legame "produzione di *FAS*, consumo di *EAS*" di qualsiasi materiale come un'opportuna miscela di tali due tipologie, che saranno indicate come:

- *SC*<sub>1</sub>: "Sostanza Combustibile di tipo 1", caratterizzata da bassa produzione specifica di *FAS* e contestuale basso consumo specifico di *EAS*;
- *SC*<sub>2</sub>: "Sostanza Combustibile di tipo 2", che combina un'elevata produzione specifica *FAS* a un altrettanto elevato consumo specifico di *EAS*.

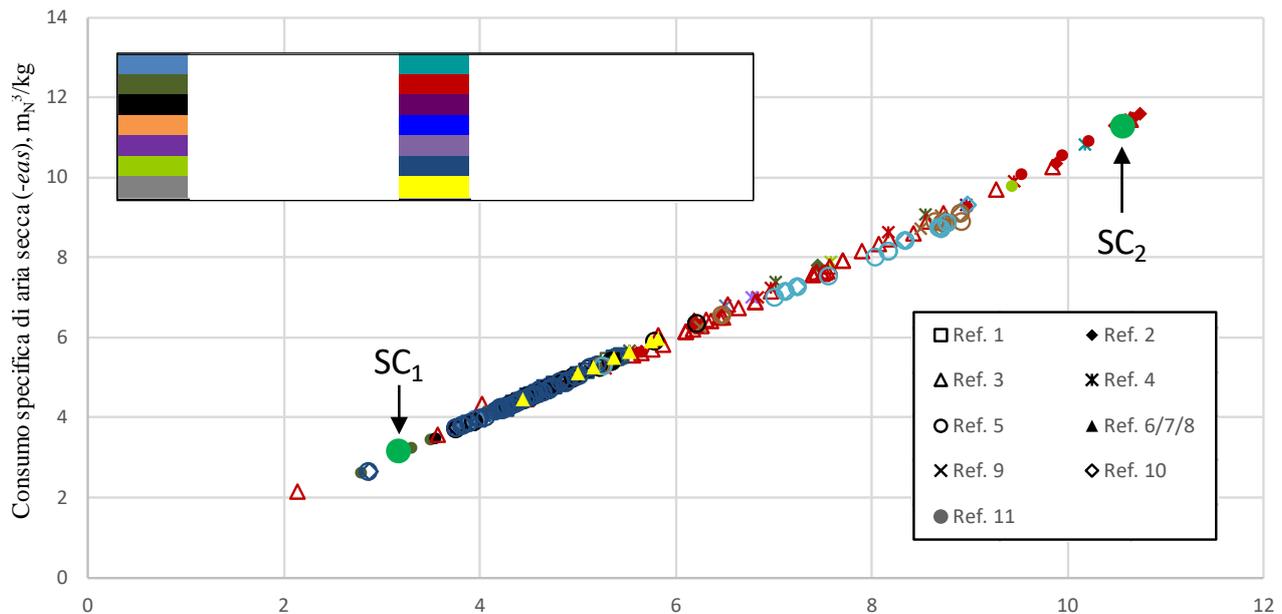
I punti rappresentativi di queste due sostanze sono riportati agli estremi della retta nel grafico di Figura 3.6.

Determinando, quindi, quale ripartizione tra *SC*<sub>1</sub> e *SC*<sub>2</sub> sia mediamente rappresentativa della sostanza combustibile contenuta nel rifiuto trattato dal combustore-caldia in base alla produzione di *FAS* a essi attribuita, si determina l'aria consumata da tale combustione.

Conseguentemente, per quanto concerne la presente trattazione, è possibile ritenere che qualsiasi rifiuto possa essere descritto come una miscela dei seguenti quattro componenti:

- le ceneri;
- l'umidità;
- *SC*<sub>1</sub>;
- *SC*<sub>2</sub>.

Il contenuto di ceneri, determinato mediante il bilancio dei solidi, costituisce effettivamente una proprietà fisica del rifiuto trattato. I contenuti di umidità, *SC*<sub>1</sub> e *SC*<sub>2</sub> costituiscono, invece, parametri del semplice modello di rifiuto adottato e non hanno un immediato significato fisico. Ciò è immediatamente evidente in relazione alla rappresentazione della sostanza combustibile del generico rifiuto come miscela di *SC*<sub>1</sub> e *SC*<sub>2</sub>. Considerando, infatti la produzione specifica di *VA* delle varie sostanze combustibili considerate nel precedente grafico in Figura 3.6, si ottiene la situazione rappresentata nel grafico della seguente Figura 3.7.

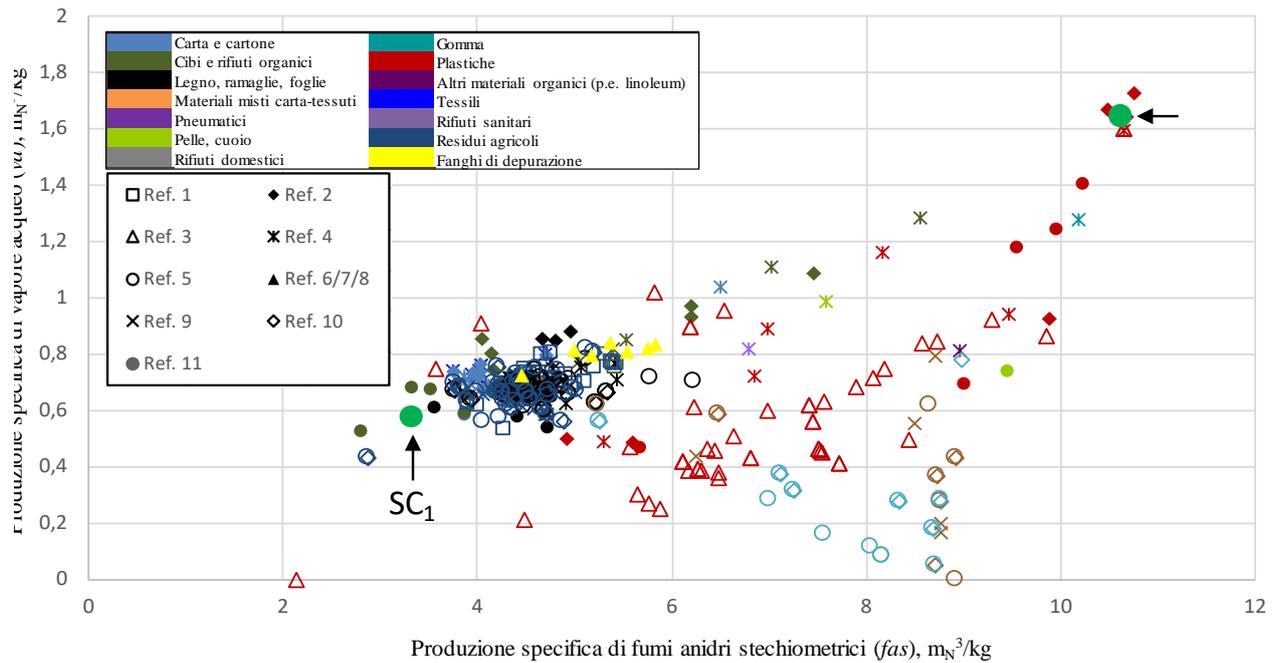


**Fonti dei dati:**

- Ref. 1: Yin, C. Y., 2011. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel* 90, 1128-1132.
- Ref. 2: Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., Lymperis, C., 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management* 32, 372-381.
- Ref. 3: Walters, R. N., Hackett, S. M., Lyon, R. E., 2000. Heats of Combustion of High Temperature Polymers. *Fire and Materials* 24, 245-252.
- Ref. 4: Niessen, W.R., 2002. *Combustion and Incineration Processes: Applications in Environmental Engineering, Third Edition*. CRC Press.
- Ref. 5: Ahmad, M., and Subawi, H., 2013. New Van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. *Research Journal of Agriculture and Environmental Management* 2, 295-301.
- Ref. 6: Otero, M., Díez, C., Calvo, L.F., García, A.I., Morán, A., 2002. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS. *Biomass and Bioenergy* 22, 319-329.
- Ref. 7: Otero, M., Gómez, X., García, A.I., Morán, A., 2007. Effects of sewage sludge blending on the coal combustion: A thermogravimetric assessment. *Chemosphere* 69, 1740-1750.
- Ref. 8: Folgueras, M.B., Díaz, R.M., Xiberta, J., Prieto, I., 2003. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. *Fuel* 82, 2051-2055.
- Ref. 9: United States. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory (U.S.). Office of Scientific and Technical Information, 1986. *Thermodynamic Data for Biomass Conversion and Waste Incineration*. United States. Department of Energy.
- Ref. 10: Parikh, J., Channiwala, S.A., Ghosal, G.K., 2007. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel* 86, 1710-1719.
- Ref. 11: Zhou, H., Long, Y. Q., Meng, A. H., Li, Q. H., Zhang, Y. G., 2015. Classification of municipal solid waste components for thermal conversion in waste-to-energy research. *Fuel* 145, 151-157.

**Figura 3.6: Diagramma “produzione di fas” - “consumo di eas” per numerosi materiali solidi che coprono lo spettro dei possibili componenti del generico rifiuto.**

La miscela di SC<sub>1</sub> e SC<sub>2</sub> non è in grado di riprodurre correttamente la produzione specifica di VA della generica sostanza combustibile. Ciò non costituisce alcun problema, poiché il bilancio del VA imporrà che eventuali errori nella stima della produzione di VA da parte della combustione della sostanza combustibile siano compensati dal contenuto d'umidità del rifiuto. Questa situazione, da un lato, fa sì che non ci sia alcuna ripercussione sul calcolo dell'indice R1 (che non è influenzato dall'origine del VA prodotto dalla combustione dei rifiuti), dall'altro però, rende la stima del contenuto d'umidità effettuata mediante questo modello priva di significato fisico, al pari dei contenuti di SC<sub>1</sub> e SC<sub>2</sub>.



**Figura 3.7: Diagramma “*fas - va*” per numerosi materiali solidi che coprono lo spettro dei possibili componenti del generico rifiuto. Le fonti dei dati sono le stesse del diagramma nella precedente Figura 3.6.**

All’atto pratico, le quattro componenti considerate costituenti del rifiuto trattato devono concorrere ai bilanci di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* mediante le rispettive produzioni specifiche, che sono riassunte nella seguente Tabella 3.3.

**Tabella 3.3: Produzioni specifiche delle varie componenti dei fumi da parte delle quattro componenti del generico rifiuto.**

	Ceneri	Umidità	<i>SC</i> <sub>1</sub>	<i>SC</i> <sub>2</sub>
<i>eas</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	0,000	-2,574	-11,42
<i>fas</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	0,000	+2,700	+10,60
<i>va</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	+1,245	+0,584	+1,664
<i>solidi</i> , $\frac{kg}{kg}$	+1,000	0,000	0,000	0,000

### 3.6 Gli apporti d’aria

Tra i flussi in ingresso al sistema combustore/i-caldaia/e, l’aria di combustione è quello di maggiore entità. Esso è spesso misurato per finalità di controllo della combustione, ma, poiché i misuratori utilizzati non sono generalmente calibrati con sufficiente frequenza e non includono tutti i flussi effettivamente introdotti in caldaia, le registrazioni del *DCS* sono spesso inaffidabili e, a volte, fuorvianti. Conseguentemente, avendo introdotto un modello per il rifiuto trattato, il bilancio di massa complessivo della caldaia consente la determinazione della portata totale di aria introdotta in

caldaia. Tale portata include sia l'aria di combustione propriamente detta (somma dell'aria primaria, di quella secondaria e, ove presente, dell'aria terziaria), sia di ulteriori flussi d'aria quali l'eccesso d'aria utilizzato dai bruciatori d'avviamento e sostentamento, l'aria di sbarramento di tali bruciatori, eventuali flussi d'aria utilizzati dai soffiatori di fuliggine, se presenti, etc.

Il bilancio di massa complessivo consente, quindi, di valutare l'aria complessivamente introdotta in caldaia e non solo quella misurata e destinata a usi specifici. Eventuali misurazioni disponibili possono essere utili per ripartire il flusso complessivo d'aria tra i vari punti d'ingresso, operazione, questa, di rilevante importanza per il bilancio dell'energia in presenza di un significativo preriscaldamento di specifici flussi d'aria.

Per la quantificazione dell'aria complessivamente introdotta in caldaia si rimanda, quindi, al successivo § 3.9, relativo al bilancio di massa del lato fumi della caldaia.

### **3.7 Il ricircolo dei gas combusti**

In alcuni termovalorizzatori è presente il ricircolo di una frazione dei gas combusti al fine d'ottimizzare la combustione. Tali gas possono essere prelevati in diversi punti della linea di trattamento fumi, dall'uscita della caldaia sino alla base del camino. Sono, quindi, reintrodotti in camera di combustione spesso in miscela con l'aria secondaria.

L'eventuale ricircolo dei gas combusti influenza significativamente la portata dei fumi all'uscita fisica della caldaia. Tuttavia, solo raramente sono disponibili dati certi circa l'entità di questo flusso e, a volte, si può solo fare riferimento a dati di progetto.

Per evitare d'introdurre un fattore di forte incertezza nella definizione del bilancio di massa del combustore-caldaia, è spesso conveniente definire il volume di controllo in modo da includere al suo interno il punto di prelievo dei fumi riciccolati. In questo modo, tali fumi non costituiscono un ingresso per il volume di controllo, figurando solo come un ricircolo interno allo stesso.

Questo accorgimento è vantaggioso quando il prelievo dei fumi riciccolati avviene in prossimità dell'uscita fisica della caldaia, ma è svantaggioso quando il prelievo avviene verso il camino. In quest'ultimo caso, infatti, l'inclusione del punto di prelievo nel volume di controllo comporta l'inclusione dell'intera linea di trattamento fumi, introducendo una significativa fonte d'incertezza nel bilancio dell'energia: le perdite termiche della linea di trattamento fumi sono molto caso-specifiche e, quindi, di difficile quantificazione con un approccio generale.

Queste considerazioni suggeriscono di inglobare il ricircolo fumi all'interno del volume di controllo solo quando il prelievo di tali fumi avviene in prossimità dell'uscita fisica della caldaia, escludendolo, invece, quando il prelievo avviene in sezioni più lontane e prossime al camino.

### **3.8 Gli altri flussi in ingresso alla caldaia**

L'aria di combustione e i rifiuti trattati sono i due ingressi principali della caldaia. Accanto a questi vi sono, però, numerosi altri ingressi di entità significativamente inferiore, ma che, comunque, influiscono sui risultati finali del bilancio di massa. Esempi di possibili, ulteriori flussi in ingresso alla caldaia sono:

- il combustibile dei bruciatori d'avviamento / sostentamento;
- l'acqua introdotta da eventuali sistemi di lavaggio delle superfici di scambio termico;

- reagenti del sistema *SNCR* (“*Selective Non-Catalytic Reduction*”) per l’abbattimento degli ossidi d’azoto;
- reagenti del sistema *SCR* (“*Selective Catalytic Reduction*”) per l’abbattimento degli ossidi d’azoto, quando presente all’interno della caldaia;
- eventuali altri reagenti come composti di calce per ridurre lo sporco della caldaia o per innalzare il punto di fusione delle ceneri nei letti fluidi;
- il reintegro dei bagni di spegnimento delle scorie;
- vapori aspirati da punti specifici dell’impianto (come i vapori di spegnimento delle scorie);
- il vapore utilizzato da eventuali soffiatori di fuliggine a vapore;
- l’umidità associata a eventuali sostanze (per esempio fanghi di depurazione) contabilizzate su base secca o, comunque, convenzionale (cioè con un tenore di solidi diverso da quello effettivo).

Per quanto riguarda le molteplici tipologie di reagenti che possono essere introdotti in caldaia, si rimanda alla precedente Tabella 3.1, dove tali sostanze sono caratterizzate mediante gli apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi*.

Relativamente, invece, al reintegro dei bagni di spegnimento delle scorie, oppure ai vapori prodotti da tali bagni e spesso immessi in caldaia, si puntualizza quanto segue.

Quando il bagno di spegnimento delle scorie è al di fuori del volume di controllo definito per lo svolgimento dei bilanci di massa e di energia della caldaia, così come rappresentato in Figura 2.2, allora:

- le scorie secche (scaricate da un combustore a griglia a 350 – 450 °C) costituiscono un flusso d’uscita per la caldaia;
- l’acqua di reintegro dei bagni non deve essere considerata;
- i vapori prodotti dai bagni, se immessi in caldaia, costituiscono un flusso d’ingresso, mentre se espulsi mediante un altro sistema, non devono essere considerati.

Differentemente, quando il bagno di spegnimento delle scorie è all’interno del volume di controllo definito per lo svolgimento dei bilanci di massa e di energia della caldaia:

- le scorie umide (solitamente a 60 – 90 °C) costituiscono un flusso d’uscita per la caldaia;
- l’acqua di reintegro dei bagni costituisce un flusso d’ingresso;
- i vapori prodotti dai bagni se immessi in caldaia non figurano né come flusso d’ingresso, né come flusso d’uscita. Qualora, invece, siano espulsi mediante un altro sistema, figurano come flusso d’uscita.

Dato che la quantificazione dei vapori prodotti dai bagni di spegnimento non è immediata, conviene includere nel volume di controllo il bagno di spegnimento quando i relativi vapori sono immessi in caldaia e non includerlo quando tali vapori sono espulsi mediante un sistema alternativo.

Sugli impianti, di norma, non è soggetta a misurazione l’acqua di reintegro dei bagni, ma è, comunque, ragionevole che il rispettivo consumo sia proporzionale alla quantità di scorie secche (inclusive di eventuali materiali ferrosi e incombusti) scaricate dal combustore. Questo consumo specifico si rappresenta con buona approssimazione in 0,315 kg d’acqua per chilogrammo di scorie secche scaricate al netto di eventuali spurghi.

### 3.9 Il bilancio di massa del lato fumi della caldaia

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, anche se il bilancio dei solidi, pur influenzando sugli altri quattro, è da essi indipendente. Infatti, è già stato risolto nel precedente § 3.4.

I rimanenti quattro bilanci consentono di determinare il valore di quattro incognite, segnatamente:

- Il volume normale d'Aria Secca (*AS*) complessivamente introdotta in caldaia;
- la massa della Sostanza Combustibile di tipo 1 (*SC*<sub>1</sub>) costituente il rifiuto trattato;
- la massa della Sostanza Combustibile di tipo 2 (*SC*<sub>2</sub>) costituente il rifiuto trattato;
- la massa dell'umidità contenuta del rifiuto (*U\_rifiuto*) trattato.

Come anticipato nel precedente § 3.5, questo calcolo è finalizzato unicamente alla determinazione della prima delle quattro incognite elencate, in quanto le altre tre sono delle variabili ausiliarie non rappresentative delle reali caratteristiche fisiche del rifiuto.

Le quattro equazioni di bilancio costituiscono il seguente sistema lineare:

$$\begin{cases} M_{SC1} \times eas_{SC1} + M_{SC2} \times eas_{SC2} + M_{U\_rifiuto} \times eas_{H2O} + V_{N,AS} \times eas_{AS} = EAS_{OUT} - \sum EAS_{ALTRI\_INPUT} \\ M_{SC1} \times fas_{SC1} + M_{SC2} \times fas_{SC2} + M_{U\_rifiuto} \times fas_{H2O} + V_{N,AS} \times fas_{AS} = FAS_{OUT} - \sum FAS_{ALTRI\_INPUT} \\ M_{SC1} \times va_{SC1} + M_{SC2} \times va_{SC2} + M_{U\_rifiuto} \times va_{H2O} + V_{N,AS} \times \alpha = VA_{OUT} - \sum VA_{ALTRI\_INPUT} \\ M_{SC1} + M_{SC2} + M_{U\_rifiuto} = M_{rifiuto} - M_{ceneri} \end{cases} \quad (3.30)$$

Solo tre dei coefficienti di tale sistema lineare sono identicamente nulli: la produzione specifica di *EAS* e *FAS* da parte dell'umidità del rifiuto, nonché la produzione specifica di *FAS* da parte dell'*AS*. Ciò evidenzia il forte accoppiamento delle quattro equazioni.

Per quanto riguarda la produzione di *EAS* e *VA* da parte dell'*AS* contenuta nell'aria ambiente risulta:

$$eas = 1,000 \frac{m_N^3}{m_N^3}$$

$$va = \alpha \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3} \right]$$

Tra i termini noti compaiono l'*EAS*, i *FAS* e il *VA* complessivamente uscenti dal volume di controllo e quantificati in precedenza, le sommatorie degli *EAS*, *FAS* e *VA* prodotti dai flussi in ingresso noti, che devono essere tutti quelli esistenti eccetto i rifiuti e l'aria complessivamente introdotta, la massa complessiva di rifiuto trattato, nonché la massa di ceneri in esso contenuta e pure quantificata in precedenza.

La soluzione di questo sistema lineare chiude il bilancio di massa lato fumi della caldaia.

## 4 Il bilancio dell'energia della caldaia

Analogamente a quanto fatto per il bilancio di massa, anche per il bilancio dell'energia il volume di controllo della caldaia, definito nel precedente § 2.2, è suddiviso nei due sotto-volumi relativi al lato acqua/vapore e al lato rifiuti / fumi. In questo caso il risultato del bilancio del primo sotto-volume (il lato acqua), cioè l'energia termica netta scambiata, costituisce la voce principale del successivo bilancio dell'energia del lato fumi.

### 4.1 Il bilancio dell'energia del lato acqua/vapore della caldaia

Avendo già definito il bilancio di massa (avendo, cioè, quantificati tutti i flussi in ingresso e in uscita del lato acqua/vapore della caldaia) il bilancio dell'energia consiste semplicemente nell'assegnare a ognuno di questi flussi il rispettivo contenuto energetico.

Lo sbilancio energetico tra l'uscita e l'ingresso complessivi costituisce il risultato del bilancio, ossia l'energia termica netta scambiata.

Siccome tutti i flussi che interessano il lato acqua/vapore sono composti dal medesimo fluido termo-vettore (tipicamente acqua, ma in linea di principio potrebbe trattarsi di olio diatermico o altri fluidi), i contenuti energetici specifici dipendono dalle entalpie fisiche.

Come già accennato al § 1.1, l'entalpia è una proprietà di stato che dipende dalla temperatura e dalla pressione del fluido. Trattandosi di un potenziale termodinamico, solo le differenze di entalpia hanno significato fisico, mentre i valori assoluti sono definiti da una convenzione che stabilisce il sistema di riferimento.

Analogamente, per esprimere il contenuto energetico dei flussi materiali, è necessario fissare un sistema di riferimento. La norma tecnica EN 12952-15 suggerisce, per i flussi materiali che interagiscono con il sotto-volume acqua/vapore, di adottare il riferimento dell'acqua d'alimento, sicché il generico flusso "j" sarà caratterizzato dal contenuto energetico:

$$E_j = M_j \cdot (h_j - h_{alim.}) \quad (4.1)$$

In tale equazione sono indicate con  $M$  le quantità dei vari flussi (tipicamente misurate in tonnellate o chilogrammi all'anno) e con  $h$  le entalpie sia del flusso "j", sia del flusso d'alimento della caldaia ("alim."). Esprimendo il contenuto energetico in funzione delle differenze d'entalpia, si prescinde dal sistema di riferimento adottato per esprimere tale grandezza termodinamica.

### 4.2 Il bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia

Come trattato nel precedente § 3, il sotto-volume di controllo costituito dal lato rifiuti/fumi della caldaia, diversamente dal lato acqua/vapore, è interessato dall'interazione di flussi di differente natura chimica. Per questo motivo, è di fondamentale importanza esprimere il contenuto energetico di ogni sostanza in modo da considerare sia la componente fisica (o "termo-meccanica" – pedice "ph"), che si esplica con scambi di lavoro e calore senza cambiamento di natura chimica, sia la componente chimica (pedice "ch") che, invece, quantifica proprio il potenziale scambio energetico legato a reazioni chimiche.

Conseguentemente, il contenuto energetico specifico della generica sostanza “*k*”, quantificato dalla proprietà termodinamica “entalpia” (“*h*”), dovrà includere entrambe tali componenti secondo la relazione:

$$h_k = h_{k,ch} + h_{k,ph} \quad (4.2)$$

#### 4.2.1 Entalpia chimica

Per la quantificazione della componente chimica dell'entalpia, questa trattazione si discosta dal sistema delle “entalpie di formazione”, utilizzato in Chimica, atteso che l'obiettivo di questa analisi è la determinazione del contenuto energetico del rifiuto trattato in termini di Potere Calorifico Inferiore (PCI).

La convenzione del PCI, comunemente adottata solo per le sostanze combustibili, è basata su un sistema di riferimento differente da quello delle “entalpie di formazione”, così come evidenziato nella seguente Tabella 4.1. In tale tabella sono elencate, per i principali elementi chimici d'interesse ai fini di questa trattazione, le corrispondenti specie molecolari assunte a riferimento dalla convenzione delle “entalpie di formazione” e da quella del PCI. Ognuna delle due convenzioni assume, per le rispettive specie molecolari di riferimento, contenuto energetico (cioè entalpia specifica) nullo in corrispondenza delle condizioni termodinamiche di riferimento<sup>5</sup> di 1 atm(a) e 25 °C. In base a tali assunzioni, sono calcolati i contenuti energetici di tutte le altre specie molecolari, secondo la regola nota in Chimica come “legge di Hess”.

**Tabella 4.1: Specie chimiche di riferimento nelle convenzioni delle “entalpie di formazione” e del “PCI” per i principali elementi chimici nell'ambito della presente trattazione.**

<b>Convenzione:</b>	<b>Entalpie di formazione</b>	<b>PCI</b>
<b>Elemento</b>	<b>Specie molecolare di riferimento</b>	
C	C <sub>(gr)</sub>	CO <sub>2</sub>
H	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>
N	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
O	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
S	S <sub>(a)</sub>	SO <sub>2</sub>
Cl	Cl <sub>2</sub>	HCl

La generalizzazione della convenzione del PCI, comunemente riservata solo ai combustibili tradizionali, a tutte le sostanze che interagiscono con il lato rifiuti/fumi della caldaia di un termovalorizzatore è possibile a patto di definire delle specie di riferimento anche per gli elementi comunemente trascurati da tale convenzione, come il Cloro (“Cl”). L'Appendice B riporta estesamente lo sviluppo di questa metodologia definendo, di volta in volta, riferimenti opportuni per

<sup>5</sup> In realtà per le sostanze gassose il riferimento internazionalmente accettato è attualmente 1 bar(a) - 25°C, mentre per le specie condensate (solidi e liquidi) 1 atm(a) - 25°C. Ai fini di questa trattazione la differenza di pressione tra i due riferimenti è assolutamente trascurabile.

le varie sostanze e derogando tale requisito, dove indispensabile, in modo da preservare comunque la coerenza complessiva dell'approccio.

Mentre la convenzione delle "entalpie di formazione" definisce per ogni specie molecolare il relativo contenuto energetico come entalpia di formazione, la convenzione del PCI ne definisce proprio il Potere Calorifico Inferiore (PCI), che è un concetto maggiormente intuitivo e immediatamente legato all'esperienza della bomba calorimetrica<sup>6</sup>.

La successiva Tabella 4.2 riporta i PCI di diverse sostanze rilevanti ai fini della presente analisi, secondo le valutazioni svolte in Appendice B.

#### 4.2.2 Entalpia fisica

Il PCI, o l'entalpia di formazione, costituisce la componente d'energia chimica posseduta da una certa sostanza, ossia l'energia che tale sostanza complessivamente possiede, rispetto al corrispondente sistema di riferimento, quando si trova nelle condizioni di riferimento di 1 atm(a) e 25 °C. Quando le condizioni termodinamiche sono diverse da quelle di riferimento, oltre a possedere la propria componente d'energia chimica, ogni sostanza possiede anche una componente d'energia fisica che, per un sistema fluente come quello qui considerato, è quantificata mediante l'entalpia fisica.

Per il lato acqua/vapore della caldaia, il contenuto energetico dei flussi materiali è espresso secondo la convenzione "dell'acqua alimento" (così come suggerito dalla norma EN 12952-15) che prescinde dal sistema di riferimento adottato per l'entalpia fisica del fluido termo-vettore.

Per il lato fumi della caldaia, invece, è necessario che l'entalpia fisica delle diverse sostanze adotti un sistema di riferimento conforme a quello impiegato per la componente chimica dell'entalpia. Ciò significa che a 1 atm(a) – 25 °C la componente fisica dell'entalpia di qualsiasi flusso considerato deve essere nulla.

Affinché tale condizione sia sempre verificata, a prescindere dal metodo di calcolo utilizzato per l'entalpia fisica, è sufficiente utilizzare l'espressione:

$$h_{k,ph} = h_k(T, p) - h_k(T_{RIF}, p_{RIF}) \quad (4.3)$$

Come si vede, l'entalpia fisica dipende, in generale, dalla temperatura e dalla pressione alla quale si trova il flusso considerato (cioè il flusso "k"). Siccome il lato fumi della caldaia presenta pressione sempre molto prossima al valore atmosferico (quindi circa 1 atm(a)), è possibile tralasciare la dipendenza dell'entalpia dalla pressione per limitarsi a considerare la dipendenza dalla temperatura. In prima approssimazione, soprattutto in intervalli di temperatura non troppo ampi, l'entalpia fisica dipende dalla temperatura linearmente, mediante un coefficiente di proporzionalità circa costante detto capacità termica specifica o calore specifico (che per le sostanze gassose corrisponde al calore specifico a pressione costante), di seguito indicato con il simbolo  $c_s$ :

---

<sup>6</sup> Si veda la norma ISO 1928 circa l'utilizzo della bomba calorimetrica per la determinazione del PCI dei combustibili solidi d'origine minerale.

$$h_{k,ph} = h_k(T, p) - h_k(T_{RIF}, p_{RIF}) = h_k(T) - h_k(T_{RIF}) = c_{s,k} \cdot (T - T_{RIF}) \quad (4.4)$$

In alcuni casi, in luogo di calore specifico costante nell'intervallo di temperatura considerato, è possibile utilizzare un opportuno valore medio integrale.

**Tabella 4.2: PCI delle sostanze rilevanti ai fini del bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.**

<b>Sostanza</b>	<b>UM<sup>(a)</sup></b>	<b>PCI MJ UM<sup>-1</sup></b>
Gas naturale	$m_S^3$	+34,751
	$m_N^3$	+36,675
Gasolio	kg	+42,800
	l	+35,950
Calce magnessiaca	kg	+0,1809
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	+18,60
		+2,008 €/λ
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	+19,195
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	+20,086
Acqua liquida	kg / l	-2,442
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	+1,699
		+0,4919 €/λ
	l	+1,540
		+0,4461 €/λ
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	+1,844
	l	+1,672
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	+2,062
	l	+1,870
Urea solida per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	+9,103
		+1,139 €/λ
Soluzione acquosa al 40% in massa di urea per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	+2,868
		+0,5124 €/λ
	l	+3,222
		+0,5756 €/λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi	kg	-0,8042
		+0,8445 / λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi (con λ=1,3)	kg	-0,1546
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi	kg	-7,678 / λ
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi (con λ=3,5)	kg	-2,194
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco	kg	-2,124
		-1,001 / λ
	l	-2,126
		-1,002 / λ
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco (con λ=2,4)	kg	-2,541
	l	-2,544
Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri	kg	+33,000
CO (monossido di carbonio)	kg	+10,109
	$m_N^3$	+12,633

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

<sup>(b)</sup> 0,15 kg di idrossido di calce in 1 l di acqua.

L'Appendice C quantifica i valori medi integrali dei calori specifici delle principali sostanze potenzialmente interagenti con il lato fumi della caldaia, nell'ambito dei tipici intervalli di temperatura di interesse per l'applicazione trattata in questa sede. È inoltre valutata l'entità dell'errore massimo commesso nella stima dell'entalpia adottando i valori di calore specifico e l'approccio qui proposti entro gli intervalli di temperatura indicati.

La seguente Tabella 4.3 riassume i valori dei calori specifici discussi in Appendice C.

**Tabella 4.3: Calori specifici delle sostanze rilevanti ai fini del bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.**

<b>Sostanza</b>	<b>UM</b>	<b><math>c_s</math> - kJ/UM-K</b>
Acqua (H <sub>2</sub> O) liquida (0-100 °C)	kg	4,185
Ammoniaca gassosa (pura, 50-500 °C)	kg	$2,0866 + 0,9407 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	$1,5855 + 0,7148 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
EAS (0-250°C)	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,308
FAS da combustione di rifiuti solidi (50-250 °C)	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,413 <sup>(1)</sup>
FAS da combustione di gas naturale (50-500 °C)	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,396
FAS da combustione di gasolio (50-250 °C)	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,379
Ferrosi secchi senza incombusti (50-450 °C)	kg	$0,435 + 0,208 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
Incombusti solidi ( $C_{(gr)}$ , 50-450 °C)	kg	$0,7741 + 1,014 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
Polveri secche, senza incombusti (50-450 °C)	kg	0,8400
Scorie secche, senza incombusti e ferrosi (50-450 °C)	kg	1,0315
VA (0-250 °C)	m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,518

<sup>(1)</sup> Valutazioni più accurate sono possibili considerando il tenore di CO<sub>2</sub> che caratterizza i FAS.

### 4.2.3 Energia associata ai flussi materiali

Adottando, quindi, la convenzione sopra definita (quella del PCI, con l'entalpia fisica indipendente dalla pressione e dipendente dalla temperatura attraverso un calore specifico medio), l'entalpia specifica complessiva del flusso "k" può essere espressa come:

$$h_k = h_{k,ch} + h_{k,ph} = PCI_k + c_{s,k} \cdot (T - T_{RIF}) \quad (4.5)$$

In analogia alla relazione 4.1, per il contenuto energetico su base annua del flusso "k", vale, invece:

$$E_k = M_k \cdot [PCI_k + c_{s,k} \cdot (T - T_{RIF})] \quad (4.6)$$

Ovviamente avendo cura d'utilizzare unità di misura coerenti per le varie grandezze coinvolte.

Si evidenzia che per le sostanze combustibili, caratterizzate da elevato PCI, il contributo di entalpia fisica è solitamente trascurabile, almeno finché la temperatura non differisce dalla temperatura di riferimento di centinaia di gradi.

Per esempio, i rifiuti, che sono generalmente a temperature prossime a quella ambiente, presentano contributo d'entalpia fisica pressoché irrilevante, sicché perde rilevanza anche la quantificazione del corrispondente calore specifico. Per l'aria e i fumi di combustione, che sono flussi d'entità

estremamente rilevante<sup>7</sup>, caratterizzati da PCI nulli, è importante valutare correttamente il contributo fisico alle rispettive entalpie specifiche.

#### 4.2.4 Gli incombusti

Gli incombusti solidi, essendo assimilati a carbonio in stato grafítico, come già discusso nel precedente § 3.4.2, possiedono un contenuto energetico analogo a quello di tale sostanza. Questa circostanza è corroborata anche dalle disposizioni della norma EN 12952-15, dove è indicato un PCI di tali incombusti pari a 33,00 MJ/kg, così come riportato nella precedente Tabella 4.2.

In tale Tabella, non è indicato il PCI dei FAS, che è assunto pari a zero. Ciò poiché l'eventuale presenza di specie incombuste gassose, identificate prevalentemente come monossido di carbonio (CO), è trattata appositamente, in accordo a quanto disposto della norma EN 12952-15. Dato che lo SME registra la concentrazione di CO al camino, è possibile quantificare la massa di tale incombusto annualmente scaricata in atmosfera dall'impianto e, conseguentemente, il corrispondente flusso energetico, che solitamente costituisce un contributo minimale e pressoché trascurabile al bilancio dell'energia complessivo.

#### 4.2.5 La degradazione dell'energia meccanica

Come trattato nel precedente § 1.1, tutta l'energia meccanica introdotta nei vari fluidi (aria, fumi, acqua, vapore) è, in ultima istanza, degradata alla forma termica.

Ciò significa che anche l'energia meccanica introdotta dai ventilatori dell'aria di combustione o dei fumi riciccolati contribuisce al bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia qualora tali dispositivi siano inclusi nel volume di controllo del combustore-caldaia. Si tratta di piccoli apporti, spesso trascurabili.

Solitamente, il consumo elettrico annuo dei vari ventilatori non è registrato. È, invece, approssimativamente nota la prevalenza media fornita e sono spesso registrate le portate orarie elaborate.

Una stima forfettaria dell'energia oraria introdotta nel fluido dal dispositivo "x" è fornita dalla seguente relazione:

$$E_x \left[ \frac{kJ}{h} \right] = \frac{\dot{V}_x \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \Delta p_x [kPa]}{0,5} \quad (4.7)$$

Avendo cura di riferire la portata alle condizioni medie di temperatura e pressione nel caso in cui la registrazione avvenga in una base convenzionale (p.e. in normal-metri-cubi). La cumulata annua di queste energie orarie (cioè la somma di queste potenze su tutte le ore di funzionamento annue dell'impianto) fornisce l'energia annua complessivamente introdotta, ossia un addendo del bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.

---

<sup>7</sup> In termini di flussi massici, sono i due flussi più rilevanti che interagiscono con il lato fumi della caldaia.

## 4.2.6 Svolgimento dei calcoli

Definite le entalpie specifiche di tutti i flussi materiali che interagiscono con il lato fumi della caldaia, il bilancio dell'energia è redatto in modo analogo a quanto fatto per il lato vapore.

La procedura prevede di quantificare innanzitutto gli output energetici della caldaia:

- i flussi energetici associati ai flussi materiali in uscita dal lato fumi;
- l'energia termica netta scambiata con il fluido termo-vettore;
- altre estrazioni di energia termica;
- le perdite termiche.

Di queste quattro categorie di termini, i primi due sono già stati determinati.

Per "altre estrazioni di energia termica" si intende calore asportato da circuiti diversi da quello del fluido termo-vettore principale, come il calore asportato dal sistema di raffreddamento della griglia nei combustori con griglia raffreddata ad acqua o a olio.

Infine, per il quarto termine, è necessario applicare una metodologia di quantificazione. La norma EN 12952-15 valuta le perdite termiche di caldaie a tubi d'acqua mediante la seguente relazione empirica:

$$\dot{Q}_{RC}[MW] = C \cdot (\dot{Q}_N[MW])^{0,7} \quad (4.8)$$

Secondo tale equazione, la potenza termica complessivamente persa (espressa in MW) per convezione e irraggiamento è proporzionale a un'opportuna potenza della potenza utile di targa della caldaia (pure espressa in MW). Il coefficiente di proporzionalità  $C$  dipende dalla tipologia di combustibile per il quale è stata progettata la caldaia. Per le caldaie a lignite e con combustore a letto fluido, che rappresentano le tipologie più prossime ai sistemi per rifiuti, il valore del coefficiente  $C$  è 0,0315.

Per l'applicazione della relazione 4.8 nel contesto del bilancio energetico annuo è necessario prestare attenzione a due aspetti:

- è necessario considerare distintamente le varie caldaie presenti nel volume di controllo, in quanto la relazione non è lineare nella potenza utile di targa;
- l'energia complessivamente persa su base annua può essere determinata sulla base della potenza solo considerando le effettive ore annue di funzionamento di ogni singola caldaia.

Alla luce di queste considerazioni, l'energia annualmente persa dal volume di controllo per irraggiamento e convezione è valutata mediante l'equazione:

$$E_{RC}[GJ/a] = 0,0315 \cdot 3,6 \cdot \sum_{y=1}^m \{h_y \cdot (\dot{Q}_{N,y}[MW])^{0,7}\} \quad (4.9)$$

Dove è considerato un volume di controllo contenete " $m$ " caldaie, ognuna delle quali indicata come caldaia " $y$ ", caratterizzata da una potenza utile di targa  $\dot{Q}_{N,y}$  (espressa in MW) e che ha funzionato nell'anno considerato  $h_y$  ore.

Una volta quantificati tutti gli output energetici del volume di controllo lato fumi della caldaia, si prendono in considerazione tutti gli input energetici eccetto quello principale, l'energia apportata dai rifiuti, che costituisce l'incognita del bilancio dell'energia.

I vari input energetici che devono essere preventivamente quantificati sono:

- i flussi energetici associati ai combustibili ausiliari / d'avviamento / fermata introdotti durante le ore di funzionamento di ogni combustore-caldaia considerate per l'effettuazione dei bilanci annui;
- i flussi energetici associati agli ingressi d'aria (primaria, secondaria, terziaria se presente e ingressi indesiderati) specialmente per quelli pre-riscaldati;
- i flussi energetici associati a tutti gli altri flussi materiali introdotti e considerati in precedenza ai fini del bilancio di massa (eventuali reagenti, vapori, acqua liquida, ricircolo fumi – se esterno al volume di controllo, etc.).

In analogia a quanto fatto per il bilancio di massa del lato fumi della caldaia, anche per il bilancio dell'energia la somma di tutti gli output energetici deve corrispondere alla somma dei vari input. Per far sì che ciò accada, l'input energetico principale, ossia il contenuto energetico dei rifiuti trattati (il termine  $E_w$  della formula R1) deve assumere un preciso valore, che costituisce la soluzione (chiusura) del bilancio dell'energia.

Tale procedura è esemplificata nella seguente Figura 4.1.

		Portata t/a	Energia TJ/a
Calore lordo scambiato		-	-XXX
Input	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
<b>Totale</b>			<b>0,00</b>

Dal bilancio di massa
Bilancio dell'energia

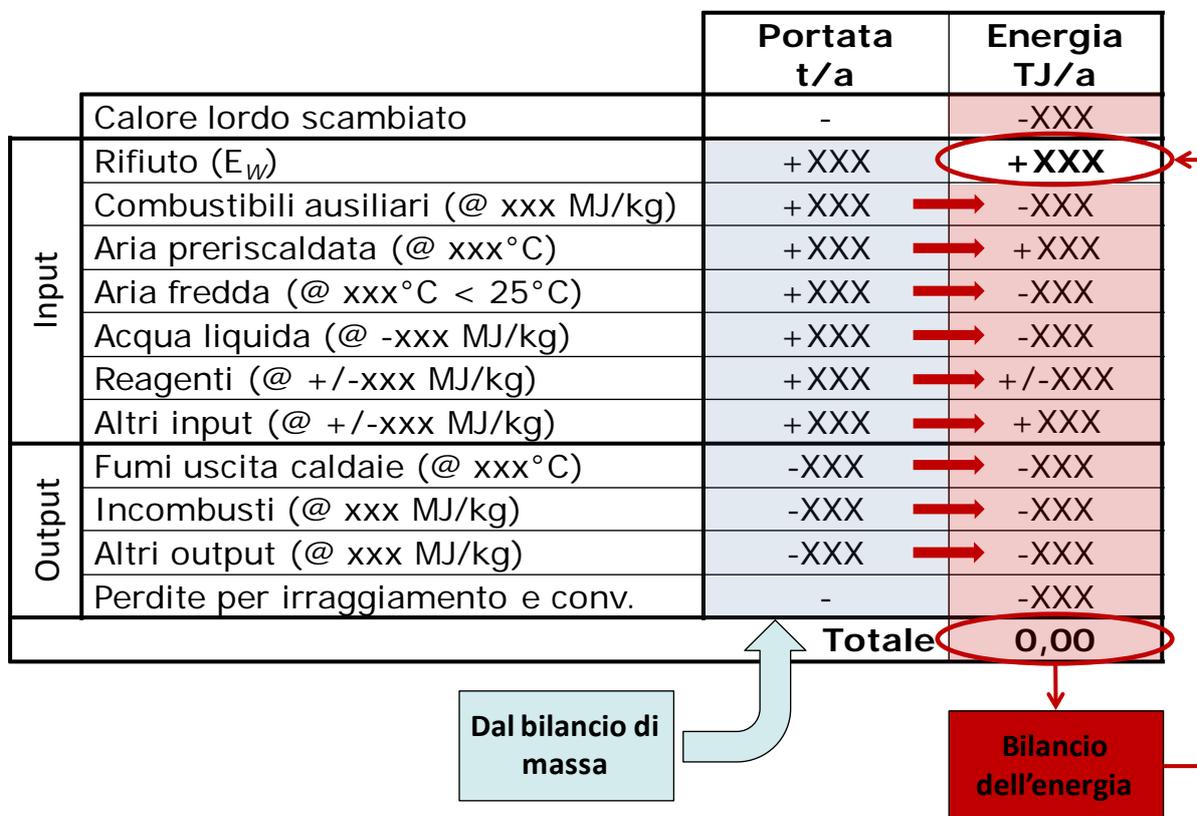


Figura 4.1: Esempificazione della procedura di soluzione del bilancio dell'energia per il lato fumi della caldaia.

Il successivo § 5 riporta diversi esempi a chiarimento di molti aspetti trattati in questo documento. Tra di essi è presente anche la valutazione del bilancio dell'energia lato fumi secondo lo schema qui spiegato e illustrato in Figura 4.1.



## 5 Applicazione della metodologia di valutazione dell'indice R1

Il presente Capitolo, oltre a discutere diversi aspetti applicativi della metodologia presentata nei capitoli precedenti, riporta sia un esempio completo di valutazione dell'indice R1, sia una serie di ulteriori esempi relativi ad aspetti specifici.

### 5.1 L'elaborazione delle registrazioni orarie

Come evidenziato nel precedente § 3.3.5, alcune elaborazioni, in particolare quelle relative alla determinazione del volume e delle caratteristiche dei fumi in uscita dal volume di controllo combustore/i-caldaia/e, devono essere necessariamente svolte su base almeno oraria; ciò significa elaborare le medie orarie delle varie grandezze d'esercizio registrate dalla strumentazione d'impianto (solitamente DCS o SME).

In realtà, è conveniente partire dalle registrazioni orarie del maggior numero possibile di grandezze utili, in modo tale da disporre di un elevato dettaglio nella descrizione dell'esercizio considerato.

Il primo passo dell'elaborazione delle varie registrazioni orarie riguarda l'individuazione dei periodi di marcia delle varie linee e dei gruppi turbo-generatore e Teleriscaldamento (TLR).

Relativamente ai gruppi produttivi, ossia al gruppo turbo-generatore, al gruppo del TLR, nonché eventuali altre utenze che contribuiscono al termine  $E_P$  dell'indice R1 (cfr. il § 1.1), sono individuabili due stati:

- “Impianto in produzione”: quando è erogato almeno uno degli effetti utili che contribuiscono al termine  $E_P$  dell'indice R1.
- “Impianto non in produzione”: quando nessuno degli effetti utili di cui al punto precedente è erogato.

L'assenza di un effetto utile dovrebbe concettualmente corrispondere a un valore nullo della corrispondente variabile estensiva associata: la potenza elettrica attiva prodotta dal turbo-generatore, la potenza termica registrata dal contatore del TLR, etc. Tali variabili estensive sono, in realtà, quantificate da misuratori solitamente caratterizzati da un elevato valore di fondo scala, sicché quanto la variabile misurata è effettivamente nulla, rilevano comunque un piccolo errore, positivo o negativo. Ciò significa che per discriminare quando una variabile è effettivamente nulla occorre fissare un valore di soglia, al di sotto del quale ritenere nulla la registrazione (e, eventualmente, azzerarla fisicamente nel foglio di calcolo utilizzato). Per esempio, per un turbo-generatore con potenza di targa di svariati megawatt, è tipicamente necessario fissare una soglia sulla potenza elettrica prodotta di decine di chilowatt. Più in generale, il valore della soglia da fissare per ogni variabile può essere desunto dall'analisi dei valori registrati durante periodi di fermata noti, nei quali il valore effettivo è nullo.

In base allo stato di produzione degli effetti utili, per ogni linea di termovalorizzazione, in generale, sono individuabili quattro possibili stati:

1. Linea in funzione che contribuisce all'erogazione degli effetti utili: quando la linea sta producendo vapore (produzione di vapore al di sopra di una certa soglia), a una pressione tale da consentirne la ricezione da parte del sistema del vapore (pressione pari o maggiore alla maggiore tra le pressioni di produzioni delle altre linee diminuite di un adeguato margine - tipicamente 1 bar o poco più), mentre l'impianto è produttivo.

2. Linea in funzione con impianto non produttivo: quando la linea produce vapore secondo i criteri definiti al precedente punto 1, ma l'impianto non sta erogando effetti utili.
3. Linea in transitorio d'avviamento / fermata: quando la linea non sta producendo vapore secondo i criteri definiti al precedente punto 1, ma i bruciatori d'avviamento / sostentamento sono comunque in funzione (la portata di combustibile ausiliario è superiore a un opportuno valore di soglia).
4. Linea ferma: non c'è produzione di vapore secondo i criteri definiti al precedente punto 1 e tantomeno consumo di gas naturale secondo il criterio introdotto al precedente punto 3.

Siccome la linea considerata può essere in trattamento rifiuti in qualsiasi delle condizioni da 1 a 3 (anche in 3, durante le fasi di spegnimento, può ancora essere presente combustione di rifiuto), dal punto di vista concettuale tutte le ore di funzionamento che ricadono in tali tre stati devono essere considerate nella definizione del periodo di riferimento per la realizzazione dei bilanci di massa e di energia (cioè ai fini della determinazione del termine  $E_W$ ).

Chiaramente, quando la disponibilità di registrazioni orarie non è così completa (nel caso manchi, per esempio, la registrazione della portata del combustibile ai bruciatori d'avviamento / sostentamento), si può seguire un approccio semplificato che, inevitabilmente, considererà un periodo di funzionamento più breve.

Del resto, la disponibilità delle registrazioni orarie anche per la portata del combustibile ausiliario consente una distinzione puntuale tra le quote di consumo che concorrono alla determinazione rispettivamente dei termini  $E_F$  ed  $E_I$  della formula R1. In particolare si avrà:

- Contributo a  $E_F$ : solo quando, in presenza di consumo di combustibile ausiliario, la linea è in stato produttivo (stato 1 dell'elenco sopra discusso).
- Contributo a  $E_I$ : quando, in presenza di consumo di combustibile ausiliario, la linea è negli stati 2 o 3 dell'elenco sopra discusso.
- Nessun contributo: quando non c'è consumo di combustibile ausiliario.

In ognuno di questi tre casi, il consumo di combustibile ausiliario deve essere considerato presente quando la registrazione della portata supera un'opportuna soglia.

In tema di elaborazione delle registrazioni orarie, occorre, infine, valutare le grandezze cumulate.

In conformità a quanto affermato nel precedente § 3.3.5, la somma dei valori medi orari di una portata su tutte le ore effettive d'esercizio restituisce il volume annuo complessivo della grandezza monitorata (volume/massa di fumi, rifiuti, vapore, etc.).

Tali risultati, tuttavia, possono differire, a volte anche sensibilmente, da quelli effettivi, in quanto i valori cumulati sono misurati con maggiore accuratezza da misuratori integrali (solitamente detti "contatori" di energia, volume, etc.) rispetto alle valutazioni basate sui misuratori istantanei (di potenza, portata, etc.). In presenza di scostamenti vistosi tra il valore cumulato calcolato partendo dalle medie orarie e quello risultante dai consuntivi periodici, è opportuno correggere le registrazioni orarie mediante un opportuno fattore di proporzionalità che cerchi di compensare, mediamente, gli errori di misura effettuati sulle grandezze istantanee (esempi di queste grandezze sono l'energia elettrica prodotta dal turbo-generatore, il quantitativo di reagenti consumato, etc.).

## 5.2 Esempio completo di valutazione dell'indice R1

Si consideri un impianto composto da due linee di trattamento di configurazione identica, schematicamente rappresentata nella seguente Figura 5.1.

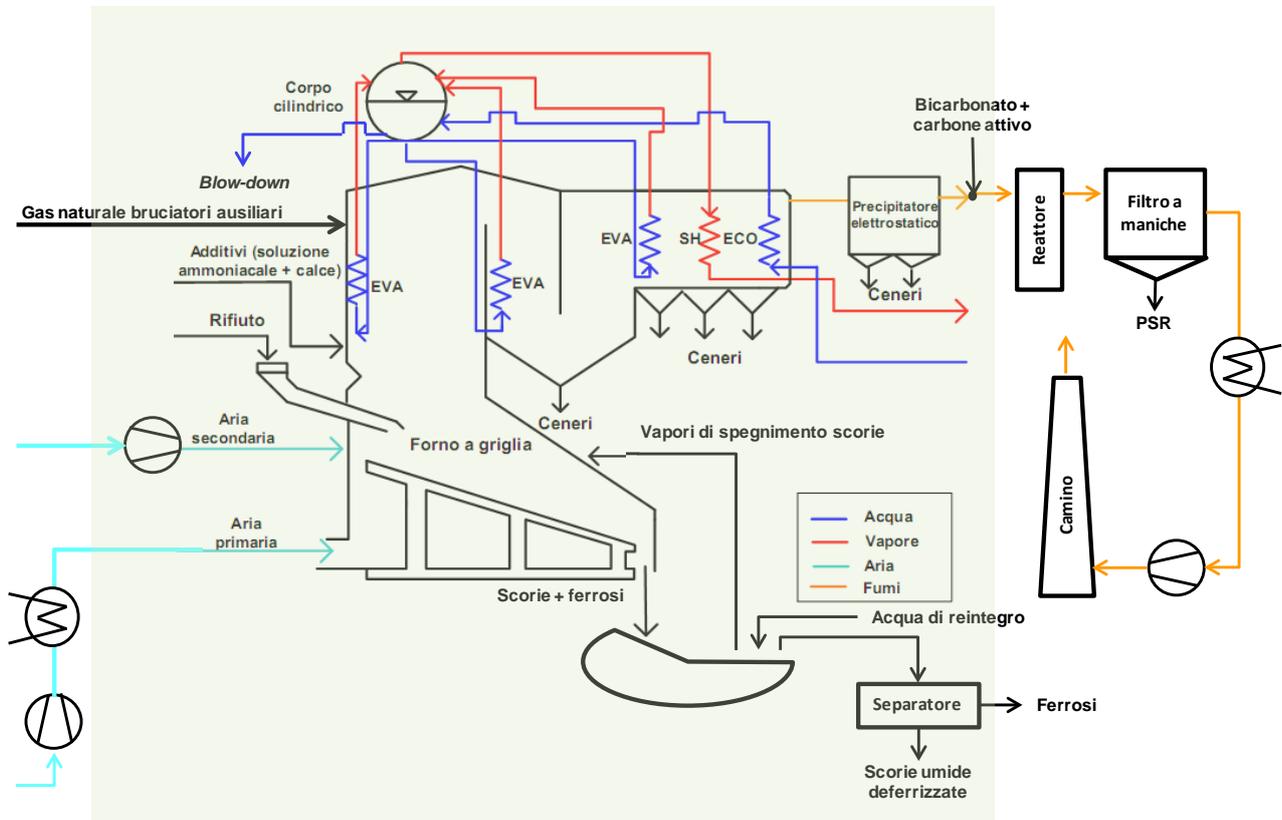


Figura 5.1: Schema della configurazione di ognuna delle due linee che compongono il termovalorizzatore considerato. L'area dell'immagine ombreggiata rappresenta il volume di controllo relativo ai bilanci di massa e dell'energia del sistema combustore/i-caldaia/e.

Ogni linea è basata su un combustore a griglia integrato con la caldaia a tubi d'acqua. L'aria di combustione primaria, prelevata dalla fossa rifiuti, è pre-riscaldata mediante scambiatori alimentati da vapore proveniente dai collettori a media e bassa pressione del ciclo termico, mentre l'aria secondaria è prelevata dall'ambiente.

Le scorie sono scaricate a fondo-griglia in un bagno di spegnimento, dalle quali sono poi estratte e de-ferrizzate.

In camera di combustione, oltre ai rifiuti e all'aria secondaria, è iniettata anche della calce magnesiaca, al fine di operare un primo abbattimento dei gas acidi e facilitare la pulizia della caldaia. Sono inoltre presenti dei bruciatori d'avviamento / sostentamento a gas naturale.

La caldaia presenta la classica configurazione con tre passaggi radianti verticali e la sezione convettiva orizzontale.

Le ceneri di caldaia sono raccolte mediante le tramogge alla base del secondo giro fumi e lungo la sezione convettiva. Tra i banchi convettivi è disposto un catalizzatore de- $NO_x$ , per il cui funzionamento è iniettata della soluzione ammoniacale.

Il circuito acqua-vapore presenta la derivazione dell'acqua per l'attemperamento del vapore all'ingresso del banco economizzatore, dopo la misurazione della portata d'acqua alimento.

Non sono presenti ulteriori estrazioni / introduzioni di acqua / vapore sul relativo circuito tra la due sezioni di misura della portata (acqua alimento - vapore surriscaldato).

All'uscita della caldaia è presente un precipitatore elettrostatico, che funge da primo stadio di depolverazione dei fumi, seguito dall'iniezione di bicarbonato di sodio e carbone attivo a monte di un reattore di contatto.

Concludono la linea di trattamento fumi un filtro a maniche, dal quale sono estratti i Prodotti Sodici Residui (PSR), uno scambiatore recuperativo che preriscalda il condensato del ciclo a vapore, il ventilatore di coda e il camino.

La seguente Tabella 5.1 riporta i dati progettuali relativi alla singola linea.

**Tabella 5.1: Caratteristiche progettuali di ognuna delle due linee del termovalorizzatore di RSU considerato.**

<b>Caratteristica:</b>	<b>Valore</b>
Potenzialità di combustione, MW <sub>PCI</sub>	22,7
Potenza termica utile, MW <sub>T</sub>	21,1
Produzione nominale di vapore, t/h	29,0
Pressione del vapore surriscaldato, bar(g)	40,0
Temperatura di surriscaldamento, °C	400
Temperatura acqua alimento, °C	142
Temperatura di preriscaldamento aria primaria, °C	165
Temperatura aria secondaria, °C	25
Temperatura fumi all'uscita della caldaia, °C	190

La sezione di conversione dell'energia produce esclusivamente elettricità mediante una turbina a vapore a condensazione. I principali dati nominali del ciclo a vapore sono riassunti nella seguente Tabella 5.2.

**Tabella 5.2: Caratteristiche progettuali del ciclo a vapore.**

<b>Caratteristica:</b>	<b>Valore</b>
Pressione d'ammissione vapore, bar(g)	39,0
Temperatura d'ammissione vapore, °C	398
Portata di vapore all'ammissione, t/h	58,0
Pressione di condensazione, bar(a)	0,08
Potenza elettrica nominale, MW	11,9

Con la procedura descritta nel precedente § 5.1, si elaborano le registrazioni orarie, stabilendo innanzitutto che le linee 1 e 2 dell'impianto sono state in esercizio nell'anno considerato rispettivamente 8.102 e 7.897 ore. Tali periodi includono tutti i possibili stati di funzionamento. Quindi, mediante la metodologia descritta nel precedente § 3.3, è possibile determinare il volume e le caratteristiche dei fumi scaricati da ognuna delle due caldaie in tali periodi d'esercizio, partendo

dalle registrazioni orarie delle portate e composizioni dei fumi al camino, dalle concentrazioni di ossigeno nelle due caldaie, nonché dalle portate dei reagenti iniettati lungo le due linee di trattamento dei fumi (bicarbonato di calce e carbone attivo - quest'ultimo trascurato). La successiva Tabella 5.3 riporta tutti i risultati di tali elaborazioni.

I dati in tale Tabella sono aggregati per entrambe le linee, con la sola eccezione delle durate dei due periodi d'esercizio. Le varie note specificano le modalità d'elaborazione adottate, che sono conformi a quanto indicato nei precedenti §§ 3 e 4. Gli unici dati mancanti per la caratterizzazione dell'esercizio considerato nella prospettiva della valutazione dell'indice R1 sono la produzione utile di energia (che concorre al termine  $E_P$ ) e l'elettricità importata, rispettivamente discussi nei successivi §§ 5.2.1 e 5.2.2.

Relativamente al bilancio di massa del lato acqua/vapore del volume di controllo, è immediato rilevare come la quantità d'acqua alimento misurata di 429.729 t sia inferiore alla produzione di vapore surriscaldato di 430.000 t. Si consideri che, in questo caso, la portata d'acqua alimento è misurata prima della derivazione dell'acqua d'atterramento, quindi non sono presenti ulteriori apporti al circuito acqua/vapore incluso nel volume di controllo considerato. In questo caso, non sono neppure presenti estrazioni di acqua o vapore per scopi particolari, fatto salvo lo spurgo. L'entità su base annua dello spurgo risulterebbe, dalla chiusura del bilancio di massa:

$$M_{\text{spurgo}} = 429.729 - 430.000 = -271 \text{ t}$$

Si otterrebbe, cioè, un valore negativo, chiaramente inaccettabile e frutto dell'effetto combinato dei vari errori di misura cumulati sull'intero esercizio considerato.

Seguendo l'approccio definito al precedente § 3.1, si ignora la registrazione relativa alla portata dell'acqua alimento e si stima l'entità dello spurgo su base annua come funzione della produzione di vapore e della potenza di combustione complessiva che alimenta il ciclo termico. Relativamente a quest'ultimo dato, dalla precedente Tabella 5.1 risulta 55,4 MW<sub>PCI</sub> (= 2 x 22,7 MW<sub>PCI</sub>).

Pertanto si ha:

$$M_{\text{spurgo}} = 430.000 \cdot \left[ 1,0\% + \frac{2,5\% - 1,0\%}{200 - 25} \cdot (200 - 55,4) \right] = 430.000 \cdot 2,24\% = 9.630 \text{ t}$$

Di conseguenza, il consumo d'acqua alimento è valutato in:

$$M_{\text{Alim.}} = 430.000 + 9.630 = 439.630 \text{ t}$$

Riconciliato il bilancio di massa, è possibile passare al bilancio dell'energia, assegnando a ogni flusso materiale la corrispondente entalpia. In questo caso si utilizzano i risultati delle routine IAWSP97 (IAPWS, 2007), che sono implementate da molti software anche freeware.

La Tabella 5.4 riporta tutte le proprietà termodinamiche, i relativi flussi energetici e il risultato del bilancio dell'energia lato vapore.

**Tabella 5.3: Sommario dei dati relativi all'esercizio considerato.**

	<b>Linea 1</b>	<b>Linea 2</b>
Rifiuti complessivamente trattati <sup>(1)</sup> , <i>t</i>	117.074	
Ore effettive d'esercizio <sup>(2)</sup> , <i>h</i>	8.102	7.897
Vapore prodotto <sup>(3)</sup> , <i>t</i>	430.000	
Consumo d'acqua alimento <sup>(3)</sup> , <i>t</i>	429.729	
Temperatura media acqua alimento <sup>(4)</sup> , °C	140,0	
Consumo dei bruciatori ausiliari <sup>(3)</sup> , <i>mS</i> <sup>3</sup>	395.604	
Di cui come <i>E<sub>F</sub></i> , <i>mS</i> <sup>3</sup>	245.675	
Di cui come <i>E<sub>I</sub></i> , <i>mS</i> <sup>3</sup>	149.929	
Consumo di calce magnesiaca <sup>(3,5)</sup> , <i>t</i>	503,7	
Consumo di soluzione ammoniacale <sup>(3,5)</sup> , <i>t</i>	851,3	
Acqua per iniezione soluzione ammoniacale <sup>(6)</sup>	6.384,8	
Vapore per soffiatori di fuliggine <sup>(7)</sup> , <i>t</i>	598,1	
Produzione di scorie umide senza ferrosi <sup>(8)</sup> , <i>t</i>	23.130	
Produzione di materiali ferrosi <sup>(8)</sup> , <i>t</i>	1.671	
Produzioni di polveri di caldaia + ESP <sup>(8,9)</sup> , <i>t</i>	2.476	
Temperatura media fumi uscita caldaia <sup>(10)</sup> , °C	205,3	
Consumo di bicarbonato di sodio <sup>(3,5)</sup> , <i>t</i>	1.877,3	
Consumo di carbone attivo <sup>(3,5)</sup> , <i>t</i>	14,4	
Produzione di PSR <sup>(8,11)</sup> , <i>t</i>	1.740,5	
Produzione di fumi secchi normali al camino <sup>(3)</sup> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	777.084.000	
Fumi "tal quali" all'uscita della caldaia, <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	683.947.900	
di cui <i>EAS</i> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	200.777.100	
di cui <i>FAS</i> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	369.068.400	
di cui <i>VA</i> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	114.102.400	
Aria primaria <sup>(3)</sup> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	298.860.000	
Temperatura media aria primaria <sup>(10)</sup> , °C	158,2	
Aria secondaria <sup>(3)</sup> , <i>m<sub>N</sub></i> <sup>3</sup>	199.240.000	
Temperatura media aria secondaria <sup>(10)</sup> , °C	26,1	

<sup>(1)</sup> Rifiuti complessivamente conferiti all'impianto, corretto per tener conto dello sbilancio della fossa tra inizio e fine esercizio.

<sup>(2)</sup> Ore complessive di funzionamento delle linee (cfr. § 5.1).

<sup>(3)</sup> Somma degli integrali delle portate medie orarie nelle ore di funzionamento (cfr. nota 2).

<sup>(4)</sup> Valore medio integrale pesato con le portate d'acqua alimento orarie.

<sup>(5)</sup> Corretto sulla base del quantitativo annuo effettivamente riscontrato.

<sup>(6)</sup> Stima sulla base del rapporto di portata 7,5 kg acqua per chilogrammo di soluzione ammoniacale.

<sup>(7)</sup> Stima basata su durata / portata media di soffiatura, frequenza d'intervento e ore d'esercizio.

<sup>(8)</sup> Dato annuo effettivo.

<sup>(9)</sup> ESP = "Electro-Static Precipitator", cioè precipitatore elettrostatico, costituisce il primo stadio di depolverazione dei fumi post-caldaia.

<sup>(10)</sup> Valore medio integrale pesato con le rispettive portate.

<sup>(11)</sup> PSR = Prodotti Sodici Residui, sono i prodotti d'abbattimento dei gas acidi prodotti dall'impiego di bicarbonato di sodio e carbone attivo.

**Tabella 5.4: Bilancio dell'energia lato acqua per l'esempio di caldaia convenzionale.**

	<b>M</b> <b>t/a</b>	<b>T</b> <b>°C</b>	<b>p</b> <b>bar(a)</b>	<b>h</b> <b>kJ/kg</b>	<b>E</b> <b>TJ/a</b>
Acqua alimento	439.630	140	~80,0	594,2	0,000
Acqua d'attemperamento					
Spurgo	-9.630	258,8	46,0	1.128,8	-5,1
Vapore	-430.000	400	41,0	3.216,6	-1.127,6
<b>Totale</b>	<b>0</b>				<b>-1.132,8</b>

Circa il contenuto di Tabella 5.4, valgono le seguenti note:

- l'entità di ogni flusso, espressa in tonnellate annue, è riportata con il segno positivo quando rappresenta un ingresso in caldaia e con segno negativo quando costituisce un'uscita;
- l'acqua alimento e l'acqua d'attemperamento sono considerate insieme, poiché si è assunto che derivino entrambe dalla mandata della pompa d'alimento e si trovino, pertanto, nelle medesime condizioni termodinamiche (se tale condizione non sussistesse, devono essere trattate singolarmente);
- tutte le pressioni sono espresse in bar assoluti, poiché le entalpie sono normalmente espresse in funzione delle pressioni assolute e non di quelle relative (si veda la pressione del vapore prodotto che è 41 bar(a), corrispondenti ai 40 bar(g) indicati in precedenza);
- la pressione dell'acqua alimento / attemperamento è indicata approssimativamente, in quanto l'entalpia del liquido a medio-bassa temperatura dipende poco dalla pressione;
- la pressione dello spurgo è quella media annua del corpo cilindrico (escludendo dalla media i periodi di fermata, cfr. § 3.3.5);
- la temperatura e l'entalpia dello spurgo sono quelle del liquido saturo alla pressione media del corpo cilindrico;
- la somma totale dell'entità dei vari flussi deve essere nulla, poiché il bilancio di massa deve essere verificato (cioè "chiuso");
- il prodotto delle entalpie specifiche e dell'entità dei vari flussi annui fornisce, con opportune conversioni d'unità di misura, i flussi energetici annui, la cui somma totale valuta l'energia termica annualmente uscente (da cui il segno negativo) dal sotto-volume di controllo considerato. Tale risultato, cambiato di segno, corrisponde all'energia termica netta ricevuta dal fluido termo-vettore nell'anno considerato, in modo che il bilancio dell'energia risulti verificato (cioè "chiuso").

Per procedere con il bilancio di massa del lato fumi delle due caldaie considerate una singola entità (come per i bilanci di massa e dell'energia del lato acqua), bisogna innanzitutto considerare il bilancio dei solidi, riassunto nella seguente Tabella 5.5.

**Tabella 5.5: Bilancio di massa dei solidi sul lato fumi della caldaia.**

<b>ID</b>	<b>Scorie di fondo-griglia</b>		
A0	Scorie di fondo-griglia umide con incombusti, senza ferrosi, <i>t/a</i>	23.130,00	<i>Da consuntivi</i>
UA0	Tenore di umidità, % <i>in massa</i>	15,0	<i>Da analisi</i>
A1	Umidità, <i>t/a</i>	3.469,50	= A0 * UA0
A2	Scorie di fondo-griglia secche, con incombusti, senza ferrosi, <i>t/a</i>	19.660,50	= A0 – A1
IA2	Tenore di incombusti sul secco, % <i>in massa</i>	1,21	<i>Da analisi</i>
A3	Incombusti nelle scorie secche (senza ferrosi), <i>t/a</i>	237,89	= A2 * IA2
A4	Scorie di fondo-griglia secche, senza incombusti e ferrosi, <i>t/a</i>	19.422,61	= A2 – A3
B2	Ferrosi secchi con incombusti, <i>t/a</i>	1.671,00	<i>Da consuntivi</i>
IB2	Tenore di incombusti sul secco (= a quello delle scorie), % <i>in massa</i>	1,21	= IA2
B3	Incombusti nei ferrosi secchi, <i>t/a</i>	21.331,50	= B2 * IB2
B4	Ferrosi senza incombusti, <i>t/a</i>	1.650,78	= B2 – B3
<b>Polveri di caldaia (eventualmente + ESP)</b>			
C2	Polveri secche con incombusti, <i>t/a</i>	2.476,00	<i>Da consuntivi</i>
IC2	Tenore di incombusti, % <i>in massa</i>	1,21	= IA2
C3	Incombusti nelle polveri, <i>t/a</i>	29,96	= C2 * IC2
C4	Polveri senza incombusti, <i>t/a</i>	2.446,04	= C2 – C3
<b>Bilancio delle ceneri del rifiuto</b>			
D2	Calce magnesiaca iniettata in caldaia, <i>t/a</i>	503,7	<i>Da consuntivi</i>
SD2	Produzione specifica di solidi, <i>t/t</i>	1,092	<i>Appendice A</i>
D4	Produzione di solidi (secchi), <i>t/a</i>	550,0	= D2 * SD2
E4	Ceneri del rifiuto, <i>t/a</i>	22.969,43	= A4 + B4 + C4 – D4
E2	Solidi secchi con incombusti scaricati nei bagni spegnimento, <i>t/a</i>	21.331,50	= A2 + B2
<b>Bilancio degli incombusti solidi</b>			
	Incombusti solidi secchi prodotti, <i>t/a</i>	23.815,75	= A3 + B3 + C3

La Tabella 5.5 riporta, oltre ai vari dati, l'origine di ognuno di essi. In particolare i dati di partenza sono evidenziati con carattere corsivo. Essi sono: le produzioni annue di scorie umide de-ferrizzate, di materiali ferrosi, di poveri di caldaia + ESP, nonché il consumo di calce magnesiaca che produce pure solidi raccolti nelle scorie e nelle polveri. Il tenore d'umidità delle scorie de-ferrizzate è stato assunto pari alla mediana dei risultati delle (poche) analisi disponibili, così come il tenore di incombusti su base secca. Quest'ultimo valore è stato impiegato anche per i materiali ferrosi e le polveri trascinate in caldaia (anche se, in realtà, queste ultime potrebbero presentare un tenore d'incombusti più elevato).

La seguente Tabella 5.6 riassume il bilancio di massa del lato fumi del sistema combustore/i-caldaia/e.

**Tabella 5.6: Bilancio di massa del lato rifiuti/fumi del sistema combustore/i-caldaia/e.**

	Produzioni specifiche / fattori di conversione						Quantativi complessivi			
	Quantità <i>um/a</i>	Rifiuti <i>t/um</i>	EAS $m_N^3/um$	FAS $m_N^3/um$	VA $m_N^3/um$	Solidi <i>t/um</i>	EAS $m_N^3/a$	FAS $m_N^3/a$	VA $m_N^3/a$	Solidi <i>t/a</i>
<b>Flussi in uscita (output)</b>										
EAS, $m_N^3/a$	200.777.100		1,000				200.777.100,0	0,0	0,0	0,0
FAS, $m_N^3/a$	369.068.400			1,000			0,0	369.068.400,0	0,0	0,0
VA, $m_N^3/a$	114.102.400				1,000		0,0	0,0	114.102.400,0	0,0
Solidi secchi scaricati dalla caldaia, <i>t/a</i>	23.807,5		0,000	0,000	0,000	1,000	0,0	0,0	0,0	23.807,5
Incombusti (secchi), <i>t/a</i>	288,1		-8.908,0	8.908,0	0,000	-1,000	-2.566.134,2	2.566.134,2	0,0	-288,1
Umidità delle scorie, <i>t/a</i>	3.469,5		0,000	0,000	1.244,0	0,000	0,0	0,0	4.316.058,0	0,0
<i>Totale output</i>							<i>198.210.965,8</i>	<i>371.634.534,2</i>	<i>114.102.400,0</i>	<i>23.519,4</i>
<b>Flussi in ingresso (input)</b>										
Gas naturale bruciatori ausiliari, $m_S^3/a$	395.604		0,000	8,282	2,015	0,000	0,0	3.276.392,3	796.950,7	0,0
Calce magnesiacca, <i>t/a</i>	503,7		0,000	-141,3	212,5	1,092	0,0	-71.172,8	107.036,3	550,0
Soluzione ammoniacale de-NO <sub>x</sub> , ( $\lambda = 2,2$ , $\varepsilon = 0,8$ ) <i>t/a</i>	851,3		-594,4	572,9	1.423,0	0,000	-506.012,7	487.709,8	1.211.399,9	0,0
Acqua d'iniezione soluzione ammoniacale, $m^3/a$	6.384,8		0,000	0,000	1.244,0	0,000	0,0	0,0	7.942.629,0	0,0
Vapore soffiatori fuliggine, <i>t/a</i>	598,1		0,000	0,000	1.244,0	0,000	0,0	0,0	744.096,3	0,0
Acqua di reintegro bagni di spegnimento scorie, $m^3/a$	6.719,4		0,000	0,000	1.244,0	0,000	0,0	0,0	8.358.961,6	0,0
Ceneri del rifiuto, <i>t/a</i>	22.969,4					1,000				22.969,4
Umidità del rifiuto, <i>t/a</i>	17.874,2	1,000	0,000	0,000	1.244,0	0,000	0,0	0,0	22.235.518,5	0,0
SC1 del rifiuto, <i>t/a</i>	55.708,9	1,000	-2.574,0	2.700,0	584,0	0,000	-143.394.815,0	150.414.141,6	32.534.021,7	0,0
SC2 del rifiuto, <i>t/a</i>	20.521,5	1,000	-11.420,0	10.600,0	1.664,0	0,000	-234.355.059,5	217.527.463,3	34.147.707,5	0,0
Aria di combustione (su base secca), $m_N^3/a$	576.466.853	0,000	1,000	0,000	0,01045	0,000	576.466.853,0	0,0	6.024.078,6	0,0
<i>Totale input</i>							<i>198.210.965,8</i>	<i>371.634.534,2</i>	<i>114.102.400,0</i>	<i>23.519,4</i>
Sbilancio (errore):							0,0	0,0	0,0	0,0
Termini noti delle quattro equazioni		94.104,6	198.716.978,5	367.941.605,0	94.941.326,3					

Relativamente al contenuto della Tabella 5.6, si precisano i seguenti aspetti:

- il consumo di gas naturale da parte dei bruciatori ausiliari è quello relativo al periodo di funzionamento delle due linee in tutte le condizioni di esercizio sperimentate;
- si è assunto che l'umidità assoluta media annua dell'aria ambiente sia di 6,5 g per chilogrammo d'aria secca; conseguentemente sono valutate anche le produzioni specifiche di *FAS* e *VA* relative al gas naturale utilizzato nei bruciatori ausiliari, secondo quanto indicato in Appendice A;
- il consumo d'acqua per il reintegro dei bagni di spegnimento scorie è stimata secondo le indicazioni riportate al § 3.8.

La soluzione del bilancio di massa del lato fumi fornisce la valutazione dell'aria di combustione complessivamente introdotta nel sotto-volume fumi. Tale quantitativo può essere confrontato con quanto registrato dal DCS dell'impianto, relativamente all'aria primaria e secondaria (quando registrate), così da ottenere la valutazione dell'aria di combustione addizionale, frutto delle infiltrazioni e di tutti gli altri apporti non misurati (eccesso d'aria utilizzato dai bruciatori di supporto, aria di trasporto dei reagenti, etc.).

Per il caso considerato, tale confronto è riportato nella seguente Tabella 5.7.

**Tabella 5.7: Confronto dell'aria di combustione valutata mediante il bilancio di massa del sotto-volume fumi e le registrazioni del DCS, con quantificazione dell'aria addizionale.**

<b>Grandezza</b>	<b>Valore</b>
Aria di combustione complessiva da bilancio di massa, $m_N^3/a$	582.490.932
<i>Di cui EAS, <math>m_N^3/a</math></i>	576.466.853
<i>Di cui VA, <math>m_N^3/a</math></i>	6.024.079
Aria primaria di combustione da DCS, $m_N^3/a$	298.860.000
<i>Di cui EAS, <math>m_N^3/a</math></i>	295.769.212
<i>Di cui VA, <math>m_N^3/a</math></i>	3.090.788
Aria secondaria di combustione da DCS, $m_N^3/a$	199.240.000
<i>Di cui EAS, <math>m_N^3/a</math></i>	197.179.474
<i>Di cui VA, <math>m_N^3/a</math></i>	2.060.526
Aria di combustione aggiuntiva, $m_N^3/a$	84.390.932
<i>Di cui EAS, <math>m_N^3/a</math></i>	83.518.167
<i>Di cui VA, <math>m_N^3/a</math></i>	872.765
<i>Aria di combustione aggiuntiva / aria complessiva, %</i>	14,49

Il naturale risultato del bilancio di massa del sotto-volume fumi è un quantitativo d'aria di combustione superiore a quello rilevabile dalle registrazioni del *DCS*; non si esclude che possano verificarsi situazioni opposte imputabili a errori di misurazione delle portate d'aria. In quest'ipotesi, è necessario operare una rimodulazione delle portate d'arie misurate per soddisfare il bilancio di massa. Il metodo più semplice consiste in una riduzione proporzionale di tutti i valori.

Nel più comune caso di un quantitativo d'aria addizionale positivo, valori tipici ammontano al 10-15% dell'aria complessiva di combustione. In casi particolari (p.e. quando si fa largo uso dei bruciatori di sostentamento o sono iniettati quantitativi significativi di reagenti solidi in caldaia, o

sono presenti soffiatori ad aria), tale quantitativo può essere anche apprezzabilmente superiore a quanto sopra indicato.

Una volta risolto il bilancio di massa del lato fumi del sistema combustori-caldaie, è possibile passare a considerare il relativo bilancio dell'energia, che è riassunto nella seguente Tabella 5.8.

**Tabella 5.8: Bilancio dell'energia del lato rifiuti/fumi del sistema combustore/i-caldaia/e.**

	Quantità <i>um/a</i>	Temperatura <i>°C</i>	Calore sp. <i>kJ/um-K</i>	Entalpia <i>kJ/um</i>	PCI <i>MJ/um</i>	En. Annuo <i>TJ/a</i>	% di $E_w$
<b>Output</b>							
Calore utile netto scambiato in caldaia						1.132,80	87,90
Scorie di fondogriglia secche senza incombusti e ferrosi, <i>t/a</i>	19.422,6	80,0	1031,5	56.732,5		1,10	0,09
Umidità delle scorie di fondo-griglia, <i>t/a</i>	3.469,5	80,0	4.185,0	230.175,0	-2.442,0	-7,67	-0,60
Ferrosi secchi senza incombusti, <i>t/a</i>	1.671,0	80,0	446,4	24.554,2		0,04	0,00
Incombusti nelle scorie di fondo-griglia (e ferrosi), <i>t/a</i>	258,1	80,0	829,9	45.642,9	33.000,0	8,53	0,66
Polveri di caldaia senza incombusti, <i>t/a</i>	1.630,7	450,0	840,0	357.000,0		0,58	0,05
Incombusti nelle polveri di caldaia, <i>t/a</i>	20,0	450,0	1.205,1	512.146,3	33.000,0	0,67	0,05
Polveri trascinate all'uscita della caldaia senza incombusti, <i>t/a</i>	815,3	205,3	840,0	151.452,0		0,12	0,01
Incombusti trascinati all'uscita della caldaia, <i>t/a</i>	10,0	205,3	956,9	172.533,4	33.000,0	0,33	0,03
EAS: Eccesso d'aria secca nei fumi uscita caldaia, $m_N^3/a$	200.777.100	205,3	1,308	235,8		47,35	3,67
FAS: Fumi anidri stechiometrici uscita caldaia, $m_N^3/a$	369.068.400	205,3	1,413	254,8		94,03	7,30
VA: Vapore acqueo nei fumi uscita caldaia, $m_N^3/a$	114.102.400	205,3	1,518	273,7		31,23	2,42
Incombusti gassosi (CO), <i>t/a</i>	3,5				10.109,0	0,04	0,00
Perdite per irraggiamento e convezione*						15,34	1,19
<b>Totale output</b>						<b>1.324,48</b>	<b>102,77</b>
<b>Input</b>							
Aria primaria di combustione secca, $m_N^3/a$	295.769.212	158,2	1,308	174,2		51,53	4,00
Umidità associata, $m_N^3/a$	3.090.788	158,2	1,518	202,2		0,62	0,05
Aria secondaria di combustione secca, $m_N^3/a$	199.240.000	26,1	1,308	1,4		0,29	0,02
Umidità associata, $m_N^3/a$	2.082.058	26,1	1,518	1,7		0,00	0,00
Aria di combustione aggiuntiva secca, $m_N^3/a$	83.518.167	21,1	1,308	-5,1		-0,43	-0,03
Umidità associata, $m_N^3/a$	872.765	21,1	1,518	-5,9		-0,01	0,00
Gas naturale ai bruciatori ausiliari, $m_S^3/a$	395.604				34,751	13,75	1,07
Vapore soffiatori fuliggine, <i>t/a</i>	598,1			670.060		0,40	0,03
Calce magnesiacca, <i>t/a</i>	503,7				185,35	0,09	0,01
Soluzione ammoniacale de- $NO_x$ ( $\lambda = 2,2$ , $\varepsilon = 0,8$ ), <i>t/a</i>	851,3				1.717,0	1,46	0,11
Acqua d'iniezione soluzione ammoniacale SNCR, $m^3/a$	6.384,8				-2.442,0	-15,59	-1,21
Acqua di reintegro bagni di spegnimento scorie, <i>t/a</i>	6.719,4				-2.442,0	-16,41	-1,27
<b>Rifiuti, <i>t/a</i> - <math>E_w</math>, <i>TJ/a</i></b>	<b>117.074</b>				<b>11.008</b>	<b>1.288,76</b>	<b>100,00</b>

\* Valutate secondo l'approccio empirico fornito dalla norma EN 12952-15 (su base annua l'Eq. 4.9).

Circa i dati utilizzati in Tabella 5.8, si riportano le seguenti considerazioni:

- per le scorie, i ferrosi e le polveri di caldaia, avendo considerato separatamente la rispettiva sostanza incombusta, è assegnato PCI nullo;
- analogo discorso vale per i fumi, con l'eccezione del monossido di carbonio che, solo per quanto riguarda il PCI, è conteggiato separatamente dai FAS; come si rileva, il contributo fornito è assolutamente trascurabile;

- si è assunto che le polveri scaricate dalla caldaia (alla temperatura media di 450 °C) e gli incombusti a esse associati siano i 2/3 delle polveri e relativi incombusti complessivamente abbattute in caldaia e nell'ESP, in accordo con le indicazioni di Tabella 3.2;
- la temperatura dell'aria aggiuntiva è stata valutata sulla base di quella dell'aria secondaria (misurata) e detraendo 5 °C, rappresentativi del riscaldamento indotto dai relativi ventilatori (esterni al volume di controllo); tale temperatura è superiore a quella ambientale (15,8 °C su media annua), poiché si riferisce al locale caldaie dalla quale è prelevata sia l'aria secondaria, sia l'aria aggiuntiva;
- per il gas naturale, la calce magnesiaca e la soluzione ammoniacale è stata trascurata l'entalpia fisica, poiché trovandosi normalmente a temperature poco differenti da quella di riferimento (25 °C), tale contributo risulta decisamente trascurabile rispetto al già minoritario contributo fornito al bilancio dell'energia;
- il contributo d'entalpia fisica del vapore alimentato ai soffiatori di fuliggine è valutato nel seguente § 5.2.1
- il risultato del calcolo, ossia il contenuto energetico associato ai rifiuti trattati consente di determinarne il PCI medio annuo, sulla base del quantitativo trattato (117.074 t);
- in questo caso, il contenuto energetico dei rifiuti trattati costituisce il termine  $E_W$  della formula R1, poiché non vi sono altri apporti energetici associati al flusso di rifiuti e conteggiati separatamente (come invece può accadere, per esempio, nel caso di trattamento di fanghi di depurazione - si veda il relativo esempio nel successivo § 5.3).

Una volta determinato il termine  $E_W$ , si possono considerare gli altri termini della formula R1.

### 5.2.1 $E_P$ : Energia Prodotta

Come accennato, questo esempio considera che l'effetto utile principale sia la produzione di elettricità, per complessivi 84.789,1 MWh, interamente utilizzati per finalità compatibili con la definizione del termine  $E_P$  (cfr. § 1.1).

Pertanto risulta si ha:

$$E_{P,EL} = 2,6 \cdot \left( 84.789,1 \frac{MWh}{a} \cdot 3,6 \frac{GJ}{MWh} \right) = 793.626,0 \frac{GJ}{a}$$

Un contributo minoritario è fornito al termine  $E_P$  dai soffiatori di fuliggine.

Sulla base della durata media e della portata di soffiatura, nonché della frequenza d'intervento e delle ore d'esercizio delle due linee, è stata stimata la portata di vapore surriscaldato utilizzata allo scopo. Il risultato è riportato nella precedente Tabella 5.3. L'intera quantità di vapore utilizzato è "a perdere", dato che non è presente alcun ritorno di condensa. Ciò significa che un analogo quantitativo d'acqua di reintegro dovrà essere fornita al ciclo termico.

L'energia termica specifica associata a questo impiego del vapore è, quindi, pari alla differenza tra l'entalpia del vapore surriscaldato e quella dell'acqua di reintegro. La prima risulta dalla Tabella 5.4 pari a 3.216,6 kJ/kg, mentre la seconda è pari a 66,2 kJ/kg, valore che compete ad acqua liquida a 1 atm(a) e temperatura pari a quella media annua dell'ambiente, in questo caso 15,8 °C.

Conseguentemente il contributo fornito dal vapore utilizzato dai soffiatori a fuliggine al termine  $E_P$  è:

$$E_{P,T} = 1,1 \cdot 598,1 \frac{t}{a} \cdot (3.216,6 - 66,2) \frac{MJ}{t} = 2.072,7 \frac{GJ}{a}$$

Risulta, quindi:

$$E_P = E_{P,EL} + E_{P,T} = (793.626,0 - 2.072,7) \frac{GJ}{a} = 795.698,7 \frac{GJ}{a}$$

La produzione elettrica fornisce un contributo al termine  $E_P$  pari al 99,7% del totale, con la parte rimanente ascrivibile all'uso del vapore per i soffiatori di fuliggine.

Si fa notare che il contributo fornito dal vapore per i soffiatori di fuliggine al bilancio dell'energia del lato rifiuti/fumi del volume di controllo è espresso su base PCI, fornendo un valore differente da quello sopra determinato. Infatti, su base PCI, il vapore acqueo alla temperatura di 25 °C presenta contenuto energetico nullo. Sulla scala dell'entalpia dell'acqua sinora utilizzata, a 25 °C corrisponde entalpia del vapore (saturo) di 2.546,5 kJ/kg, che sottratta all'entalpia del vapore surriscaldato sopra indicata, porta al contenuto d'energia specifico in Tabella 5.8 (670,06 kJ/kg).

### 5.2.2 $E_F$ : Energia dei combustibili ausiliari (“Fuels”)

L'energia introdotta nell'installazione con combustibili ausiliari che hanno contribuito alla produzione degli effetti utili conteggiati in  $E_P$  è la quota parte di quella indicata in Tabella 5.8, corrispondente a un consumo di gas naturale per 245.675  $m_s^3$ , come indicato nella precedente Tabella 5.3. Quindi risulta:

$$E_F = 245.675 \frac{m_s^3}{a} \cdot 34,751 \frac{MJ}{m_s^3} = 8.537,5 \frac{GJ}{a}$$

### 5.2.3 $E_I$ : Energia Importata

Concorre al termine  $E_I$  l'energia corrispondente al consumo di gas naturale nelle fasi d'avviamento e fermata dell'impianto, in assenza di produzione degli effetti utili conteggiati in  $E_P$ . Come indicato nella precedente Tabella 5.3, tale consumo di gas naturale è pari a 149.929  $m_s^3$ .

È, inoltre, da conteggiare l'eventuale elettricità importata dalla rete elettrica che ha contribuito al trattamento dei rifiuti, ovvero alle fasi propedeutiche e conclusive del trattamento stesso; non si consideri, pertanto, l'elettricità importata nei periodi di fermo impianto, che è stata chiaramente utilizzata per operazioni di mantenimento e manutenzione dell'impianto.

Nel caso in esame, l'elettricità importata che ha contribuito al trattamento dei rifiuti ammonta a 841,4 MWh.

Quindi:

$$E_I = \left( 149.929 \frac{m_S^3}{a} \cdot 34,751 \frac{MJ}{m_N^3} \right) + 2,6 \cdot \left( 841,4 \frac{MWh}{a} \cdot 3,6 \frac{GJ}{MWh} \right) = 13.085,7 \frac{GJ}{a}$$

### 5.2.4 CCF: Fattore di correzione climatica

Si assume che l'impianto considerato, autorizzato prima del 1° settembre 2015, si trovi in una zona del Nord-Italia caratterizzata da un valore di HDD medio nel ventennio antecedente l'annualità per la quale si esegue il calcolo, di 2.535 °C. Poiché tale valore ricade nell'intervallo 2.150 – 3.350 °C, il coefficiente *CCF* deve essere calcolato, sino al 31 dicembre 2029, come:

$$CCF = -\frac{0,25}{1.200} \cdot 2.535 + 1,698 = 1,170$$

### 5.2.5 R1: Efficienza energetica

L'applicazione della formula R1 con i valori numerici sinora ricavati porta al risultato:

$$R1 = \frac{E_P - (E_F + E_I)}{0,97 \cdot (E_W + E_F)} \cdot CCF = \frac{795.698,7 - (8.537,5 + 13.085,7)}{0,97 \cdot (1.288.762 + 8.537,5)} \cdot 1,170 = 0,72$$

Il valore di indice R1 conseguito nell'esercizio considerato consente di classificare le operazioni svolte dall'impianto come recupero energetico (R1), indipendentemente dalla data d'entrata in esercizio dell'impianto stesso, poiché entrambe le soglie attualmente vigenti (0,60 e 0,65) risultano superate.

## 5.3 Contenuto energetico dei rifiuti diverso dal termine $E_W$

Nei casi più comuni, come quello dell'esempio trattato nel precedente paragrafo, il PCI medio annuo dei rifiuti trattati è determinato come rapporto tra il termine  $E_W$  della formula R1 e il quantitativo degli stessi rifiuti trattati.

Vi sono casi, tuttavia, nei quali questa operazione non è immediata, richiede, piuttosto, alcune accortezze per considerare adeguatamente i contributi di altri termini. Queste situazioni si verificano quando i rifiuti trattati sono espressi su base convenzionale, invece che su base effettiva.

È il caso, per esempio, di molti impianti che trattano anche fanghi di depurazione e/o potabilizzazione. I quantitativi di tali fanghi sono spesso contabilizzati su base convenzionale, che può essere, per esempio, 100% o 65% di tenore di secco. In questi casi, il dato ufficiale (con valenza fiscale / amministrativa) dei rifiuti trattati nell'esercizio considerato non corrisponde all'effettiva massa di rifiuti alimentata al sistema combustore/i-caldaia/e. Il quantitativo effettivamente trattato dipende anche dall'effettivo tenore di secco nei fanghi trattati.

Una variante dell'esempio trattato nel precedente § 5.2 può aiutare a comprendere questa situazione.

Si assuma che i rifiuti complessivamente trattati dall'impianto, pari a 117.074 t, includano 2.000 t di fanghi contabilizzati su base secca. Si assuma, altresì, che tali fanghi siano alimentati al sistema combustore-caldiaia con un tenore effettivo di secco pari mediamente al 65%.

Ne consegue che:

- Al quantitativo di 2.000 t di sostanza secca, corrisponde un quantitativo d'umidità pari a:

$$2.000 / 65\% \cdot (1 - 65\%) = 1.076,9 t.$$

- Quindi i fanghi effettivamente alimentati all'impianto (inclusivi di umidità) sono:

$$2.000 + 1.076,9 = 3.076,9 t.$$

- Conseguentemente, anche i rifiuti effettivamente alimentati sono 118.150,9 t (invece di quanto contabilizzato, pari a 117.074 t).
- Ciò significa che la Tabella 5.6, relativa al bilancio di massa del lato fumi del combustore-caldiaia, deve essere modificata per includere un flusso aggiuntivo di umidità in ingresso, pari a 1.076,9 t.
- Questa modifica comporta l'ottenimento di risultati differenti circa i parametri del modello del rifiuto e, soprattutto, il fabbisogno d'aria di combustione.
- La Tabella 5.8, relativa al bilancio dell'energia del lato fumi del sistema combustore/i-caldiaia/e, dovrà essere modificata concordemente con i nuovi risultati e introducendo il flusso in ingresso aggiuntivo di umidità (equiparata ad acqua liquida e, quindi, caratterizzato da PCI = -2,442 MJ/kg).
- Il nuovo termine  $E_W$  dovrà quantificare il contenuto energetico dei rifiuti effettivamente alimentati, comprensivi dei rifiuti contabilizzati su base convenzionale per 117.074 t e dell'umidità "addizionale" dei fanghi per 1.076,9 t.
- Tale nuovo valore sarà pari a 1.291,39 TJ/a, esito di due contributi, quello ascrivibile ai rifiuti contabilizzati su base convenzionale (117.074 t) per 1.294,02 TJ/a e quello dovuto all'umidità "aggiuntiva" dei fanghi (1.076,9 t) per -2,63 TJ/a (negativo poiché il PCI dell'acqua liquida è negativo).

In questo nuovo scenario, è possibile definire tre differenti valori per il PCI dei rifiuti trattati:

- Il PCI effettivo dei rifiuti convenzionalmente trattati (117.074 t), come:

$$\frac{1.294,02 \text{ TJ/a}}{117.074 \text{ t/a}} = 11,053 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

- Il PCI effettivo dei rifiuti effettivamente trattati (118.150,9 t), come:

$$\frac{1.291,39 \text{ TJ/a}}{118.150,9 \text{ t/a}} = 10,930 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

- Il PCI convenzionale dei rifiuti convenzionalmente trattati (117.074 t), come:

$$\frac{1.291,39 \text{ TJ/a}}{117.074 \text{ t/a}} = 11,031 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Quest'ultimo valore di PCI, moltiplicato per la quantità di rifiuti convenzionalmente trattati (117.074 t), ossia la quantità dichiarata dal gestore dell'impianto e con valenza fiscale / amministrativa, fornisce il termine  $E_W$  della formula R1. Utilizzando gli altri valori di PCI che, a differenza di quello considerato, rappresentano effettive grandezze fisiche, la corretta valutazione del termine  $E_W$  è possibile solo introducendo l'informazione aggiuntiva circa il quantitativo di umidità "addizionale" dei fanghi.

Questi risultati pongono in evidenza come il PCI dei rifiuti trattati sia una grandezza derivata dal termine  $E_W$  e non valga, invece, il viceversa. Ai fini della valutazione dell'indice R1, l'accuratezza nella determinazione del termine  $E_W$  è cruciale, mentre il riferimento utilizzato per esprimere il PCI dei rifiuti trattati non ha alcuna influenza.

#### **5.4 Esempi di utilizzo interno di calore**

Il calore / vapore prodotto all'interno dell'unità d'incenerimento (i.e. autoprodotta, che costituisce cioè recupero di energia dai rifiuti) può essere utilizzato internamente o esternamente all'unità d'incenerimento stessa.

All'interno dell'unità d'incenerimento, tale calore può essere utilizzato per riscaldare i fumi lungo la linea di trattamento, come estesamente trattato nel successivo paragrafo, oppure per i soffiatori di fuliggine, o per la tracciatura delle tubazioni interne. Il tipico impiego esterno è costituito dall'alimentazione di una rete di teleriscaldamento (TLR), ma vi sono anche possibilità, quali l'uso per l'essiccamento dei fanghi alimentati all'unità d'incenerimento stesso, piuttosto che il tracciamento di tubazioni esterne al perimetro R1, etc.

In tutti i casi d'utilizzo interno, per determinare in che modo tale impiego concorra alla determinazione dell'indice R1, è sempre necessario prestare attenzione a due aspetti cruciali:

- all'eventuale influenza diretta (cioè imputabile all'introduzione di energia termica direttamente nel fluido termo-vettore della caldaia, oppure attraverso sistemi interposti - si veda la distinzione dall'introduzione sotto forma d'energia meccanica trattata nel § 1.1) sulla produzione di vapore;
- al soddisfacimento di un fabbisogno energetico che sarebbe stato, altrimenti, soddisfatto ricorrendo a un'altra fonte energetica.

Quando, invece, l'utilizzo è esterno al perimetro R1 (che - si noti - normalmente include tutto il circuito del fluido termo-vettore), il solo rispetto del secondo requisito è sufficiente per reputare l'utilizzo come contributo al termine  $E_P$ .

Per tutte le precisazioni del caso si rimanda alla trattazione svolta nel precedente § 1.1, mentre per degli esempi esplicativi si veda il paragrafo successivo, relativo al riscaldamento dei fumi.

In questo paragrafo, si considera, invece, un aspetto spesso fonte di fraintendimento: l'impiego di calore / vapore autoprodotta in processi di pre-trattamento del rifiuto alimentato all'unità d'incenerimento. Emblematico è il caso dell'essiccamento fanghi.

Atteso che per la definizione fornita dalle linee guida europee, l'unità d'incenerimento esclude sempre il pretrattamento dei rifiuti, l'impiego di tale calore / vapore è costituito un utilizzo esterno. Se non fosse utilizzato calore autoprodotta per le operazioni di pre-trattamento, il medesimo risultato sarebbe conseguibile per mezzo di un apporto energetico esterno. Ne consegue che trattasi di un utilizzo esterno che sostituisce un'altra fonte energetica, pertanto deve essere conteggiato tra i contributi al termine  $E_p$ .

Dal punto di vista fisico, l'essiccamento dei fanghi ne aumenta il contenuto energetico. Il loro successivo impiego come combustibile beneficerà di tale aumentato contenuto energetico portando a una produzione di vapore superiore a quella che si otterrebbe senza essiccamento. Sembra, quindi, che sussista il rischio di ricadere nel "doppio conteggio" degli effetti utili. Ciò, in realtà, non accade, poiché il contenuto energetico dei fanghi è valutato all'attraversamento del perimetro R1 mediante il termine  $E_w$ . In presenza di fanghi essiccati, la produzione di vapore sarà maggiore, ma sarà maggiore anche il termine  $E_w$ , portando, circa, alla cancellazione dei due effetti. Ciò si verifica, poiché il pre-trattamento è sempre considerato esterno al perimetro R1.

La situazione è sensibilmente differente nel caso di un utilizzo interno all'unità d'incenerimento. Infatti, in questo caso non sussiste il meccanismo automatico di conteggio in un termine analogo a  $E_w$ , poiché si tratta di un'energia ricircolata, che non attraversa mai il confine dell'unità d'incenerimento (che è il requisito inderogabile perché sia conteggiata in uno dei termini  $E_w$ ,  $E_f$ ,  $E_l$ ). Allora, in questo caso, è occorre prestare la massima attenzione a valutare se tale impiego influenzi o meno la produzione di vapore, in modo da evitare doppi conteggi della medesima energia (una volta all'atto dell'impiego e, nuovamente, quando prodotta per effetto dell'impiego stesso).

### **5.5 Casi di riscaldamento dei fumi**

Si riportano di seguito una serie di casi nei quali i fumi sono riscaldati lungo la linea di trattamento mediante:

- uso di combustibile ausiliario;
- vapore autoprodotta.

Differenziando ogni caso in base alla presenza o meno di un recuperatore di calore a valle del punto di riscaldamento. Questo aspetto è cruciale, poiché discrimina la circostanza d'impiego di tale energia tra:

- uso che contribuisce alla produzione di vapore;
- uso che non contribuisce alla produzione di vapore.

Combinando tra loro le due serie di opzioni, si definiscono quattro casi, discussi nei paragrafi che seguono e riassunti nella precedente Tabella 1.1.

### **5.5.1 Combustibile ausiliario per riscaldare i fumi in presenza di recupero a valle**

Il combustibile impiegato introduce energia termica nei fumi che è, in seguito, almeno parzialmente recuperata a vantaggio della produzione di effetti utili: significa che tale consumo di combustibile contribuisce alla produzione degli effetti utili e, pertanto, ai fini del calcolo dell'indice R1 deve essere contabilizzato nel termine  $E_F$ .

### **5.5.2 Combustibile ausiliario per riscaldare i fumi in assenza di recupero a valle**

In assenza di recupero a valle del punto d'impiego del combustibile ausiliario, la produzione degli effetti utili non risulta influenzata. Conseguentemente, il consumo di combustibile ausiliario si configura come una importazione di energia da parte dell'unità di incenerimento e, come tale, ai fini del calcolo dell'indice R1 deve essere contabilizzato in  $E_I$ .

### **5.5.3 Vapore per riscaldare i fumi in presenza di recupero a valle**

Atteso che a valle dell'impiego del vapore è presente un recupero termico, tale utilizzo influenza la produzione degli effetti utili, ma poiché il vapore è una risorsa interna all'unità d'incenerimento (autoprodotta dall'unità stessa a spese del contenuto energetico dei rifiuti ed è, quindi, un recupero energetico dei rifiuti), esso non deve essere contabilizzato in alcun termine della formula R1.

### **5.5.4 Vapore per riscaldare i fumi in assenza di recupero a valle**

In questo caso, il vapore impiegato non influenza la produzione di vapore. Si tratta, inoltre, di un impiego interno di una risorsa interna all'unità d'incenerimento; ricade, quindi, nel campo degli impieghi utili del recupero energetico e, come tale, deve essere contabilizzato nel termine  $E_P$ .

## **5.6 Altri esempi di definizione dell'unità d'incenerimento**

La definizione del confine dell'unità d'incenerimento rappresenta un aspetto cruciale della metodologia di valutazione dell'indice R1 come definita dalle linee guida europee e ripresa nel presente documento. Questo paragrafo vuole trattare alcuni casi particolari nei quali tale confine risulta essere "non convenzionale", cioè apprezzabilmente dissimile da quello raffigurato in Figura 2.1.

L'occorrenza sicuramente emblematica e già citata di questa situazione è costituita dall'eventualità d'escludere dalla definizione dell'unità d'incenerimento il gruppo turbo-generatore. I due casi più probabili nei quali si può verificare questa eventualità sono:

- presenza di una o più linee d'incenerimento in un contesto più ampio, comprendente anche unità di generazione del vapore a combustibili fossili, oppure dedicate al trattamento di rifiuti diversi dagli urbani, tutte connesse al medesimo circuito del vapore;
- presenza, sullo stesso circuito del vapore, di linee d'incenerimento soggette a soglie diverse dell'indice R1 per via delle diverse date d'autorizzazione ed entrata in esercizio.

In questi casi è necessario definire l'unità d'incenerimento escludendo il turbo-generatore e considerare, come effetto utile, unicamente i recuperi termici effettuati sotto forma di vapore / acqua calda / altri fluidi termo-vettori, coerentemente con le convenzioni definite nel precedente § 1.1, relative alla quantificazione dell'energia associata a tali flussi materiali.

## Appendice A: calcolo degli apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* per diverse sostanze e miscele

Questa Appendice riporta le valutazioni degli apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* associati a diverse sostanze che possono essere utilizzate negli inceneritori di rifiuti, oppure in processi / apparecchiature potenzialmente realizzati / presenti in tali impianti. I risultati di queste valutazioni sono riportati nella precedente Tabella 3.1, che è di seguito integralmente ripetuta:

**Copia di Tabella 3.1: Apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* che competono alle più comuni tipologie di apparecchiature di condizionamento fumi. Trattandosi di “apporti”, i valori numerici sono riportati con un segno positivo quando indicano l'introduzione della componente nel sistema considerato (o nella direzione di moto dei fumi), mentre con un segno negativo quando indicano una sottrazione/riduzione di tale componente.**

Sostanza	$UM^{(a)}$	<i>eas</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>fas</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>va</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>solidi</i> $kg UM^{-1}$
Gas naturale	$m_S^3$	-9,744	+8,738	+2,024	0,000
	$m_N^3$	-9,236	+8,282	+1,918	0,000
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto	$m_N^3$	0,000	+8,738	+2,024	0,000
				+9,744 $\alpha$	
	$m_S^3$	0,000	+8,282	+1,918	0,000
				+9,236 $\alpha$	
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto (con $\alpha=0,01045$ )	$m_N^3$	0,000	+8,738	+2,126	0,000
	$m_S^3$	0,000	+8,282	+2,015	0,000
Gasolio	$kg$	-11,26	+10,52	+1,482	0,000
	$l$	-9,456	+8,833	+1,245	0,000
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto	$kg$	0,000	+10,52	+1,482	0,000
				+11,26 $\alpha$	
	$l$	0,000	+8,833	+1,245	0,000
				+9,456 $\alpha$	
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto (con $\alpha = 0,01045$ )	$kg$	0,000	+10,52	+1,600	0,000
	$l$	0,000	+8,833	+1,344	0,000
Calce magnesiana	$kg$	0,000	-0,1413	+0,2125	+1,092
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	$kg$	-4,712	+4,383	+1,974	0,000
		+6,282 $\epsilon/\lambda$	-5,624 $\epsilon/\lambda$		
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con $\lambda=2,2$ , $\epsilon=0,65$ )	$kg$	-2,856	+2,721	+1,974	0,000
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con $\lambda=1.15$ , $\epsilon=0.85$ )	$kg$	-0,0683	+0,226	+1,974	0,000
Acqua liquida	$kg / l$	0,000	0,000	+1,244	0,000
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	$kg$	-1,154	+1,074	+1,423	0,000
		+1,539 $\epsilon/\lambda$	-1,378 $\epsilon/\lambda$		
	$l$	-1,047	+0,9737	+1,290	0,000
		+1,396 $\epsilon/\lambda$	-1,249 $\epsilon/\lambda$		
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con $\lambda=2,2$ , $\epsilon=0,65$ )	$kg$	-0,6996	+0,6666	+1,423	0,000
	$l$	-0,6344	+0,6045	+1,290	0,000
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con $\lambda=1.15$ , $\epsilon=0.85$ )	$kg$	-0,01673	+0,05528	+1,423	0,000
	$l$	-0,01517	+0,05013	+1,290	0,000

<sup>(a)</sup>  $UM =$  Unità di misura.

**Proseguimento della copia di Tabella 3.1: Apporti specifici di EAS, FAS, VA e Solidi che competono alle più comuni tipologie di apparecchiature di condizionamento fumi. Trattandosi di “apporti”, i valori numerici sono riportati con un segno positivo quando indicano l'introduzione della componente nel sistema considerato (o nella direzione di moto dei fumi), mentre con un segno negativo quando indicano una sottrazione/riduzione di tale componente.**

<b>Sostanza</b>	<b>UM<sup>(a)</sup></b>	<b>eas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>fas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>va</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>solidi</b> <b>kg UM<sup>-1</sup></b>
Urea solida per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	-2,672 +3,563 €/λ	+2,859 -3,190 €/λ	-0,7464	0,000
Soluzione acquosa al 45% in massa di urea per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	-1,202 +1,603 €/λ	+1,286 -1,435 €/λ	+1,020	0,000
	l	-1,351 +1,801 €/λ	+1,445 -1,612 €/λ	+1,146	0,000
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi	kg	0,000	+0,1314 -0,1314/λ	+0,1314 +0,1314/λ	+0,6364 +0,06387/λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi (con λ=1,3)	kg	0,000	+0,03032	+0,2325	+0,6855
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi	kg	0,000	-0,5808/λ	+0,5808/λ	+1,000 +0,4780/λ
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi (con λ=3,5)	kg	0,000	-0,1659	+0,1659	+1,137
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco	kg	0,000	-0,07576/λ	1,082 +0,07576/λ	+0,1304 +0,06235/λ
	l	0,000	-0,07583/λ	+1,083 +0,07583/λ	+0,1306 +0,06240/λ
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco (con λ=2,4)	kg	0,000	-0,03157	+1,113	+0,1564
	l	0,000	-0,03160	+1,114	+0,1566
Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri	kg	-8,908	+8,908	0,000	-1,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

<sup>(b)</sup> 0,15 kg di idrossido di calce in 1 l di acqua.

Si riportano di seguito, nel medesimo formato della Tabella 3.1, anche i contenuti della precedente Tabella 3.3 relativa alle produzioni specifiche riferite alle quattro componenti del rifiuto secondo il modello introdotto in questa sede:

**Rielaborazione della precedente Tabella 3.3: Produzioni specifiche delle varie componenti dei fumi da parte delle quattro componenti del generico rifiuto**

<b>Sostanza</b>	<b>UM<sup>(a)</sup></b>	<b>eas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>fas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>va</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>solidi</b> <b>kg UM<sup>-1</sup></b>
Ceneri	kg	0,000	0,000	0,000	+1,000
Umidità	kg	0,000	0,000	+1,244	0,000
SC <sub>1</sub>	kg	-2,574	+2,700	+0,584	0,000
SC <sub>2</sub>	kg	-11,42	+10,60	+1,664	0,000

## A.1 Gas naturale

La combustione stechiometrica di gas naturale consuma aria ( $EAS$  + relativo  $VA$ ) e produce fumi ( $FAS$  + relativo  $VA$ ).

Il gas naturale è prevalentemente composto da metano ( $CH_4$ ), ma include anche quantità non trascurabili di altre specie (altri alcani,  $CO_2$ ,  $N_2$ , etc.).

Una composizione rappresentativa del gas naturale distribuito nel Nord Italia è la seguente:

$$[CH_4] = 97,10\% \text{ Vol.}$$

$$[C_2H_6] = 1,41\% \text{ Vol.}$$

$$[C_3H_8] = 0,56\% \text{ Vol.}$$

$$[C_4H_{10}] = 0,34\% \text{ Vol.}$$

$$[CO_2] = 0,01\% \text{ Vol.}$$

$$[N_2] = 0,58\% \text{ Vol.}$$

Alla combustione di tale gas naturale, trascurando l'umidità dell'aria ambiente, corrispondono i seguenti apporti specifici di  $EAS$ ,  $FAS$  e  $VA$ :

$$eas = -9,744 \frac{m_N^3}{m_S^3} = -9,236 \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

$$fas = +8,738 \frac{m_N^3}{m_S^3} = +8,282 \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

$$va = +2,024 \frac{m_N^3}{m_S^3} = +1,918 \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

## A.2 Bruciatori a gas naturale

Normalmente, i bruciatori posti in camera di combustione, nella zona di post-combustione o sulla linea fumi prelevano l'aria richiesta dall'ambiente, introducendo nel volume di controllo considerato, oltre all'eccesso d'aria e alla relativa umidità, i corrispondenti  $FAS$ , il  $VA$  prodotto e quello associato all'aria stechiometrica consumata. I contributi imputabili all'eccesso d'aria non sono considerati in questa sede<sup>8</sup>, limitando l'analisi alla combustione stechiometrica.

La sottrazione specifica di  $EAS$  si annulla, mentre il  $VA$  associato a tale  $EAS$  deve essere aggiunto a quello prodotto dalla combustione.

Ne consegue che gli apporti specifici di  $EAS$ ,  $FAS$  e  $VA$  associati al consumo di gas naturale da parte dei bruciatori divengono:

---

<sup>8</sup> Nel caso il volume di controllo considerato sia la linea di trattamento fumi, eccesso d'aria e relativa umidità sono una quota parte dell'"aria falsa"; se il volume di controllo è il lato fumi del sistema combustore/i-caldia/e, eccesso d'aria e relativa umidità sono una quota parte dell'"aria addizionale" risultante dalla soluzione del bilancio di massa di tale volume di controllo.

$$eas = 0,000$$

$$fas = +8,738 \frac{m_N^3}{m_S^3} = +8,282 \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

$$va = (+2,024 + 9,744 \cdot \alpha) \frac{m_N^3}{m_S^3} = (+1,918 + 9,236 \cdot \alpha) \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

Nelle condizioni ambientali di umidità relativa pari al 60% e temperatura ambiente di 15 °C (ossia condizioni ISO), l'umidità assoluta dell'aria ambiente ammonta a 6,5 g per chilogrammo d'aria secca, pari a una concentrazione volumetrica di VA dell'1,035%, sicché:

$$\alpha = 1,608 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = \frac{1,035}{100 - 1,035} = 0,01045$$

Pertanto, in questo caso, piuttosto comune, l'apporto specifico di VA associato al consumo di gas naturale diviene:

$$va = +2,126 \frac{m_N^3}{m_S^3} = +2,015 \frac{m_N^3}{m_S^3}$$

La seguente tabella riassume gli apporti specifici associati all'uso dei bruciatori a gas naturale:

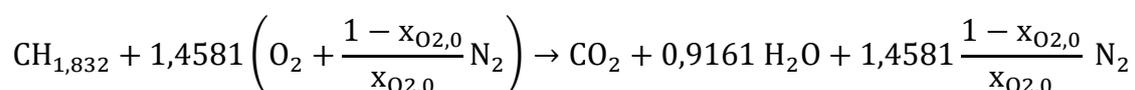
Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	eas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	fas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	va m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	solidi kg UM <sup>-1</sup>
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,738	+2,024	0,000
	m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,282	+9,744 α	0,000
Gas naturale in bruciatori di avviamento / supporto (con α=0,01045)	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,738	+2,126	0,000
	m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	0,000	+8,282	+2,015	0,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

### A.3 Bruciatori a gasolio

Nel caso siano impiegati bruciatori alimentati a gasolio, si possono ripetere tutte le considerazioni svolte per il gas naturale tenendo conto della diversa natura del combustibile.

Il gasolio è una miscela di numerosi idrocarburi, che può essere schematizzata ai fini della presente trattazione mediante la formula bruta CH<sub>1,832</sub> (Jungbluth, 2012). La conseguente reazione di combustione in aria è:



Gli apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA* relativi alla combustione stechiometrica di gasolio in aria secca sono, pertanto:

$$eas = -6,9597 \cdot 22,414 \frac{m_N^3}{kmol} \cdot \left(13,858 \frac{kg}{kmol}\right)^{-1} = -11,26 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = +6,5016 \cdot 22,414 \frac{m_N^3}{kmol} \cdot \left(13,858 \frac{kg}{kmol}\right)^{-1} = +10,52 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = +0,916 \cdot 22,414 \frac{m_N^3}{kmol} \cdot \left(13,858 \frac{kg}{kmol}\right)^{-1} = +1,482 \frac{m_N^3}{kg}$$

In analogia al caso dei bruciatori alimentati a gas naturale, bisogna, però, considerare che l'*EAS* non è sottratto ai fumi, poiché introdotto dall'ambiente. Inoltre, tale introduzione porta con sé anche l'umidità associata.

Si ottiene, pertanto:

$$eas = 0,000$$

$$fas = +10,52 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = (+1,482 + 11,26 \cdot \alpha) \frac{m_N^3}{kg}$$

Il consumo di gasolio è spesso misurato in termini volumetrici. Considerando, quindi, la densità del gasolio pari a  $840 \text{ kg/m}^3$ , si ottengono i seguenti apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA*:

$$eas = 0,000$$

$$fas = +8,833 \frac{m_N^3}{l}$$

$$va = (+1,245 + 9,456 \cdot \alpha) \frac{m_N^3}{l}$$

Chiaramente, ai fini del bilancio di massa, il consumo di gasolio non apporta / sottrae *Solidi*.

La seguente tabella riassume gli apporti specifici associati all'utilizzo di bruciatori a gasolio:

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	<i>eas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>fas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>va</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>solidi</i> kg UM <sup>-1</sup>
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto	kg	0,000	+10,52	+1,482	0,000
	l	0,000	+8,833	+11,26 α	0,000
Gasolio in bruciatori di avviamento / supporto (con α = 0,01045)	kg	0,000	+10,52	+1,600	0,000
	l	0,000	+8,833	+1,344	0,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

#### A.4 Calce magnesiaca

La calce magnesiaca è un reagente a volte iniettato direttamente in camera di combustione negli inceneritori di rifiuti (Biganzoli et al., 2015) allo scopo di operare una prima, parziale neutralizzazione dei gas acidi, nonché innalzare il punto di fusione delle ceneri, garantendo un minore sporco delle superfici di scambio termico della caldaia.

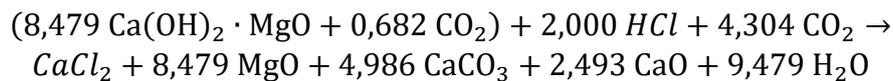
Dai dati riportati nella scheda tecnica del reagente si evince trattasi prevalentemente di una miscela di idrossido di calcio ( $Ca(OH)_2$ ) e ossido di magnesio ( $MgO$ ), con un piccolo contenuto di biossido di carbonio ( $CO_2$ ) dell'ordine del 3% in massa. Conseguentemente, un chilogrammo di calce magnesiaca commerciale conterrà, all'incirca:

- 0,628 kg di  $Ca(OH)_2 = 8,479 mol$ ;
- 0,342 kg di  $MgO = 8,479 mol$ ;
- 0,030 kg di  $CO_2$  corrispondenti a 0,682 mol.

I risultati sperimentali riportati da Biganzoli et al. (2015) evidenziano che:

- la quasi totalità del  $MgO$  non reagisce, finendo nei residui solidi del processo;
- la deidratazione del  $Ca(OH)_2$  ad alta temperatura produce  $CaO$  finissimamente disperso nei gas;
- parte del  $CaO$  reagisce con gli alogeni e i solfati contenuti nei fumi, che possono essere complessivamente rappresentati dall' $HCl$  (la specie di gran lunga preponderante) – con i dosaggi normalmente adottati, si abbattano circa 2 mol di  $HCl$  per chilogrammo di reagente iniettato, producendo, conseguentemente, 1 mol di  $CaCl_2$ ;
- la restante parte di  $CaO$  è esposta, lungo il percorso fumi, a temperatura medio-alta e per un tempo sufficientemente lungo a una significativa concentrazione di  $CO_2$ , causando la carbonatazione dell'ossido di calce ( $CaO$ ) a carbonato ( $CaCO_3$ );
- tuttavia, in considerazione dei numerosi studi presenti in letteratura su questo argomento (tra tutti si cita Boynton, 1979), si considera che circa il 33% del  $CaO$  che non ha reagito con gli alogeni non reagisca neppure con il  $CO_2$ , dato che la carbonatazione delle particelle di ossido di calce tende a formare uno strato di carbonato impermeabile al  $CO_2$ , isolando il cuore delle particelle stesse dalla possibile carbonatazione.

Una reazione complessiva, in grado di descrivere mediamente gli effetti sul bilancio di massa del sistema combustore/i-caldaia/e dell'iniezione di 1 kg di questo reagente, è la seguente:



Dalla stechiometria di tale reazione conseguono i seguenti apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi*:

$$eas = 0,000$$

$$fas = -(4,304 + 2,000) \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot 22,414 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}_N^3}{\text{mol}} = -0,1413 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}}$$

$$va = +9,479 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot 22,414 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}_N^3}{\text{mol}} = +0,2125 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}}$$

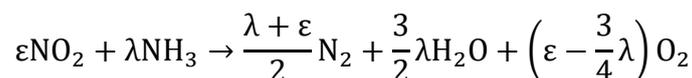
$$solidi = +(1,000 \cdot 110,98 + 8,479 \cdot 40,30 + 4,986 \cdot 100,09 + 2,493 \cdot 56,077) \cdot 10^{-3} =$$

$$= +1,092 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

### A.5 Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO<sub>x</sub> SCR e SNCR

I sistemi de-NO<sub>x</sub> per l'abbattimento degli ossidi d'azoto (NO<sub>x</sub>) sia di tipo catalitico (SCR = "Selective Catalytic Reduction"), sia di tipo non catalitico (SNCR = "Selective Non Catalytic Reduction") prevedono l'iniezione di un agente riducente, tipicamente a base d'ammoniaca o urea. Una possibilità è rappresentata dall'ammoniaca (NH<sub>3</sub>) gassosa, tipicamente veicolata con altre sostanze (vapore acqueo - VA -, gas di combustione, etc.).

Il dosaggio del reagente ammoniacale è normalmente in eccesso rispetto al fabbisogno stechiometrico di un certo fattore λ, dipendente dal tipo di sistema e dalla relativa regolazione. I dati operativi di numerosi impianti analizzati mostrano che i valori di λ normalmente utilizzati giacciono nell'intervallo 1,1-1,5 per i sistemi SCR "tail-end" e nell'intervallo 2,0-2,4 per i sistemi SNCR e SCR "high-dust". Il reagente ammoniacale che non reagisce con gli NO<sub>x</sub> si converte principalmente in azoto molecolare e vapore acqueo. Detta ε l'efficienza d'abbattimento del processo, la reazione dell'ammoniaca può essere schematizzata nel modo seguente:



Gli apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA* conseguenti all'iniezione di ammoniaca gassosa sono, quindi:

$$eas = \frac{\varepsilon - \frac{3}{4} \lambda}{\lambda \cdot x_{\text{O}_2,0}} \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \left( \frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right) = \left( -3,580 + 4,773 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \left( \frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right) = \left( -80,25 + 107,0 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{m}_N^3}{\text{kmol}}$$

$$\begin{aligned}
 fas &= \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\lambda + \varepsilon}{2} - \left( \varepsilon - \frac{3}{4} \lambda \right) \left( \frac{1}{x_{O_2,0}} - 1 \right) - \varepsilon \right] \frac{kmol}{kmol} \left( \frac{m_N^3}{m_N^3} \right) = \left( 3,330 - 4,354 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{kmol}{kmol} \left( \frac{m_N^3}{m_N^3} \right) = \\
 &= \left( 74,64 - 95,78 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kmol} \\
 va &= + \frac{3}{2} \frac{kmol}{kmol} \left( \frac{m_N^3}{m_N^3} \right) = +1,500 \frac{kmol}{kmol} \left( \frac{m_N^3}{m_N^3} \right) = +33,621 \frac{m_N^3}{kmol}
 \end{aligned}$$

Facendo riferimento al chilogrammo di ammoniaca risulta, invece:

$$eas = \left( -4,712 + 6,282 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \left( 4,383 - 5,624 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = +1,974 \frac{m_N^3}{kg}$$

Valori medi di  $\lambda$  ed  $\varepsilon$  per sistemi SNCR sono rispettivamente 2,2 e 0,65, mentre per moderni sistemi SCR “tail-end” si possono considerare i valori di 1,15 e 0,85 rispettivamente. Ne conseguono i valori delle produzioni specifiche riportati nella seguente tabella:

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	eas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	fas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	va m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	solidi kg UM <sup>-1</sup>
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	-4,712 +6,282 ε/λ	+4,383 -5,624 ε/λ	+1,974	0,000
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	-2,856	+2,721	+1,974	0,000
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	-0,0683	+0,226	+1,974	0,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

## A.6 Acqua liquida

L'acqua liquida è spesso iniettata nei fumi di combustione sia da sola, per scopi di pulizia o di controllo della temperatura, sia insieme ad altri reagenti (p.e. con l'ammoniaca per i sistemi de-NO<sub>x</sub>). Quando l'acqua liquida è iniettata nei fumi caldi “reagisce” semplicemente evaporando. Ne consegue che le produzioni specifiche di EAS, FAS e Solidi sono tutte identicamente nulle, mentre, per quanto riguarda il VA risulta:

$$va = + \frac{22,414}{18,016} \frac{m_N^3}{kg} = +1,244 \frac{m_N^3}{kg}$$

### A.7 Soluzione ammoniacale per sistemi de-NO<sub>x</sub> SCR o SNCR

La maggior parte dei sistemi SCR e SNCR utilizzano una soluzione acquosa di ammoniaca come agente riducente. Sul mercato sono disponibili soluzioni con diverse concentrazioni di ammoniaca, anche se le più diffuse presentano contenuto in massa di NH<sub>3</sub> del 24,5% e 40,0%, essendo la prima soluzione più comune in quanto meno pericolosa.

Dal punto di vista del bilancio di massa, l'iniezione di soluzione ammoniacale è equivalente all'iniezione separata del corrispondente contenuto d'acqua e di ammoniaca. Le produzioni specifiche della soluzione ammoniacale sono, quindi, le medie pesate di quelle dell'ammoniaca gassosa e dell'acqua liquida.

Con riferimento alla più comune soluzione al 24,5% in massa di ammoniaca, si ha:

$$eas = \left[ \left( -4,712 + 6,282 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \cdot 24,5\% + 0,000 \cdot 75,5\% \right] \frac{m_N^3}{kg} = \left( -1,154 + 1,539 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \left[ \left( +4,383 - 5,624 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \cdot 24,5\% + 0,000 \cdot 75,5\% \right] \frac{m_N^3}{kg} = \left( +1,074 - 1,378 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = (+1,974 \cdot 24,5\% + 1,244 \cdot 75,5\%) \frac{m_N^3}{kg} = +1,423 \frac{m_N^3}{kg}$$

Quando la variabile estensiva che quantifica l'iniezione del reagente è una portata volumetrica (*l/min* o *m<sup>3</sup>/h*), è conveniente esprimere gli apporti specifici con riferimento all'unità di volume del reagente iniettato.

La soluzione acquosa d'ammoniaca è una miscela fortemente non ideale e mostra, pertanto, evidenti effetti volumetrici. La densità della soluzione ammoniacale in funzione del tenore massico di ammoniaca (*y<sub>NH3</sub>*) può essere espressa mediante la seguente equazione, ottenuta per interpolazione dei dati di densità a 15 °C riportati da Jennings e Shannon (1938):

$$\rho = 1000,0 - 308,75y_{NH3} - 71,462y_{NH3}^2$$

La soluzione al 24,5% in massa di ammoniaca presenta densità di 906,8 *kg/m<sup>3</sup>*, quindi gli apporti di *EAS*, *FAS* e *VA* specifici all'unità di volume risultano:

$$eas = \left(-1,047 + 1,396 \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \frac{m_N^3}{l}$$

$$fas = \left(+0,9737 - 1,249 \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \frac{m_N^3}{l}$$

$$va = +1,290 \frac{m_N^3}{l}$$

L'iniezione della soluzione ammoniacale non comporta apporti / sottrazioni di *Solidi*.

Riprendendo i valori medi di  $\lambda$  ed  $\varepsilon$  utilizzati nel precedente § A.5, per la soluzione al 24,5% in massa d'ammoniaca, si ottengono le produzioni specifiche riportate nella seguente tabella:

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	<i>eas</i>	<i>fas</i>	<i>va</i>	<i>solidi</i>
		$m_N^3 UM^{-1}$	$m_N^3 UM^{-1}$	$m_N^3 UM^{-1}$	$kg UM^{-1}$
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	-1,154	+1,074	+1,423	0,000
		+1,539 $\varepsilon/\lambda$	-1,378 $\varepsilon/\lambda$		
	l	-1,047	+0,9737	+1,290	0,000
		+1,396 $\varepsilon/\lambda$	-1,249 $\varepsilon/\lambda$		
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con $\lambda=2,2$ , $\varepsilon=0,65$ )	kg	-0,6996	+0,6666	+1,423	0,000
	l	-0,6344	+0,6045	+1,290	0,000
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con $\lambda=1,15$ , $\varepsilon=0,85$ )	kg	-0,01673	+0,05528	+1,423	0,000
	l	-0,01517	+0,05013	+1,290	0,000

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

### A.8 Urea solida per sistemi de-NO<sub>x</sub> SNCR

I sistemi de-NO<sub>x</sub> per l'abbattimento degli ossidi d'azoto (NO<sub>x</sub>) di tipo non catalitico (SNCR) possono utilizzare come reagente urea solida, iniettata nei fumi in piccole sferule mediante un sistema pneumatico.

Dal punto di vista del bilancio di massa, la reazione complessiva d'abbattimento degli ossidi d'azoto può essere schematizzata in due stadi:

1. l'urea ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO o CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) reagisce con il vapore acqueo producendo un reagente ammoniacale gassoso;
2. tale reagente ammoniacale reagisce con gli ossidi d'azoto secondo la stechiometria delineata in § A.5 per l'ammoniaca gassosa.

Relativamente al primo stadio di reazione, si avrà:



Pertanto, gli apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA*, nonché la produzione specifica di ammoniaca, sono:

$$\Delta eas = 0,000$$

$$\Delta fas = +0,3731 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$\Delta va = -0,3731 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$prod(NH_3) = +0,567 \frac{kg}{kg}$$

Combinando queste produzioni specifiche con quelle determinate al precedente § A.5, si ottengono i valori complessivi riferiti all'urea solida:

$$eas = \Delta eas + prod(NH_3) \cdot eas_{NH_3} = \left(-2,672 + 3,563 \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \Delta fas + prod(NH_3) \cdot fas_{NH_3} = \left(+2,859 - 3,190 \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = \Delta va + prod(NH_3) \cdot va_{NH_3} = -0,7464 \frac{m_N^3}{kg}$$

Come per la soluzione ammoniacale, anche l'iniezione di urea non comporta apporti / sottrazioni di *Solidi*.

### ***A.9 Urea in soluzione acquosa per sistemi de-NO<sub>x</sub> SNCR***

Un'altra e più comune forma nella quale è utilizzata l'urea per alimentare sistemi de-NO<sub>x</sub> di tipo non catalitico (*SNCR*) è la soluzione acquosa.

La soluzione acquosa di urea è a volte utilizzata anche in impianti dotati di sistema *SCR*, che la impiegano per la produzione in loco di reagente ammoniacale mediante idrolisi. In questi casi, è conveniente escludere dal volume di controllo il sistema d'idrolisi e considerare in ingresso il flusso di reagente ammoniacale (che può essere un flusso di ammoniaca gassosa e vapore acqueo, nel caso d'idrolisi con riscaldamento diretto / indiretto a vapore, oppure una miscela di ammoniaca gassosa e prodotti di combustione, nel caso d'idrolisi con riscaldamento diretto mediante bruciatori dedicati).

La soluzione acquosa di urea è disponibile in commercio a diverse concentrazioni. La tipologia di soluzione spesso utilizzata nei termovalorizzatori di rifiuti è al 45% in massa di urea. Nel caso specifico del 45% in massa di urea (per altre concentrazioni è possibile ripetere le stesse valutazioni), gli apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA* sono ottenute come medie pesate dei contributi relativi all'urea solida e all'acqua liquida:

$$eas = \left[ \left( -2,672 + 3,563 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \cdot 45,0\% + 0,000 \cdot 55,0\% \right] \frac{m_N^3}{kg} = \left( -1,202 + 1,603 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \left[ \left( +2,859 - 3,190 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \cdot 45,0\% + 0,000 \cdot 55,0\% \right] \frac{m_N^3}{kg} = \left( +1,286 - 1,435 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = (+0,7464 \cdot 45,0\% + 1,244 \cdot 55,0\%) \frac{m_N^3}{kg} = +1,020 \frac{m_N^3}{kg}$$

Anche in questo caso, non ci sono apporti / sottrazioni di *Solidi*.

In analogia a quanto accade per la soluzione ammoniacale, anche per la soluzione acquosa di urea si utilizzano spesso misure volumetriche invece che massiche. È, quindi, necessario disporre della densità della soluzione per poter convertire gli apporti specifici sopra determinati in termini volumetrici.

La densità della soluzione acquosa di urea a 25 °C è espressa con ottima approssimazione in funzione del tenore in massa ( $y_{urea}$ ) di urea dal seguente polinomio, tratto dal lavoro di Gucker et al. (1938):

$$d[kg/m^3] = 997,4 + 265,1 \cdot y_{urea} + 32,91 \cdot y_{urea}^2$$

Per la soluzione acquosa al 45% in massa d'urea si ottiene densità pari a 1.123,4 kg/m<sup>3</sup>. Pertanto, i corrispondenti apporti specifici di *EAS*, *FAS* e *VA* in termini volumetrici sono:

$$eas = \left( -1,351 + 1,801 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{l}$$

$$fas = \left( +1,445 - 1,612 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{l}$$

$$va = +1,146 \frac{m_N^3}{l}$$

Relativamente alla soluzione acquosa al 45% in massa di urea, le produzioni specifiche sono riassunte dalla seguente tabella:

<b>Sostanza</b>	<b>UM<sup>(a)</sup></b>	<b>eas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>fas</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>va</b> <b>m<sub>N</sub><sup>3</sup> UM<sup>-1</sup></b>	<b>solidi</b> <b>kg UM<sup>-1</sup></b>
Soluzione acquosa al 45% in massa di urea per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	-1,202	+1,286	+1,020	0,000
		+1,603 ε/λ	-1,435 ε/λ		
	l	-1,351	+1,445	+1,146	0,000
		+1,801 ε/λ	-1,612 ε/λ		

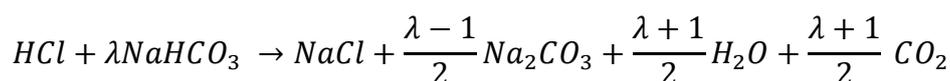
<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

### A.10 Bicarbonato di sodio in polvere nei sistemi di neutralizzazione a secco

Bicarbonato di sodio ( $NaHCO_3$ ) finemente polverizzato è utilizzato quale reagente nei sistemi di trattamento fumi per la neutralizzazione dei gas acidi.

Come nel caso della calce magnesiaca (cfr. § A.4), la specie  $HCl$  può essere considerata rappresentativa di tutti i composti acidi, essendo di gran lunga la specie preponderante tra tali composti presenti nei fumi di combustione dei rifiuti.

Ne consegue che la reazione complessiva d'abbattimento, che considera anche l'eccesso di reagente normalmente impiegato e la conversione da bicarbonato a carbonato, è riassunta come segue:



Assumendo che il reagente sia caratterizzato da purezza del 98,5% (valore commerciale tipico per questo reagente, essendo la quota rimanente composta da specie solide inerti), le produzioni specifiche corrispondenti sono:

$$eas = 0,000$$

$$fas = + \left( \frac{\lambda - 1}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{22,414}{84,007} \cdot 98,5\% \right) \frac{m_N^3}{kg} = \left( +0,1314 - \frac{0,1314}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = + \left( \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{22,414}{84,007} \cdot 98,5\% \right) \frac{m_N^3}{kg} = \left( +0,1314 + \frac{0,1314}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$solidi = + \left[ \left( \frac{58,442}{\lambda} + \frac{\lambda - 1}{2 \cdot \lambda} \cdot 105,989 \right) \cdot \frac{98,5\%}{84,007} + 1,5\% \right] \frac{kg}{kg} = \left( +0,6364 + \frac{0,06387}{\lambda} \right) \frac{kg}{kg}$$

Si consideri che, comunemente, il valore del fattore di dosaggio  $\lambda$  del bicarbonato di sodio utilizzato in questi sistemi a secco giace nell'intervallo 1,2-1,4. Pertanto, la seguente tabella riassume le produzioni specifiche di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* per questo reagente:

Sostanza	$UM^{(a)}$	<i>eas</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>fas</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>va</i> $m_N^3 UM^{-1}$	<i>solidi</i> $kg UM^{-1}$
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi	$kg$	0,000	+0,1314	+0,1314	+0,6364
			-0,1314/ $\lambda$	+0,1314/ $\lambda$	+0,06387/ $\lambda$
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi (con $\lambda=1,3$ )	$kg$	0,000	+0,03032	+0,2325	+0,6855

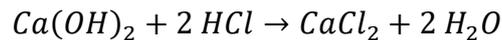
<sup>(a)</sup>  $UM =$  Unità di misura.

### A.11 Idrossido di calcio in polvere nei sistemi di neutralizzazione a secco

Idrossido di calcio ( $Ca(OH)_2$ ) finemente polverizzato è utilizzato quale reagente nei sistemi di trattamento fumi per la neutralizzazione dei gas acidi. Come nei casi della calce magnesiaca (cfr. § A.4) e del bicarbonato di sodio (cfr. § A.10), la specie  $HCl$  può essere considerata rappresentativa di

tutti i composti acidi, essendo di gran lunga la specie preponderante tra tali composti presenti nei fumi di combustione dei rifiuti.

A causa di cinetiche di reazione più lente rispetto a quelle che coinvolgono il bicarbonato di sodio, diversi studi hanno evidenziato la mancata produzione di alcune specie di completa neutralizzazione rispetto alle quali è convenzionalmente valutata la stechiometrica di reazione. È il caso, in particolare del prodotto di completa neutralizzazione dell'acido cloridrico ( $HCl$ ), il  $CaCl_2$ . La reazione di neutralizzazione stechiometrica è:



Diversi studi (tra i quali Bodéan e Deniard, 2003, e Partanen et al., 2005) hanno invece dimostrato che il principale prodotto della reazione di neutralizzazione è  $CaOHCl$ , una specie poco conosciuta e relativamente instabile.

La reazione che meglio rappresenta il processo di neutralizzazione, considerando anche l'eccesso di reagente mediante il fattore di dosaggio  $\lambda$  (definito con riferimento alla stechiometrica sopra riportata), è, quindi:



Tale reazione è effettivamente realizzabile solo con un fattore di dosaggio pari o maggiore a due ( $\lambda > 2$ ). Il normale fattore di dosaggio impiegato per questi sistemi di neutralizzazione è nell'intervallo 3 - 4, quando riferito al reagente fresco introdotto (sono, infatti, solitamente presenti sistemi di ricircolo). Assumendo un grado di purezza del reagente del 96% (valore commerciale tipico per questo reagente, essendo la quota rimanente composta da specie solide inerti), sulla base dell'ultima reazione introdotta, si determinano i seguenti apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi*:

$$eas = 0,000$$

$$fas = \left( -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{22,414}{74,093} \right) \frac{m_N^3}{kg} = -\frac{0,5808}{\lambda} \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = \left( +\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{22,414}{74,093} \right) \frac{m_N^3}{kg} = +\frac{0,5808}{\lambda} \frac{m_N^3}{kg}$$

$$solidi = \left\{ \left[ +2 \cdot \frac{92,538}{74,093} + (\lambda - 2) \right] \frac{96\%}{\lambda} + 4\% \right\} \frac{kg}{kg} = \left( +1,000 + \frac{0,4780}{\lambda} \right) \frac{kg}{kg}$$

La seguente tabella riassume le produzioni specifiche per questo reagente riferite al caso generale e al caso con fattore di dosaggio  $\lambda = 3,5$ :

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	eas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	fas m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	va m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	solidi kg UM <sup>-1</sup>
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi	kg	0,000	-0,5808/λ	+0,5808/λ	+1,000 +0,4780/λ
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi (con λ=3,5)	kg	0,000	-0,1659	+0,1659	+1,137

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

### A.12 Latte di calce in sistemi a semisecco

L'idrossido di calce finemente polverizzato può essere iniettato nei fumi anche disperso in acqua, formando il così detto "latte di calce". Questo reagente è utilizzato nei sistemi di neutralizzazione detti "a semisecco"; essendo la solubilità dell'idrossido di calce in acqua estremamente limitata, si realizza una "soluzione soprassatura", cioè una dispersione solido-liquido chiamata anche, più propriamente, "lime slurry".

L'iniezione di questa miscela nei fumi ha luogo in dispositivi chiamati "spray-dryer", dove il contenuto d'acqua della miscela evapora a spese dell'entalpia sensibile dei fumi (che, quindi, si raffreddano). L'interfaccia gas-liquido migliora le prestazioni del processo d'assorbimento, consentendo l'impiego di eccessi di reagente più contenuti rispetto ai sistemi a secco; spesso, oltre all'iniezione del latte di calce, è iniettata anche ulteriore acqua di condizionamento, allo scopo di portare l'umidità relativa dei fumi al valore ottimale per il processo di neutralizzazione.

Il latte di calce è, quindi, una miscela di idrossido di calce ( $Ca(OH)_2$ ) e acqua ( $H_2O$ ). Una proporzione comunemente adottata nella produzione di questo reagente prevede l'aggiunta di 0,15 kg d'idrossido di calcio per ogni litro di acqua, ottenendo, così, un tenore in massa di idrossido di calce pari a:

$$y_{Ca(OH)_2} = \frac{0,15}{1 + 0,15} = 13,043\%$$

Le reazioni, i conseguenti prodotti del sistema di neutralizzazione e la definizione del fattore di dosaggio ( $\lambda$ ) per il processo a semi-secco sono assolutamente analoghi a quelli del sistema a secco descritto nel precedente § A.11. Cambiando la forma nella quale il reagente è veicolato, cambia la base di riferimento per gli apporti specifici delle varie componenti dei fumi.

Gli apporti specifici di EAS, FAS, VA e Solidi riferiti all'unità di massa di latte di calce sono ottenuti come medie pesate di quelli dell'idrossido di calce in polvere e dell'acqua liquida, quindi, per la concentrazione sopra indicata si ha:

$$eas = [0,000 \cdot 13,043\% + 0,000 \cdot (1 - 13,043\%)] \frac{m_N^3}{kg} = 0,000 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \left[ -\frac{0,5808}{\lambda} \cdot 13,043\% + 0,000 \cdot (1 - 13,043\%) \right] \frac{m_N^3}{kg} = -\frac{0,07576}{\lambda} \frac{m_N^3}{kg}$$

$$va = \left[ +\frac{0,5808}{\lambda} \cdot 13,043\% + 1,244 \cdot (1 - 13,043\%) \right] \frac{m_N^3}{kg} = \left( +1,082 + \frac{0,07576}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{kg}$$

$$\begin{aligned} solidi &= \left[ \left( +1,000 + \frac{0,4780}{\lambda} \right) \cdot 13,043\% + 0,000 \cdot (1 - 13,043\%) \right] \frac{kg}{kg} \\ &= \left( +0,1304 + \frac{0,06235}{\lambda} \right) \frac{kg}{kg} \end{aligned}$$

Spesso la portata di latte di calce è misurata in termini volumetrici, pertanto, è opportuno esprimere gli apporti specifici anche con riferimento a tale base.

La densità del latte di calce a 15 °C è fornita con buona approssimazione in funzione del titolo in massa dell'idrossido di calcio ( $y_{Ca(OH)_2}$ ) dalla relazione che interpola i dati riportati da NLA (2007):

$$d[kg/m^3] = 1.000,0 + 7,061 \cdot y_{Ca(OH)_2}$$

Per il titolo in massa sopra indicato (13,043%) si ottiene una densità della soluzione di 1.000,9  $kg/m^3$ , conseguentemente, i corrispondenti apporti specifici di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi* in termini volumetrici risultano:

$$eas = 0,000$$

$$fas = -\frac{0,07583}{\lambda} \frac{m_N^3}{l}$$

$$va = \left( +1,083 + \frac{0,07583}{\lambda} \right) \frac{m_N^3}{l}$$

$$solidi = \left( +0,1306 + \frac{0,06240}{\lambda} \right) \frac{kg}{l}$$

Il fattore di dosaggio ( $\lambda$ ) adottato per questi sistemi a semisecco è normalmente nel campo 2,2-2,6.

La seguente tabella riporta, quindi, le produzioni specifiche riferite al caso generale e quelle specifiche per un valore del fattore di dosaggio  $\lambda = 2,4$ :

Sostanza	UM <sup>(a)</sup>	<i>eas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>fas</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>va</i> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> UM <sup>-1</sup>	<i>solidi</i> kg UM <sup>-1</sup>
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco	kg	0,000	-0,07576/λ	1,082	+0,1304
				+0,07576/λ	+0,06235/λ
	l	0,000	-0,07583/λ	+1,083	+0,1306
				+0,07583/λ	+0,06240/λ
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco (con λ=2,4)	kg	0,000	-0,03157	+1,113	+0,1564
	l	0,000	-0,03160	+1,114	+0,1566

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura. <sup>(b)</sup> 0,15 kg di idrossido di calce in 1 l di acqua.

### A.13 Sistemi di lavaggio e di neutralizzazione a umido

I sistemi “a umido”, che includono le torri di lavaggio fumi in presenza o meno di reagenti per la neutralizzazione dei gas acidi e l’assorbimento di micro-inquinanti, sono sempre meno diffuse, per via della problematica della produzione di reflui liquidi.

La varietà di sistemi è molto vasta, pertanto, in questa sede saranno fornite indicazioni solo per quantificare gli effetti macroscopici del loro impiego nel trattamento dei fumi di combustione. Tali effetti macroscopici consistono nella sottrazione di VA e Solidi dal flusso gassoso. Effetti minori interessano anche EAS e FAS, tuttavia tali effetti sono specifici sia dei reagenti impiegati, sia delle condizioni di processo adottate (pH, temperatura, etc.).

I Solidi sono sottratti per assorbimento (fisico o chimico-fisico) nella fase liquida, mentre il VA è sottratto a causa della bassa temperatura alla quale sono operati questi sistemi, in virtù della quale si verifica la condensazione di parte del VA contenuto nei fumi.

Uno schema rappresentativo di questa tipologia di processi è riportato nella seguente Figura A.1.

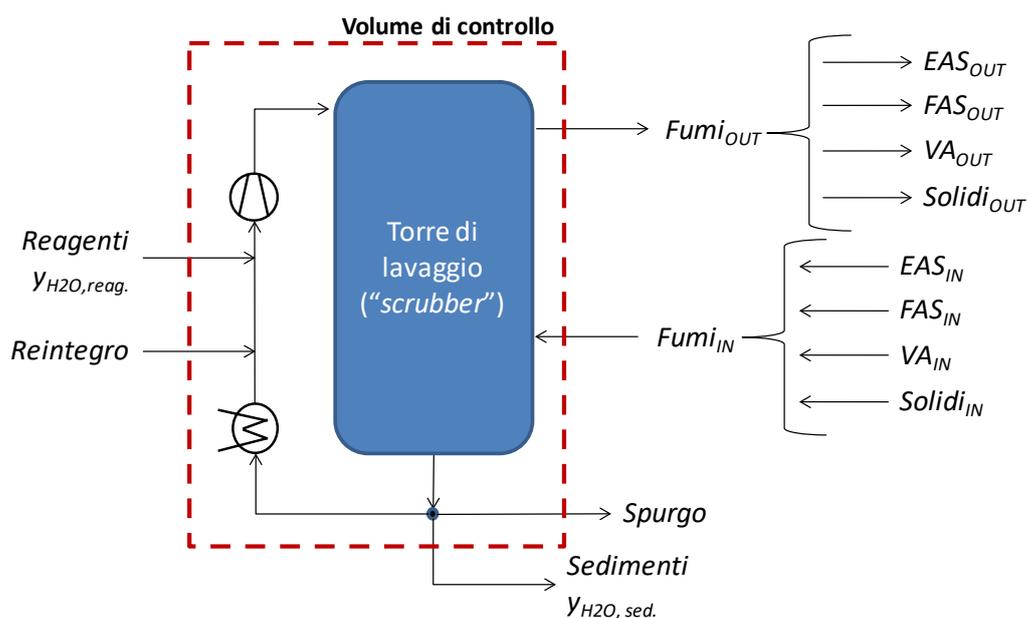


Figura A.1: Schema di un generico sistema di lavaggio fumi.

Con riferimento allo schema in Figura A.1, si assume che il generico sistema di lavaggio fumi, indipendentemente dalla sua reale configurazione, possa essere circoscritto da un perimetro tale da individuare:

- i fumi in ingresso (“*Fumi<sub>IN</sub>*”) descritti mediante le varie componenti (*EAS<sub>IN</sub>*, *FAS<sub>IN</sub>*, *VA<sub>IN</sub>*, *Solidi<sub>IN</sub>*);
- i fumi in uscita (“*Fumi<sub>OUT</sub>*”) descritti mediante le varie componenti (*EAS<sub>OUT</sub>*, *FAS<sub>OUT</sub>*, *VA<sub>OUT</sub>*, *Solidi<sub>OUT</sub>*);
- un eventuale reintegro di acqua (“*Reintegro*”);
- un eventuale spurgo d’acqua (“*Spurgo*”);
- l’eventuale introduzione di reagenti (“*Reagenti*”) complessivamente caratterizzati da un tenore d’umidità ( $y_{H_2O, reag.}$ );
- l’estrazione di sedimenti solidi (“*Solidi*”) complessivamente caratterizzati da un tenore d’umidità ( $y_{H_2O, sed.}$ );

Trascurando le possibili reazioni di neutralizzazione (in prima approssimazione, come discusso precedentemente), è possibile ritenere che il sistema non comporti variazioni delle componenti *EAS* e *FAS*, quindi:

$$EAS_{IN} = EAS_{OUT}$$

$$FAS_{IN} = FAS_{OUT}$$

Mentre le variazioni di *VA* e *Solidi* possono essere determinate da semplici bilanci di massa, ancora trascurando gli effetti delle eventuali reazioni di neutralizzazione:

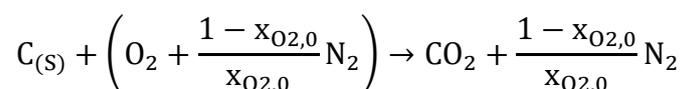
$$VA_{IN} = VA_{OUT} + (Spurgo - Reintegro + Sedimenti \cdot y_{H_2O, sed.} - Reagenti \cdot y_{H_2O, reag.}) \cdot va_{H_2O(l)}$$

$$Solidi_{IN} = Solidi_{OUT} + Sedimenti \cdot (1 - y_{H_2O, sed.}) - Reagenti \cdot (1 - y_{H_2O, reag.})$$

#### **A.14 Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri**

La presenza di incombusti solidi (assimilati a carbonio grafítico “*C<sub>(S)</sub>*”, in accordo con la norma EN 12952-15) nelle scorie e nelle polveri influenza il bilancio di massa del sistema combustore/i-caldia/e poiché comporta minore produzione di fumi e minore consumo d’aria, oltre a maggiore produzione di residui solidi.

Considerando tali incombusti tra i flussi di output del volume di controllo (come è naturale), la corrispondente reazione di combustione è:



Ad essa sono associate le seguenti produzioni specifiche di *EAS*, *FAS*, *VA* e *Solidi*:

$$eas = \left( -\frac{1}{x_{O_2,0}} \cdot \frac{22,414}{12,011} \right) \frac{m_N^3}{kg} = -8,908 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$fas = \left( +\frac{1}{x_{O_2,0}} \cdot \frac{22,414}{12,011} \right) \frac{m_N^3}{kg} = +8,908 \frac{m_N^3}{kg}$$

$$solidi = -1,000 \frac{kg}{kg}$$

### A.15 Ceneri, Umidità, SC<sub>1</sub> e SC<sub>2</sub>

Le componenti del rifiuto, nel modello introdotto in questa sede, sono caratterizzate dalle produzioni specifiche riportate nella precedente Tabella 3.3 e di seguito riprodotta:

**Copia di Tabella 3.3: Produzioni specifiche delle varie componenti dei fumi da parte delle quattro componenti del generico rifiuto**

	<b>Ceneri</b>	<b>Umidità</b>	<b>SC<sub>1</sub></b>	<b>SC<sub>2</sub></b>
<i>eas</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	0,000	-2,574	-11,42
<i>fas</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	0,000	+2,700	+10,60
<i>va</i> , $\frac{m_N^3}{kg}$	0,000	+1,245	+0,584	+1,664
<i>solidi</i> , $\frac{kg}{kg}$	+1,000	0,000	0,000	0,000

Le ceneri contenute nel rifiuto sono convenzionalmente considerate solidi inerti (per una trattazione al riguardo, si veda il materiale supplementare associato all'articolo di Fellner et al., 2007). Pertanto, durante la combustione non consumano aria, non producono fumi, né vapore acqueo. Contribuiscono, ovviamente, alla produzione di solidi.

L'umidità presente nel rifiuto, dal punto di vista del bilancio di massa, si comporta esattamente come acqua liquida, pertanto è caratterizzata dalle medesime produzioni specifiche di tale sostanza. Le due componenti della sostanza combustibile, SC<sub>1</sub> e SC<sub>2</sub>, dal punto di vista del bilancio di massa, sono miscele di carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto, in proporzioni tali da generare i due punti rappresentati nel grafico in Figura 3.6.

La seguente Tabella riassume le formulazioni molari e le composizioni ponderali delle due sostanze combustibili:

<b>% in massa</b>	<b>SC<sub>1</sub> = CH<sub>1,76</sub>O<sub>1,25</sub>N<sub>0,0</sub></b>	<b>SC<sub>2</sub> = CH<sub>2,13</sub>O<sub>0,0</sub>N<sub>0,014</sub></b>
C	35,52	83,63
H	5,25	14,97
O	59,23	0,00
N	0,00	1,40
Totale	100,00	100,00

## Appendice B: calcolo dei PCI per diverse sostanze e miscele

Questa Appendice riporta i PCI di diverse sostanze interagenti con il sotto-volume di controllo lato rifiuti/fumi, nonché le procedure seguite per la loro determinazione, adattabili anche ad altre sostanze non considerate in questa sede.

I risultati delle valutazioni svolte sono riassunti nella precedente Tabella 4.2, di seguito riproposta:

**Copia di Tabella 4.2: PCI delle sostanze rilevanti ai fini del bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.**

<b>Sostanza</b>	<b>UM<sup>(a)</sup></b>	<b>PCI MJ UM<sup>-1</sup></b>
Gas naturale	$m_S^3$	+34,751
	$m_N^3$	+36,675
Gasolio	kg	+42,800
	l	+35,950
Calce magnesiaca	kg	+0,1809
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	+18,60
		+2,008 €/λ
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	+19,195
Ammoniaca gassosa per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	+20,086
Acqua liquida	kg / l	-2,442
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR	kg	+1,699
		+0,4919 €/λ
	l	+1,540
		+0,4461 €/λ
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR e SNCR (con λ=2,2, ε=0,65)	kg	+1,844
	l	+1,672
Soluzione acquosa al 24,5% in massa di ammoniaca per sistemi de-NO <sub>x</sub> SCR (con λ=1.15, ε=0.85)	kg	+2,062
	l	+1,870
Urea solida per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	+9,103
		+1,139 €/λ
Soluzione acquosa al 40% in massa di urea per sistemi de-NO <sub>x</sub> SNCR	kg	+2,868
		+0,5124 €/λ
	l	+3,222
		+0,5756 €/λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi	kg	-0,8042
		+0,8445 / λ
Bicarbonato di sodio in polvere per trattamento fumi (con λ=1,3)	kg	-0,1546
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi	kg	-7,678 / λ
Idrossido di calce in polvere per trattamento fumi (con λ=3,5)	kg	-2,194
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco	kg	-2,124
		-1,001 / λ
	l	-2,126
		-1,002 / λ
Latte di calce <sup>(b)</sup> per sistemi di trattamento fumi a semi-secco (con λ=2,4)	kg	-2,541
	l	-2,544
Incombusti solidi nelle scorie e nelle polveri	kg	+33,000
CO (monossido di carbonio)	kg	+10,109
	$m_N^3$	+12,633

<sup>(a)</sup> UM = Unità di misura.

<sup>(b)</sup> 0,15 kg di idrossido di calce in 1 l di acqua.

## B.1 Gas naturale

Il gas naturale considerato nel precedente § A.1, la cui composizione è richiamata nella seguente Tabella B.1, presenta il PCI e le altre proprietà riassunte a piè della medesima, seguente Tabella.

La determinazione di tali proprietà, partendo dalla composizione molare del gas (non sempre disponibile) e dalle proprietà dei singoli costituenti, è relativamente semplice limitatamente alla massa molare media e al PCI medio espresso su base massica (queste due grandezze sono semplice medie opportunamente pesate), mentre risulta alquanto complessa relativamente ai PCI espressi su base volumetrica.

Per tali grandezze è, infatti, necessario seguire il metodo di calcolo definito dalla norma UNI EN ISO 6976, che tiene conto delle deviazioni del comportamento volumetrico di queste specie gassose (pure e/o in miscela) rispetto al modello del gas ideale.

**Tabella B.1: Caratteristiche delle varie componenti e della relativa miscela riguardanti il gas naturale considerato nel precedente § A.1.**

Specie:	Frazione molare %	Massa molare kg/kmol	PCI			PCS		
			MJ/kg	MJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	MJ/m <sub>S</sub> <sup>3</sup>	MJ/kg	MJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	MJ/m <sub>S</sub> <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub>	97,100	16,043	50,029	35,894	34,012	55,515	39,831	37,742
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,410	30,070	47,51	64,382	60,938	51,90	70,333	66,571
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,560	44,097	46,33	93,118	87,983	50,32	101,142	95,564
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> *	0,340	58,123	45,64	123,590	116,077	49,35	133,844	125,707
CO <sub>2</sub>	0,010	44,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N <sub>2</sub>	0,580	28,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Totale / media</b>	<b>100,000</b>	<b>16,613</b>	<b>49,35</b>	<b>36,675</b>	<b>34,751</b>	<b>54,72</b>	<b>40,659</b>	<b>38,526</b>

\* Considerando una miscela paritaria (50/50) di normal- e iso-butano.

## B.2 Gasolio

Il Potere Calorifico Inferiore (PCI) del gasolio riportato da Jungbluth (2012) è 42,80 MJ/kg. In termini volumetrici, considerando la densità di 840 kg/m<sup>3</sup>, si ottiene un valore di PCI pari a 35,95 MJ/l.

## B.3 Calce magnesiaca

Anche ai fini del bilancio dell'energia è possibile ritenere che la calce magnesiaca iniettata in camera di combustione reagisca secondo la reazione delineata in § A.3. Di conseguenza, il PCI convenzionalmente<sup>9</sup> associato a questo reagente può essere stimato partendo dalle entalpie di formazioni dei reagenti e dei prodotti tratte da McBride et al. (2002) secondo la relazione:

<sup>9</sup> Si tratta, in realtà, di un'eccezione alla convenzione del PCI, secondo la quale a ogni specie atomica corrisponde una specie di completa combustione. Tale eccezione è necessaria, in questo caso, per esprimere correttamente i contributi massici ed energetici associati all'utilizzo di questo reagente.

$$\begin{aligned}
 PCI &= 8,479 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{Ca}(\text{OH})_2}^0 + (0,682 + 4,304) \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{CO}_2}^0 + 2,000 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{HCl}}^0 \\
 &\quad - 1,000 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{CaCl}_2}^0 - 4,986 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{CaCO}_3}^0 - 2,493 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{CaO}}^0 \\
 &\quad - 9,479 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \cdot \Delta h_{f, \text{H}_2\text{O}}^0 = \\
 &= 8,479 \cdot (-985,9) + 4,986 \cdot (-393,51) + 2,000 \cdot (-92,31) - 1,000 \cdot (-795,8) \\
 &\quad - 4,986 \cdot (-1.206,6) - 2,493 \cdot (-634,92) - 9,479 \cdot (-241,826) = +0,1809 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

La reazione è quindi complessivamente esotermica ( $PCI > 0$ ).

#### **B.4 Ammoniaca gassosa**

Sulla base della reazione riportata in § A.5, è possibile determinare il PCI in funzione dell'entalpia di formazione delle specie coinvolte tratte da McBride et al. (2002):

$$\begin{aligned}
 PCI &= \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot \Delta h_{f, \text{NO}_2}^0 + \Delta h_{f, \text{NH}_3}^0 - \frac{\lambda + \varepsilon}{2 \cdot \lambda} \cdot \Delta h_{f, \text{N}_2}^0 - \frac{3}{2} \cdot \Delta h_{f, \text{H}_2\text{O}}^0 - \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} - \frac{3}{4} \right) \cdot \Delta h_{f, \text{O}_2}^0 = \\
 &= \left[ \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot 34,193 - 45,940 - \frac{\lambda + \varepsilon}{2 \cdot \lambda} \cdot 0,0 - \frac{3}{2} \cdot (-241,826) - \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} - \frac{3}{4} \right) \cdot 0,0 \right] \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} = \\
 &= \left( +18,60 + 2,008 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

#### **B.5 Acqua liquida**

Il PCI dell'acqua liquida è negativo, con valore assoluto pari all'entalpia latente d'evaporazione a 25 °C. Pertanto:

$$PCI = -2,442 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

#### **B.6 Soluzione ammoniacale**

Il PCI di questo reagente è determinato partendo dai PCI dell'ammoniaca gassosa e dell'acqua liquida, aggiungendo, inoltre, l'entalpia di evaporazione dell'ammoniaca e l'entalpia di miscelamento tra ammoniaca e acqua.

L'entalpia di evaporazione dell'ammoniaca è pari a 1,652 MJ/kg, come fornito da Refprop v. 9.0 (Lemmon et al., 2010). Essa va considerata come contributo negativo al PCI della soluzione, poiché si tratta di calore che deve essere fornito alla soluzione nel processo di produzione dell'ammoniaca gassosa (al cui PCI si fa riferimento nelle valutazioni che seguono).

Utilizzando il metodo dell'entalpia libera d'eccesso proposto da Mejbri e Bellagi (2006), l'entalpia di miscelamento alle condizioni di riferimento (1 atm e 25 °C) è espressa come funzione del contenuto in massa di ammoniaca mediante la forma polinomiale:

$$\Delta h_{\text{mix}, y_{\text{NH}_3}}^0 [kJ/kg] = 83,32 - 897,37 y_{\text{NH}_3} + 723,55 y_{\text{NH}_3}^2 + 173,05 y_{\text{NH}_3}^3$$

Per il tenore massico d'ammoniaca del 24,5% si ottiene un contributo di 0,7291 MJ/kg. In questo caso si tratta di un contributo positivo al PCI, poiché il miscelamento dell'ammoniaca e dell'acqua è endotermico.

Pertanto, il PCI della soluzione ammoniacale, con particolare riferimento al titolo massico del 24,5% di ammoniaca, è determinato mediante la relazione:

$$\begin{aligned} \text{PCI} &= y_{\text{NH}_3} (\text{PCI}_{\text{NH}_3(g)} - \Delta h_{\text{ev}, \text{NH}_3}^0) + (1 - y_{\text{NH}_3}) \text{PCI}_{\text{H}_2\text{O}(l)} + \Delta h_{\text{mix}, y_{\text{NH}_3}}^0 = \\ &= \left[ 24,5\% \cdot \left( +18,60 + 2,008 \frac{\varepsilon}{\lambda} - 1,652 \right) + 75,5\% \cdot (-2,442) \right] \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \\ &= \left( +1,699 + 0,4919 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = \left( +1,540 + 0,4461 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \end{aligned}$$

Il risultato è riportato anche in termini volumetrici, utilizzando la densità della miscela ricavata al precedente § A.7. La reazione è complessivamente esotermica, essendo caratterizzata da  $\text{PCI} > 0$ .

### B.7 Urea solida

L'idrolisi dell'urea solida, delineata come primo stadio di reazione al precedente § A.8, è una reazione endotermica che, in accordo con Koebel e Strurz (2003), fornisce al PCI della sostanza il contributo:

$$\Delta \text{PCI} = -89,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} = -1,447 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Pertanto, in analogia a quanto fatto per le produzioni specifiche, il PCI dell'urea solida è determinato come:

$$\text{PCI} = \Delta \text{PCI} + \text{prod}(\text{NH}_3) \cdot \text{PCI}_{\text{NH}_3} = \left( +9,103 + 1,139 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Anche questa reazione è esotermica, essendo caratterizzata da  $\text{PCI} > 0$ .

### B.7 Urea in soluzione acquosa

Anche la miscela urea-acqua è una soluzione non ideale, per la quale è necessario considerare il contributo fornito al PCI dall'entalpia di soluzione. Koebel e Strurz (2003) forniscono la seguente espressione per l'entalpia di soluzione in funzione della molarità " $m_{\text{urea}}$ " della soluzione:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{mix}} [MJ/\text{kmol}_{\text{urea}}] &= 15,305 - 0,35124 \cdot m_{\text{urea}} + 2,3200 \cdot 10^{-2} \cdot m_{\text{urea}}^2 - 1,0076 \cdot 10^{-3} \cdot m_{\text{urea}}^3 \\ &+ 1,8796 \cdot 10^{-5} \cdot m_{\text{urea}}^4 \end{aligned}$$

La molarità di una soluzione è definita come il numero di moli di soluto per chilogrammo di solvente. Pertanto è legata al tenore massico di urea dalla relazione:

$$m_{urea} = \frac{y_{urea}}{1 - y_{urea}} \cdot \frac{1.000}{\mathcal{M}_{urea}}$$

In tale espressione compare la massa molare dell'urea " $\mathcal{M}_{urea}$ ", espressa in " $kg/kmol$ " e il fattore "1.000" per passare da " $kmol$ " a " $mol$ ".

Per soluzione acquosa al 45% in massa di urea, si ottiene molarità della soluzione di 13,624, in corrispondenza della quale l'entalpia di soluzione è di 15,305  $MJ/kmol_{urea}$ . Tale entalpia di soluzione fornisce un contributo positivo al PCI, poiché l'energia assorbita in fase di formazione della soluzione (reazione endotermica) è in seguito rilasciata all'atto della reazione di abbattimento degli ossidi d'azoto.

Pertanto, il PCI associato alla soluzione acquosa di urea, con particolare riferimento al titolo massico del 45%, è determinata come:

$$\begin{aligned} PCI &= y_{urea} \cdot PCI_{urea(S)} + (1 - y_{urea}) \cdot (PCI_{H_2O(l)} + m_{urea}/1.000 \cdot \Delta h_{mix}) = \\ &= \left( +2,868 + 0,5124 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{MJ}{kg} = \left( +3,222 + 0,5756 \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \frac{MJ}{l} \end{aligned}$$

In tale espressione compare nuovamente il fattore "1.000" per convertire " $mol$ " in " $kmol$ " e rendere l'espressione dimensionalmente coerente con le unità di misura introdotte in precedenza. La conversione tra base massica e volumetrica, infine, è effettuata utilizzando la densità della soluzione acquosa calcolata nel precedente § A.9.

Anche in questo caso la reazione complessiva è esotermica, essendo caratterizzata da  $PCI > 0$ .

### **B.8 Bicarbonato di sodio solido**

Con riferimento alla reazione d'abbattimento riportata al precedente § A.10 e adottando le entalpie di formazione delle varie specie chimiche riportate da McBride et al. (2002), si ottiene:

$$\begin{aligned} PCI &= \left( \frac{1}{\lambda} \cdot \Delta h_{f,HCl}^0 + \Delta h_{f,NaHCO_3}^0 - \frac{\lambda - 1}{2 \cdot \lambda} \cdot \Delta h_{f,Na_2CO_3}^0 - \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot \Delta h_{f,H_2O}^0 - \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot \Delta h_{f,CO_2}^0 \right) \cdot 98,5\% \\ &= \left[ \frac{1}{\lambda} \cdot (-92,31) - 950,85 - \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot (-1.129,19) - \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot (-241,826) - \frac{\lambda + 1}{2 \cdot \lambda} \cdot (-393,51) \right] \frac{MJ}{kmol} \cdot 98,5\% = \left( -0,8042 + \frac{0,8445}{\lambda} \right) \frac{MJ}{kg} \end{aligned}$$

La reazione è circa neutrale o leggermente endotermica ( $PCI < 0$ ) poiché  $\lambda$  è solitamente poco maggiore di 1.

### B.9 Idrossido di calcio solido

Con riferimento alla reazione effettiva d'abbattimento e alle convenzioni discusse al precedente § A.11 e adottando le entalpie di formazione riportate da McBride et al. (2002) per tutte le specie chimiche con l'eccezione del  $CaOHCl$ , per il quale si fa riferimento al dato fornito da Partanen et al. (2005), si ottiene il PCI:

$$\begin{aligned}
 PCI &= \left( \frac{2}{\lambda} \cdot \Delta h_{f,HCl}^0 + \Delta h_{f,Ca(OH)_2}^0 - \frac{2}{\lambda} \cdot \Delta h_{f,CaOHCl}^0 - \frac{\lambda-2}{\lambda} \cdot \Delta h_{f,Ca(OH)_2}^0 - \frac{2}{\lambda} \cdot \Delta h_{f,H_2O}^0 \right) \cdot 96\% = \\
 &= \frac{2}{\lambda} \cdot [-92,31 - 985,9 - 540,1 - 241,826] \frac{MJ}{kmol} \cdot 96\% = -\frac{7,678}{\lambda} \frac{MJ}{kg}
 \end{aligned}$$

In questo caso la reazione è sempre apprezzabilmente endotermica, poiché  $PCI < 0$ .

### B.10 Latte di calce

Dato che il latte di calce non è una soluzione, bensì prevalentemente una dispersione di solido in acqua liquida, l'entalpia di soluzione, seppur presente, è molto contenuta e può essere trascurata. Conseguentemente, il PCI è determinato come media pesata di quelli relativi all'idrossido di calcio solido e all'acqua liquida. In particolare per la miscela considerata al precedente § A.12, caratterizzata dal 13,043% in massa di idrossido di calce, si ha:

$$\begin{aligned}
 PCI &= y_{Ca(OH)_2} \cdot PCI_{Ca(OH)_2} + (1 - y_{Ca(OH)_2}) \cdot PCI_{H_2O(l)} = \left( -2,124 - \frac{1,001}{\lambda} \right) \frac{MJ}{kg} = \\
 &= \left( -2,126 - \frac{1,002}{\lambda} \right) \frac{MJ}{l}
 \end{aligned}$$

La conversione tra base massica e volumetrica è effettuata utilizzando la densità della miscela calcolata nel precedente § A.12.

Anche in questo caso la reazione complessiva è endotermica, essendo caratterizzata da  $PCI < 0$ .

### B.11 Incombusti solidi

Considerando gli incombusti solidi alla stregua di carbonio grafítico, come suggerito dalla norma EN 12952-15, si fa riferimento al PCI ivi indicato e pari a 33,00 MJ/kg.

### B.12 CO – Monossido di carbonio

La norma EN 12952-15 riporta per il CO PCI pari a 12,633 MJ/m<sup>3</sup>, corrispondente a 10,109 MJ/kg su base massica.

## Appendice C: calori specifici di diverse sostanze e miscele

Si riportano i calori specifici delle principali sostanze d'interesse ai fini dello svolgimento del bilancio dell'energia dei sistemi combustore/i-caldaia/e e anche, dove possibile, la quantificazione dell'errore commesso con l'approssimazione adottata per la valutazione dell'entalpia specifica, nonché indicazioni circa le ripercussioni che tale errore può comportare sul calcolo del termine  $E_W$  e dell'indice R1.

Di seguito si riporta copia della Tabella 4.3 che riassume i valori di tutti i calori specifici discussi in seguito.

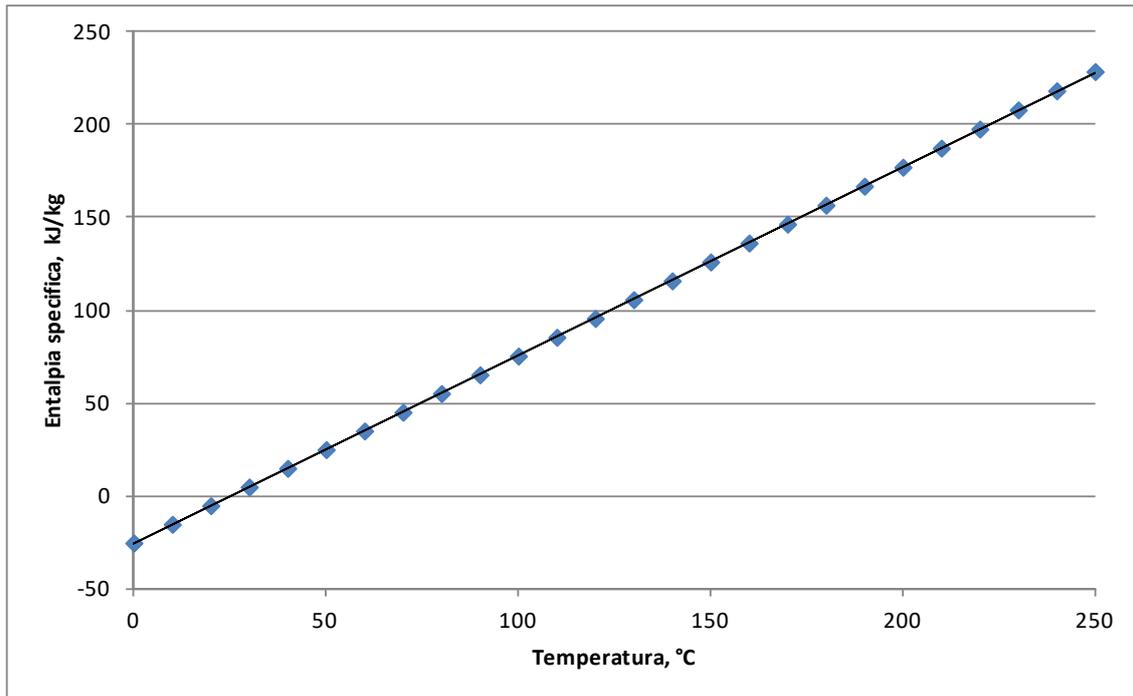
**Copia di Tabella 4.3: Calori specifici delle sostanze rilevanti ai fini del bilancio dell'energia del lato fumi della caldaia.**

<b>Sostanza</b>	<b>UM</b>	<b><math>c_s</math> - kJ/UM-K</b>
Acqua (H <sub>2</sub> O) liquida (0-100 °C)	kg	4,185
Ammoniaca gassosa (pura, 50-500 °C)	kg	$2,0866 + 0,9407 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
	$m_N^3$	$1,5855 + 0,7148 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
EAS (0-250°C)	$m_N^3$	1,308
FAS da combustione di rifiuti solidi (50-250 °C)	$m_N^3$	1,413 <sup>(1)</sup>
FAS da combustione di gas naturale (50-500 °C)	$m_N^3$	1,396
FAS da combustione di gasolio (50-250 °C)	$m_N^3$	1,379
Ferrosi secchi senza incombusti (50-450 °C)	kg	$0,435 + 0,208 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
Incombusti solidi ( $C_{(gr)}$ , 50-450 °C)	kg	$0,7741 + 1,014 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_{RIF})$
Polveri secche, senza incombusti (50-450 °C)	kg	0,8400
Scorie secche, senza incombusti e ferrosi (50-450 °C)	kg	1,0315
VA (0-250 °C)	$m_N^3$	1,518

<sup>(1)</sup> Valutazioni più accurate sono possibili considerando il tenore di CO<sub>2</sub> che caratterizza i FAS.

### C.1 EAS

L'aria secca nel campo di temperatura d'interesse, 0-250 °C, presenta un andamento dell'entalpia specifica in funzione della temperatura pressoché lineare, come è facile apprezzare nella seguente Figura C.1, basata sui risultati forniti dai polinomi NASA recensiti da McBride et al. (2002).



**Figura C.1: Entalpia specifica dell'aria secca in funzione della temperatura.**

Il valore di calore specifico che meglio interpola i dati sperimentali secondo il modello lineare, nel campo di temperatura considerato, è  $1,308 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ . L'errore massimo commesso sulla stima dell'entalpia specifica nel campo di temperatura considerato è inferiore a  $1 \text{ kJ/m}_N^3$  (in grado di produrre errori sulla valutazione di  $E_W$  inferiori allo 0,1%).

## C.2 FAS

I FAS sono composti prevalentemente dall'azoto e dall'argon contenuti nell'aria consumata durante la combustione, nonché dal biossido di carbonio prodotto dall'ossidazione del carbonio. Le altre specie chimiche potenzialmente presenti forniscono contributi al calore specifico assolutamente trascurabili. I FAS prodotti dalla combustione di rifiuti solidi presentano un tenore volumetrico di biossido di carbonio compreso tra il 15% e il 25%. In corrispondenza di queste due situazioni estreme, il calore specifico medio a pressione costante vale rispettivamente  $1,379$  e  $1,431 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ . In entrambi i casi, l'errore massimo commesso nella valutazione dell'entalpia nel campo  $50\text{-}250 \text{ °C}$  è di circa  $2 \text{ kJ/m}_N^3$ . Disponendo del tenore di  $\text{CO}_2$  in caldaia, sarebbe possibile valutare il calore specifico come interpolazione lineare tra i due valori estremi indicati. Poiché in questa sede tale valutazione non è stata condotta, si suggerisce l'adozione del calore specifico costante pari a  $1,413 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ , che rende minimo il massimo errore sulla valutazione dell'entalpia (circa  $6,35 \text{ kJ/m}_N^3$  rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002 - tale errore può ripercuotersi sulla valutazione del termine  $E_W$  nella misura massima pari a circa lo 0,2%).

## C.3 VA

Il vapore acqueo a pressione ambiente, nel campo di temperatura  $0\text{-}250 \text{ °C}$ , presenta un andamento dell'entalpia specifica in funzione della temperatura che può essere linearizzato, ammettendo errori massimi dell'ordine di  $5,0 \text{ kJ/m}_N^3$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al.,

2002 – tale errore è in grado di produrre errori sulla stima di  $E_W$  dell'ordine dello 0,1%). La seguente Figura C.2 confronta i dati d'entalpia specifica del vapore acqueo alle varie temperature con l'andamento lineare corrispondente al calore specifico di  $1,518 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ .

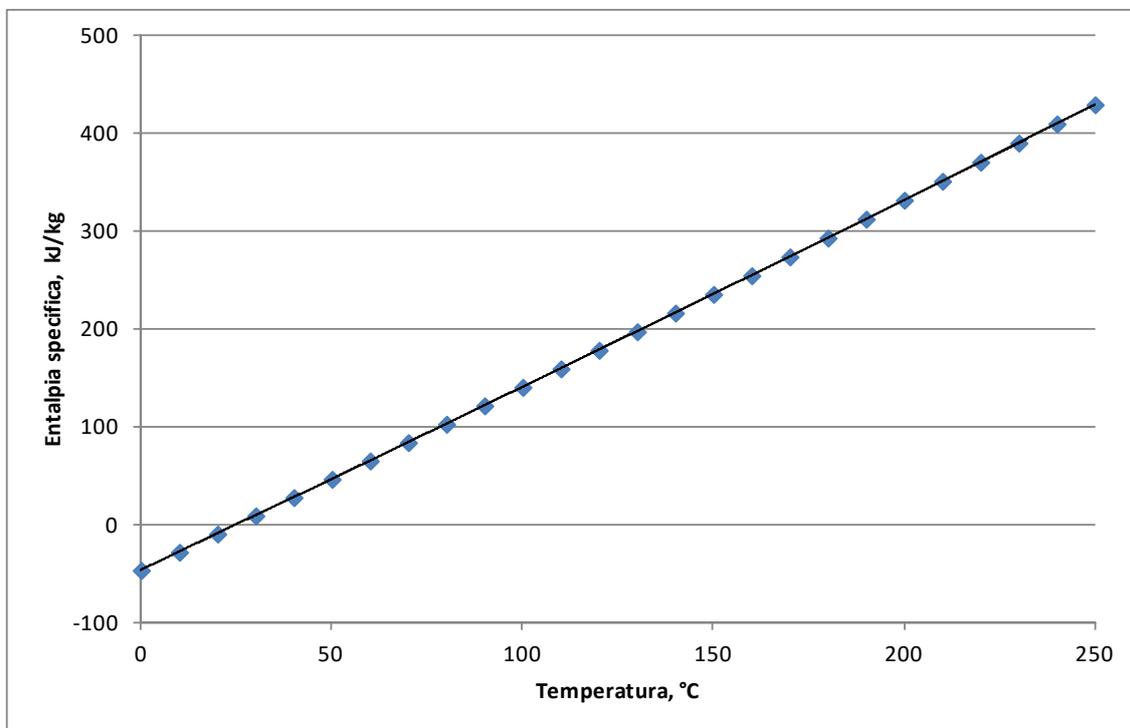


Figura C.2: Entalpia specifica del vapore acqueo a pressione ambiente in funzione della temperatura.

#### C.4 FAS da combustione di gas naturale

Considerando alcune particolari configurazioni d'impianto (per esempio quando i fumi di caldaie esterne a gas naturale sono introdotti nel combustore-caldaia al fine di effettuarne il recupero termico), può nascere l'esigenza di valutare l'entalpia specifica dei FAS prodotti dalla combustione di gas naturale. Questi FAS presentano concentrazioni volumetriche di  $CO_2$  tipicamente inferiori a quelle rilevate nei fumi di combustione dei rifiuti solidi, che possono arrivare sino all'11,7% (caso del metano puro). La migliore linearizzazione dell'entalpia nell'intervallo di temperatura 50-500 °C si ottiene con un valore di calore specifico di  $1,396 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ , ammettendo errori massimi di valutazione dell'ordine di circa  $8 \text{ kJ/m}_N^3$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002) che, data la tipica esiguità di questi flussi secondari, non comportano significative ripercussioni sulla stima del termine  $E_W$  e dell'indice R1.

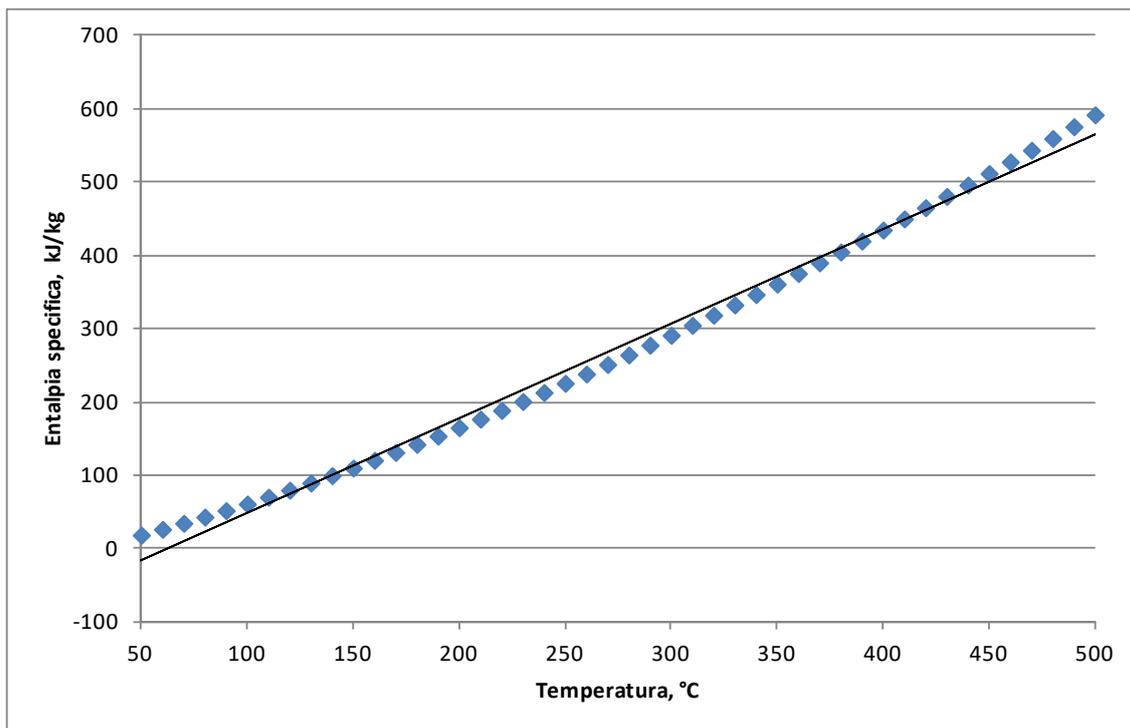
#### C.5 FAS da combustione di gasolio

Anche i FAS da combustione di gasolio possono essere rilevanti in alcune particolari applicazioni. Siccome questi FAS sono caratterizzati da concentrazioni volumetriche di  $CO_2$  dell'ordine del 15%, la migliore linearizzazione dell'entalpia specifica nell'intervallo di temperatura 50-250 °C si ottiene con un valore di calore specifico di  $1,379 \text{ kJ/m}_N^3\text{-K}$ , ammettendo errori massimi dell'ordine di circa  $2 \text{ kJ/m}_N^3$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002) che, data la tipica

esiguità di questi flussi secondari, non comporta significative ripercussioni sulla stima del termine  $E_w$  e dell'indice R1.

### C.6 Incombusti

Anche al fine della valutazione del calore specifico, si assume che gli incombusti solidi possano essere rappresentati dal carbonio grafítico. Il grafico nella seguente Figura C.3, mostra l'andamento dell'entalpia specifica nel campo di temperatura d'interesse per questa sostanza, 50-500 °C.



**Figura C.3: Entalpia specifica del carbonio grafítico a pressione ambiente in funzione della temperatura.**

Come è facile constatare, per via dell'ampio intervallo di temperatura considerato, l'approssimazione lineare dell'entalpia in funzione della temperatura è accettabile solo ammettendo apprezzabili errori di valutazione. Per limitare tali errori, si ricorrere, quindi, a un'approssimazione quadratica, utilizzando l'espressione:

$$c_{s,X} = A_X + B_X \cdot (T - 25^\circ\text{C}) \tag{C.2}$$

Per il carbonio grafítico, possibili valori dei due coefficienti dell'Eq. C.2 sono:

$$A_{C(gr)} = 0,7741 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$B_{C(gr)} = 1,014 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^2}$$

In questo modo l'errore di stima dell'entalpia specifica è limitato a meno di 3  $\text{kJ/kg}$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002) nel campo di temperatura 50-450 °C.

### C.7 Ammoniaca gassosa

I vapori d'ammoniaca possono essere presenti anche a temperatura elevata come flusso in ingresso al sistema combustore/i-caldia/e, soprattutto quando prodotti mediante un sistema d'idrolisi termica da soluzioni di urea, quale reagente per sistemi *SNCR* e *SCR*.

Similmente alla grafite, anche l'ammoniaca gassosa presenta una forte dipendenza del calore specifico dalla temperatura, sicché per limitare l'errore di valutazione della corrispondente entalpia specifica, si adotta l'Eq. C.2 con i seguenti valori dei due coefficienti:

$$A_{\text{NH}_3(g)} = 2,0866 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 1,5855 \frac{\text{kJ}}{\text{m}_N^3 \cdot \text{K}}$$

$$B_{\text{NH}_3(g)} = 0,9407 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^2} = 0,7148 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{m}_N^3 \cdot \text{K}^2}$$

Tali valori limitano l'errore di valutazione dell'entalpia specifica a meno di 0,5  $\text{kJ/kg}$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002) nell'intervallo di temperatura 50-500 °C. La conversione da valori specifici massici a valori specifici volumetrici è stata ottenuta utilizzando il volume normale convenzionale dell'ammoniaca gassosa pari a 1,3161  $\text{m}_N^3/\text{kg}$ .

### C.8 Scorie secche, senza ferrosi e incombusti

Per le scorie si assume il comportamento tipico delle scorie di combustione del carbone. Ciò porta a un valore di calore specifico di 1,0315  $\text{kJ/kg-K}$  nell'intervallo di temperatura 50-450 °C, con un errore massimo di valutazione della corrispondente entalpia specifica dell'ordine di 5  $\text{kJ/kg}$  (rispetto ai risultati dei polinomi NASA recensiti da McBride et al., 2002). Questo valore di calore specifico si confronta con quello indicato dalla norma EN 12952-15 per il campo di temperatura 25-200 °C, pari a 1,0  $\text{kJ/kg-K}$ .

### C.9 Polveri secche senza incombusti

Per le polveri si assume il valore di calore specifico indicato dalla norma EN 12952-15 per il campo di temperatura 25-200 °C (e, eventualmente, impiegandolo anche oltre tale intervallo se necessario), pari a 0,84  $\text{kJ/kg-K}$ .

### C.10 Ferrosi senza incombusti

Per i materiali ferrosi è necessario ricorrere alla formulazione del calore specifico secondo l'Eq. C.2, con i seguenti valori dei due coefficienti:

$$A_{\text{Fe}} = 0,435 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$B_{\text{Fe}} = 0,208 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^2}$$



## Elenco delle fonti

- Biganzoli, L., Racanella, G., Marras, R., Grosso, M., 2015. High temperature abatement of acid gases from waste incineration. Part I: Experimental tests on full scale plants. *Waste Management* 36, 98-105.
- Bodéan, F. and Deniard, Ph., 2003. Characterization of flue gas cleaning residues from European solid waste incinerators: assessment of various Ca-based sorbent processes. *Chemosphere* 51, 335–347.
- Boynton, R. S., 1980. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. Wiley-Interscience; 2nd edition.
- CEN (Comité Européen de Normalisation), 2003. EN 12952-15: Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests.
- CEN (Comité Européen de Normalisation), 2005. EN ISO 6976: Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition.
- 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.
- EC (European Commission), 2006. BREF WI – Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Disponibile all'indirizzo: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf) (Ultimo accesso: settembre 2017).
- EC (European Commission), 2009. Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amending Council Directive 1999/32/EC as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing Directive 93/12/EEC. *Off. J. Eur. Union* L 140, 88-113.
- EC (European Commission), DG (Directorate-General) Environment, 2011. Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to annex II of Directive 2008/98/EC on waste.
- EC (European Commission), 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Off. J. Eur. Union* L 312, 3-30.
- EU (European Union), 2010. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Off. J. Eur. Union* L 334, 17-119.
- FDBR (Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.), 2000. Acceptance Testing of Waste Incineration Plants with Grate Firing Systems. FDBR-Guideline RL 7. Edition 04/2000. Disponibile in Inglese e in Tedesco. Sostituita da “FDBR, 2013”.

- FDBR (Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.), 2013. Acceptance Testing of Waste Incineration Plants with Grate Firing Systems. FDBR-Guideline RL 7. Edition 03/2013. Disponibile in Inglese e in Tedesco.
- Fellner J., Cencic O., and Rechberger H., 2007. A New Method to Determine the Ratio of Electricity Production from Fossil and Biogenic Sources in Waste-to-Energy Plants. *Environ. Sci. Technol.* 41, 2579-2586.
- Gucker F. T. Jr., Cage, F. W., Moser, C. E., 1938. The Densities of Aqueous Solutions of Urea at 25 and 30° and the Apparent Molal Volume of Urea. *Journal of the American Chemical Society* 60, 2582-88.
- IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2007. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Lucerne, Switzerland, August 2007.
- ISO (International Organization for Standardization), 2009. ISO 1928: Solid mineral fuels -- Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value.
- Jennings, B. H., and Shannon, F. P., 1938. The Thermodynamics of Absorption Refrigeration - Part 1. Tables of the Properties of Aqua-Ammonia Solutions. Lehigh University Studies - Science and Technology Series no. 1. Lehigh University, Bethlehem, PA, USA.
- Jungbluth, N., 2012. Characteristics of the Products. English version of the Ecoinvent report No. 6-IV "Erdöl", Chapter 3. Data v2.0 (2007). Translation by Peter, F.. Villigen & Duebendorf, June 2012.
- Koebel, M. and Strutz, E. O., 2003. Thermal and Hydrolytic Decomposition of Urea for Automotive Selective Catalytic Reduction Systems: Thermochemical and Practical Aspects. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42, 2093–2100.
- Lemmon E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O., 2010. REFPROP: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties. NIST Standard Reference Database 23, Version 9.0.
- MATTM (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare), 2016. DM n. 134 del 19/05/2016: Regolamento concernente l'applicazione del fattore climatico (CCF) alla formula per l'efficienza del recupero energetico dei rifiuti negli impianti di incenerimento. (16G00148). Pubblicato sulla GU n.168 del 20-7-2016.
- Mackenzie, F.T. and J.A. Mackenzie, 1995. *Our changing planet*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 288-307.
- McBride, B. J., Zehe, M. J., Gordon, S., 2002. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species. NASA/TP—2002-211556, September 2002.
- Mejbri Kh., Bellagi A., 2006. Modelling of the thermodynamic properties of the water–ammonia mixture by three different approaches. *International Journal of Refrigeration* 29, 211–218.

NLA (National Lime Association), 2007. Fact Sheet: Lime Terminology, Standards & Properties. National Lime Association, Arlington, VA, USA.

Partanen, J., Backman, P., Backman, R., Hupa, M., 2005. Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part II: importance of calcium hydroxychloride. Fuel 84, 1674–1684.

RI (Repubblica Italiana), 2006. Dlgs. 152 pubblicato sulla GU n.88 del 14-4-2006 - Suppl. Ordinario n. 96.

RF (République Française), 2008. Construction d'installations d'incinération avec fours à grille, oscillants ou tournants, de déchets ménagers, autres déchets non dangereux et dasri. Fascicule 82 du C.C.T.G. (Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés publics de travaux) approvato da "Arrêté du 6 mars 2008" del "Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi". Disponibile solo in Francese.

RL (Regione Lombardia), 2012. DGR IX/3019 del 15 febbraio 2012: Determinazioni in merito al rilascio delle autorizzazioni alla realizzazione degli impianti ed all'esercizio delle inerenti operazioni di smaltimento (D10) o recupero (R1) di rifiuti ai sensi del Dlgs. 152/06 e del Dlgs. 133/05 di "Attuazione della direttiva 2000/76/EC, in materia di incenerimento di rifiuti". BURL (Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia) n. 8 Serie ordinaria, del 20/02/2012.