

Nadim Kahalé*

La comparazione di 4 differenti schemi di trattamento a secco di fumi da impianti di termovalorizzazione di rifiuti urbani (RU), con singolo o doppio stadio di filtrazione e con utilizzo di bicarbonato e/o calce, permette di apprezzare i vantaggi economici del singolo e del doppio stadio di filtrazione a bicarbonato rispetto al doppio stadio con calce e bicarbonato. Il processo SOLVAir® con bicarbonato permette di rispettare i più severi limiti di emissione negli impianti di trattamento fumi, favorendo il recupero energetico e contribuendo alla sostenibilità ambientale grazie all'uso ridotto del reagente e alla valorizzazione dei prodotti sodici residui, con significativi vantaggi economici.

Il recupero di energia, secondo la Direttiva quadro sui rifiuti (Direttiva 2008/98/CE), è una parte fondamentale della gestione dei rifiuti, mentre lo smaltimento è in ultima posizione nella "gerarchia dei rifiuti" e deve essere considerato come ultima possibilità gestionale.

Il recupero di energia è fondamentale per gli impianti Waste-to-Energy (WtE), come pure per gli impianti di combustione biomasse e per altre installazioni industriali quali vetrerie, cementifici, acciaierie, impianti per la fusione secondaria dell'alluminio, ecc. Il processo di combustione dei rifiuti solidi urbani (RU) contribuisce a ridurre la massa e il volume dei rifiuti, preservando così volumi di discarica e il contenuto di energia dei rifiuti stessi (il valore di quest'ultimo è in fase di aumento a causa della maggiore diffusione e applicazione della raccolta differenziata). Lo scopo di questo studio è quello di valutare i carichi ambientali del trattamento termico con recupero di energia dei rifiuti urbani (RU), durante l'intero ciclo di vita del sistema preso in esame, confrontando le diverse possibilità di trattamento a secco dei fumi (FGT).

La metodologia applicata per la valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi di trattamento fumi è la LCA (Life Cycle Assessment), con definizione degli obiettivi, dell'analisi dell'inventario e del carico ambientale.

La valutazione dell'impatto è calcolata in base all'indicatore denominato Cumulative Energy Demand (CED), che misura il consumo di fonti

energetiche fossili e rinnovabili lungo il ciclo di vita del sistema considerato, includendo sia il consumo diretto di energia, sia l'uso indiretto di energia dovuto a materiali, produzione, trasporto, manutenzione e trattamento dei rifiuti.

La quantificazione della CED permette inoltre di confrontare i diversi schemi di trattamento secondo i vantaggi economici associati.

Sostenibilità ambientale

I fattori chiave che influenzano la sostenibilità ambientale degli impianti WtE sono i seguenti:

- i valori di recupero di energia;
- le tecnologie disponibili per la rimozione degli inquinanti acidi, generati dalla combustione dei rifiuti;
- la rimozione degli ossidi di azoto da parte di un sistema catalitico influenza il profilo di temperatura del trattamento dei fumi (FGT) e di conseguenza l'energia disponibile;
- i processi FGT a secco prevengono la formazione di reflui liquidi, che devono essere trattati, comportando alti costi di smaltimento.

Trattamento a secco dei fumi

Nei processi a secco un reagente solido viene iniettato nei fumi, favorendo una reazione solido/gas. I prodotti residui solidi così formati vengono raccolti in un filtro (generalmente a maniche) a valle del punto d'iniezione.

L'agente neutralizzante può essere bicarbonato NaHCO_3 o calce Ca(OH)_2 .

È stata considerata la presenza di un sistema SCR di coda, grazie alla sua capacità di raggiungere va-

* Solvay Chimica Italia S.p.A.;
www.solvairsolutions.com, nadim.kahale@solvay.com

Tabella 1 (A e B): Confronto tra differenti configurazioni FGT

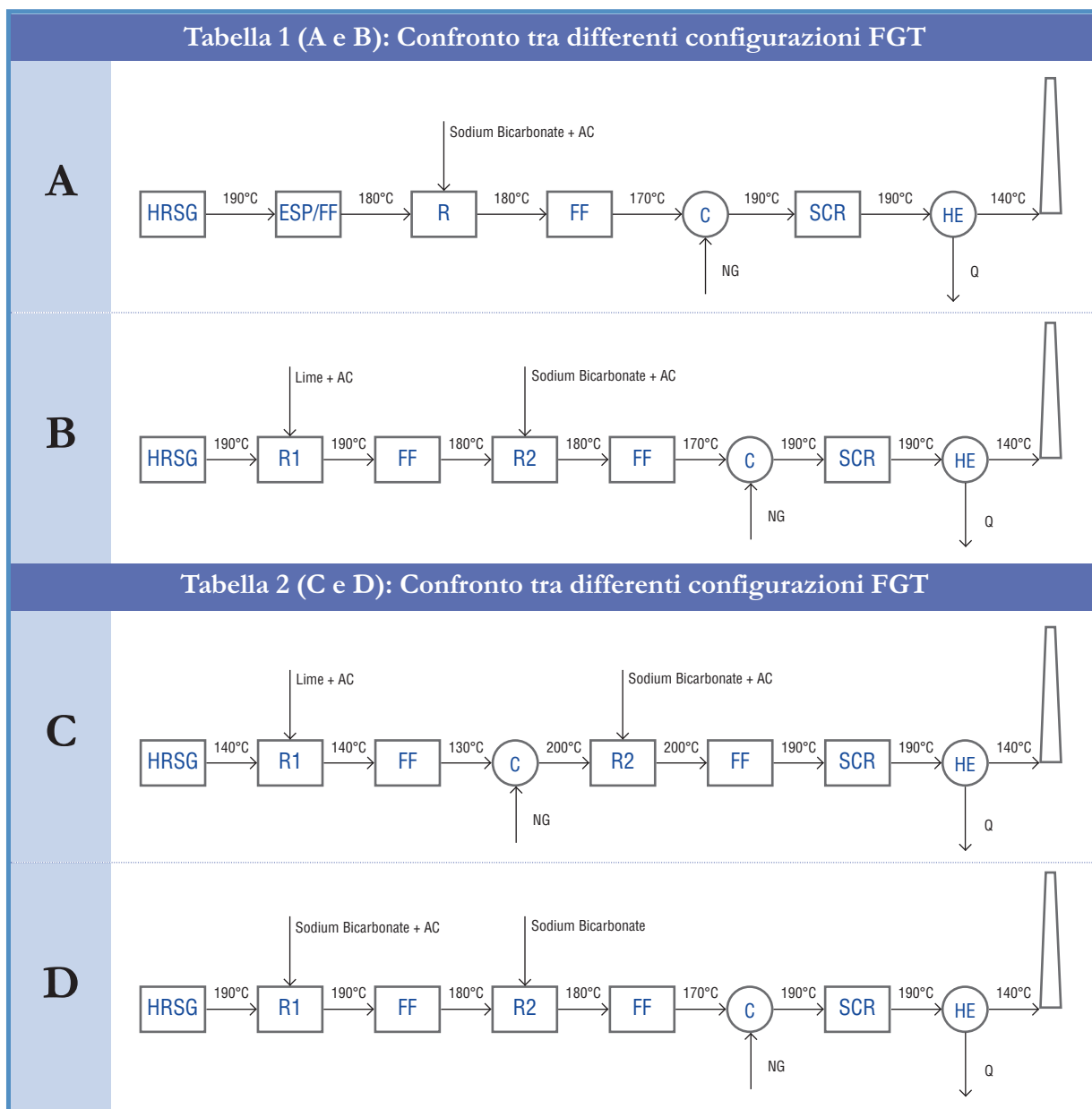
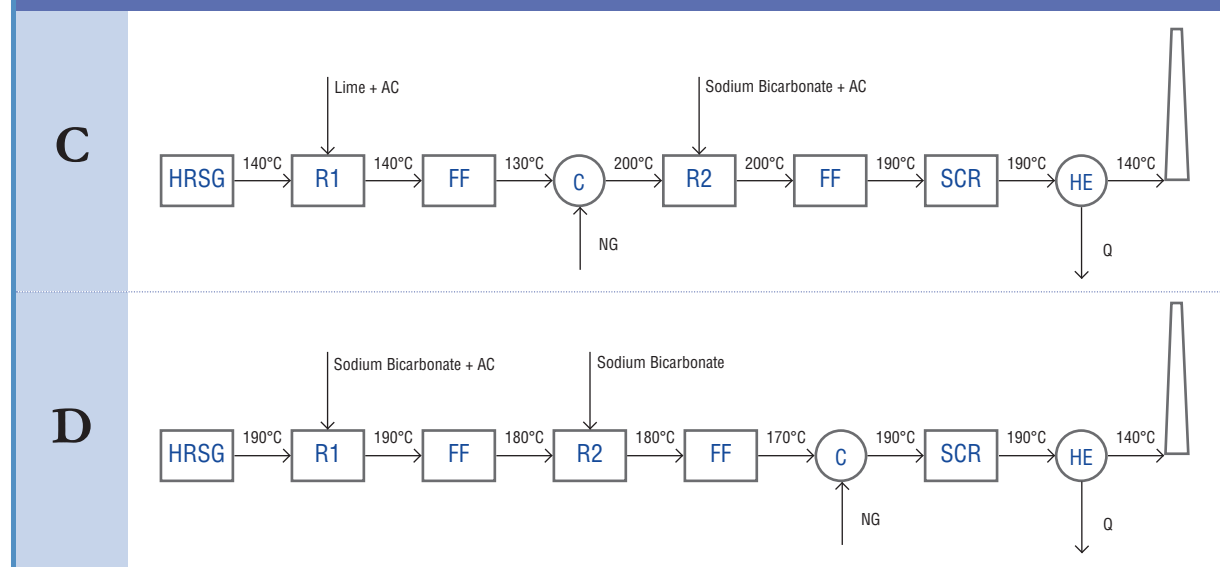


Tabella 2 (C e D): Confronto tra differenti configurazioni FGT



lori limite di emissione (ELV) di NOx molto bassi e alla sua adozione sempre più comune.

Sono stati ipotizzati diversi profili di temperatura per i due diversi reagenti, come riportato nelle Tabelle 1 e 2, al fine di garantire la conformità con il livello di temperatura idoneo per la rimozione degli acidi e le migliori prestazioni del sistema SCR.

Le caratteristiche principali delle soluzioni SOLVAir® con iniezione a secco di bicarbonato e il trattamento dei residui a base di sodio presso la piattaforma SOLVAL® sono presentate qui di seguito.

Descrizione del processo SOLVAir®

Il bicarbonato di sodio (NaHCO_3) viene iniettato a secco nella corrente gassosa dei fumi acidi a temperature superiori ai 130 °C e si trasforma pressoché istantaneamente in carbonato di sodio (Na_2CO_3), liberando nel contempo acqua (H_2O) ed anidride car-

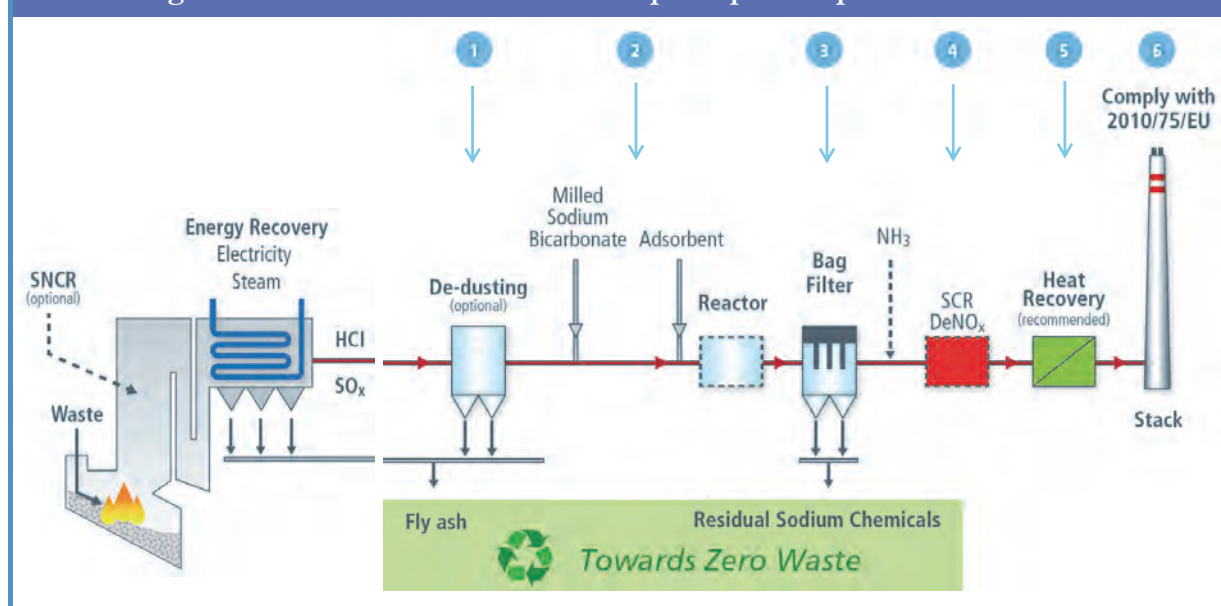
bonica (CO_2). Questo rilascio di sostanze in fase gassosa produce due effetti principali:

- la molecola di carbonato di sodio appena formata è fortemente porosa con una elevata superficie specifica e la sua reattività nei confronti degli acidi è molto grande;
- il bicarbonato di sodio subisce una naturale riduzione in peso con una conseguente riduzione del quantitativo di prodotti di risulta da avviare a smaltimento o recupero.

Il processo è semplice, ma permette di:

- rispettare i limiti di emissione più severi con un eccesso stechiometrico ridotto risultante in un consumo di reagente molto vantaggioso rispetto ad altre tecnologie a secco;
- valorizzare i sali residui raccolti sul filtro a maniche in impianti muniti di doppio stadio di filtrazione;

Figura 1: Schema delle caratteristiche principali del processo SOLVAir®



- recuperare energia operando con un DeNO_x catalitico a bassa temperatura;
- recuperare ulteriormente energia a valle del catalizzatore.

Lo schema rappresentato (Figura 1) descrive bene le caratteristiche principali del processo SOLVAir®:

Fase 1

Per favorire ulteriormente la riduzione ed il recupero dei residui è raccomandata una prima fase di depolverazione prima della neutralizzazione.

Fase 2

Il bicarbonato di sodio è iniettato nei fumi per neutralizzare gli acidi presenti, in particolare:

- Acido cloridrico (HCl);
- Ossidi di zolfo (SO_x);
- Acido fluoridrico (HF).

Il processo permette inoltre, mediante un'iniezione di carbone attivo o coke di lignite, di adsorbire i metalli pesanti ed i microinquinanti organici.

Fase 3

I Prodotti Sodici Residui (RSC) risultanti dalla neutralizzazione sono captati dal filtro a maniche, pronti per un riciclo sostenibile. I principali componenti sono: cloruro, solfato, fluoruro e carbonato di sodio.

Fase 4

Un sistema DeNO_x catalitico permette di ridurre le emissioni di NO_x al di sotto dei limiti imposti dalle legislazioni più severe. Grazie all'eccellente effi-

cazia di rimozione degli SO_x ed alla temperatura di funzionamento adeguata non è necessario riscaldare i fumi. In particolare è possibile operare senza dover riscaldare i fumi grazie alle ottime performance di rimozione di SO₃ e SO₂.

Fase 5

Uno scambiatore di calore prima del camino permette di aumentare l'energia vendibile aumentando l'efficienza del recupero termico.

Fase 6

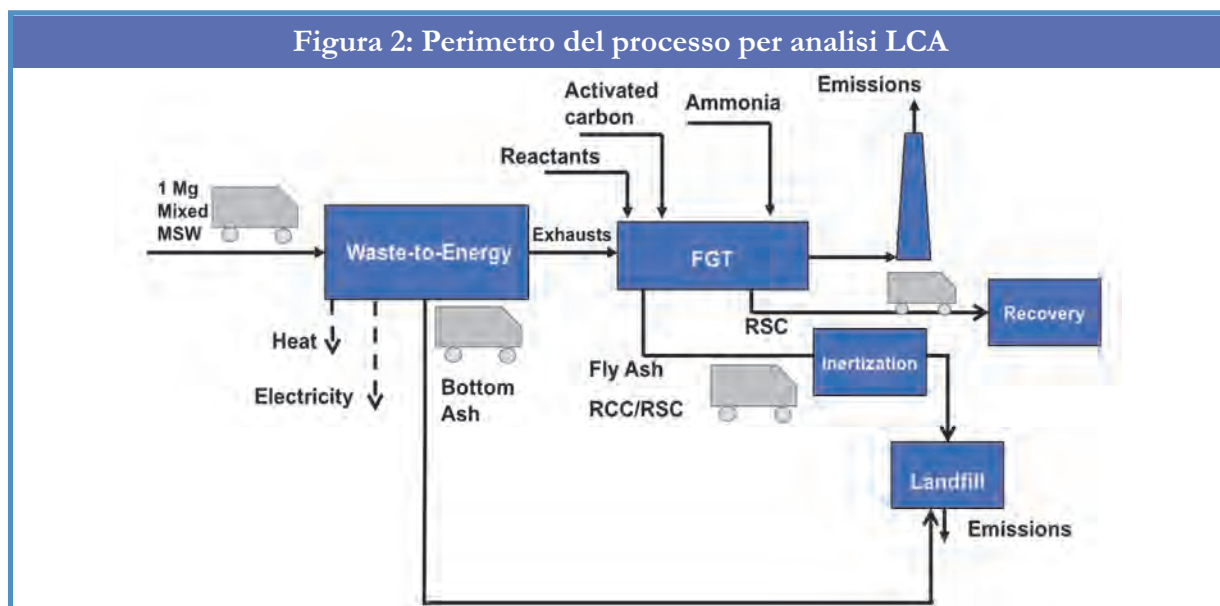
Il processo SOLVAir® può facilmente essere adattato per rispettare l'evoluzione legislativa dei limiti di emissione.

Dallo schema si evince anche che i prodotti sodici residui (RSC) risultanti dal trattamento fumi in impianti muniti di doppio stadio di filtrazione possono essere recuperati e valorizzati, sotto forma di una salamoia satura di sali di sodio, attraverso un processo brevettato da Solvay e applicato industrialmente in Italia (impianto SOLVAL® di Rosignano) e in Francia (impianto RESOLEST® di Dombasle).

La salamoia, sottoposta a processi di dissoluzione, filtrazione e rettifica finale, viene quindi depurata, al fine di corrispondere alle specifiche di idoneità per il suo riutilizzo nella produzione di carbonato di sodio.

Il processo di valorizzazione dei RSC permette di ridurre drasticamente i residui da conferire in discarica e di recuperare una materia prima da reinserire nei cicli produttivi.

Figura 2: Perimetro del processo per analisi LCA



Analisi LCA

L'analisi è stata effettuata con riferimento a RU a valle della raccolta differenziata come da Tabella 3, con una composizione chimica risultante in un potere calorifico inferiore (PCI) di circa 10.544 GJ/Mg. L'output dell'impianto WtE è pari a 50 MWt, corrispondente a un impianto di medie dimensioni. I principali parametri di processo sono riportati in Tabella 4.

I seguenti processi sono stati inclusi nell'analisi:

- trasporto di RU all'impianto;
- produzione di reagenti per il trattamento fumi (FGT);
- consumo di gas naturale (NG) per l'aumento di temperatura a monte del SCR;
- trasporto e smaltimento di scorie (BA);
- trasporto e trattamento/smaltimento di ceneri volanti (FA) e residui solidi di trattamento fumi;
- utilizzo di carboni attivi (AC) e ammoniaca.

Tabella 3: Materiali e composizione chimica

Material composition [% in mass]		Chemical composition [% in mass]	
Paper and cardboard	12.00	C	27.59
Organic matter	33.00	H	4.23
Garden waste	9.00	O	17.39
Plastics	15.00	S	0.04
Metals	6.00	N	0.67
Wood	6.50	Cl	0.26
Glass	9.50	F	0.004
Textiles	9.00	Ashes	16.46
		Moisture	33.37

Il conferimento in discarica è considerato l'opzione di base per lo smaltimento delle scorie.

Le ceneri volanti e i prodotti delle reazioni della calce con i fumi acidi (prodotti calcici residui RCC) vengono dapprima inertizzati e poi conferiti in discarica, mentre i prodotti della reazione del bicarbonato con i fumi acidi (prodotti sodici residui RSC), raccolti sul secondo stadio di filtrazione, sono valorizzati grazie alla piattaforma SOLVAL®.

L'unità funzionale assunta per il confronto è 1 Mg di RU.

Il perimetro del processo per l'analisi LCA è riportato in Figura 2.

Analisi LCA: impianto di termovalorizzazione

La potenza assorbita dall'impianto rappresenta una parte importante della potenza lorda ed è dovuta principalmente alla gestione della linea di trattamento fumi (FGT).

Le emissioni al camino sono riportate nella Tabella 5 (valori tipici riscontrati in molti impianti WtE in Europa), quindi con valori più severi rispetto ai ELV della Direttiva 2000/76/CE.

Tabella 4: Parametri di processo

Thermal power output - plant size [MW]	50
MSW throughput [Mg/y]	135199
Steam maximum pressure [bar]	40
Steam maximum temperature [°C]	400
O2 in the flue gas at the boiler exit [% vol.]	6.5
Flue gas temperature at the stack [°C]	140
Turbine isentropic efficiency	0.78

Tabella 5: Emissioni al camino

ELV – AC NH ₃ consumption – BA FA production		Directive 2000/76/EC		ELV at the stack	
Particulate matter	mg/Nm ³	10	30	2	
HCl	mg/Nm ³	10	60	2.5	
HF	mg/Nm ³	1	4	0.05	
SO ₂	mg/Nm ³	50	200	7.5	
NO ₂	mg/Nm ³	200	400	60	
CO	mg/Nm ³	50	100	25	
TOC	mg/Nm ³	10	20	5	
Cd and Tl	mg/Nm ³	0.05		0.025	
Hg	mg/Nm ³	0.05		0.025	
Sb, As, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	mg/Nm ³	0.5		0.25	
PAHs	mg/Nm ³	0.01		0.005	
PCDDs/PCDFs	ng/Nm ³	0.1		0.05	
NH ₃	mg/Nm ³	-		5	
Specific reagent consumption			Specific solid residues production		
AC	kg/Mg MSW	0.53	BA	kg/Mg MSW	135.7
NH ₃		0.46	FA		32.92

La portata specifica è pari a 6560 Nm³ secco all'11% O₂ per Mg di rifiuti.

Le concentrazioni acide stimate (mg/Nm³, secco 11% O₂) sono le seguenti: HCl 510, SO₂ 190, HF 5.

Il consumo specifico di reagenti per il trattamento fumi e la relativa produzione di residui, sulla base di dati reali sul campo e con riferimento alle concentrazioni acide nei fumi e ai valori di emissione raggiunti al camino, sono riportati nella Tabella 6 per i 4 diversi casi analizzati (A – B – C – D)).

Analisi LCA: rifiuti e residui

Stima delle distanze per l'impianto:

- RU 100 km, BA 100 km, FA 650 km.

Stima delle attività di trattamento e smaltimento:

- BA sono smaltiti in discarica per rifiuti inerti;
- FA, FA + RCC/RSC, AC (esaurito) subiscono un

processo di stabilizzazione e vengono inviati a smaltimento/miniere;

- RSC, raccolti sul 2° stadio di filtrazione, sono composti principalmente da sali di sodio e possono essere inviati per il recupero alla piattaforma SOLVAL[®] ad una distanza media di 300 km (i residui finali a valle del trattamento di recupero presso l'unità SOLVAL[®] vengono inviati a una discarica autorizzata).

Analisi LCA: potenza elettrica e termica

Le tabelle 7 e 8 (a pagina seguente) riassumono i risultati in termini di potenza elettrica, termica ed efficienza di conversione, considerando due possibilità di utilizzo del calore recuperato nello scambiatore di calore finale (per il raffreddamento dei fumi da 190 a 140 °C):

- caso 1: potenza termica fornita ad un utente esterno;

Tabella 6: Consumo specifico di reagenti e produzione di residui (kg/Mg MSW)

	1° stage				2° stage			
	RSC/RCC				RSC			
	Reagent	Excess	Reaction products	AC	Reagent	Excess	Reaction products	AC
A	13.00 ^{sb}	1.95	8.09	0.53	-	-	-	-
B	8.80 ^{li}	5.39	11.80	0.53	4.20 ^{sb}	0.89	2.75	-
C	8.00 ^{li}	4.59	10.40	0.53	4.20 ^{sb}	0.89	2.75	-
D	7.70 ^{sb}	0.00	5.37	0.53	4.00 ^{sb}	0.69	2.71	-

^{sb} sodium bicarbonate. ^{li} lime.

Tabella 7: Potenza termica fornita a un utilizzatore esterno				
	A	B	C	D
Air pre-heating	NO	NO	NO	NO
Steam flow rate [kg/h]	51099	51099	53519	51099
P _{gross} [kW]	12275	12275	12856	12275
P _{net} [kW]	10482	10482	11064	10482
In-plant consumption [%]	14.61	14.61	13.94	14.61
Q _{out} [kW]	1393	1393	1393	1393
Q _{air} [kW]	-	-	-	-
Q _{gas} [kW]	803	803	2787	803
η_{net}	0.210	0.210	0.221	0.210
η_{net} including gas	0.206	0.206	0.210	0.206
η_{cog}	0.234	0.234	0.246	0.234

Tabella 8: Potenza termica utilizzata per il preriscaldamento dell'aria di combustione				
	A	B	C	D
Air pre-heating	YES	YES	YES	YES
Steam flow rate [kg/h]	52987	52987	55406	52987
P _{gross} [kW]	12728	12728	13310	12728
P _{net} [kW]	10936	10936	11517	10936
In-plant consumption [%]	14.08	14.08	13.47	14.08
Q _{out} [kW]	-	-	-	-
Q _{air} [kW]	1393	1393	1393	1393
Q _{gas} [kW]	803	803	2.787	803
η_{net}	0.219	0.219	0.230	0.219
η_{net} including gas	0.215	0.215	0.218	0.215
η_{cog}	-	-	-	-

- caso 2: potenza termica utilizzata per preriscaldare l'aria di combustione (uso interno).

Nelle tabelle: P è la potenza prodotta, Q_{out} è la potenza termica resa disponibile dallo scambiatore di calore posizionato a monte del camino, Q_{air} è la potenza termica utilizzata per preriscaldare l'aria di combustione; Q_{gas} è la potenza termica richiesta per riscaldare i fumi alla temperatura idonea per il sistema SCR o l'iniezione di calce.

Indicatori LCA – CED

I risultati di confronto della CED (per Mg MSW) sono presentati nella Tabella 9 per la fornitura di calore all'esterno e nelle Tabella 10 (a pagina seguente) per il preriscaldamento dell'aria di combustione. Gli altri processi citati nelle tabelle includono: emissioni al camino, trasporto di RU, produzione di ammoniaca e carboni attivi, conferimento in discarica di BA.

Risultati comparativi

Gli indicatori CED mostrano l'impatto ambientale causato dalla produzione di tutti i reagenti, dallo smaltimento dei residui del primo stadio di filtra-

zione, dalla produzione e dal consumo di gas naturale utilizzato per aumentare la temperatura a monte del SCR.

Gli impatti evitati sono dovuti essenzialmente al recupero di energia elettrica, al recupero di energia termica e alla gestione dei residui.

Il valore totale della CED è negativo per tutti e 4 i casi, il che significa che gli impianti Waste-to-Energy rappresentano un risparmio di risorse energetiche.

Le configurazioni A (un singolo stadio di bicarbonato) e D (due stadi di bicarbonato) evidenziano i valori CED più bassi.

La configurazione C (calce a 140 °C nel primo stadio) consente un maggiore risparmio dalla produzione di elettricità, ma l'aumento del consumo di gas naturale (NG) è superiore al risparmio di elettricità, portando a un bilancio complessivo più sfavorevole.

Considerazioni energetiche ed economiche

I risultati del confronto tra C e D evidenziano che la doppia filtrazione con bicarbonato consente un significativo risparmio di recupero termico di 541 MJ/Mg (circa 150 kWh/t MSW).

Tabella 9: Cumulative Energy Demand (CED) [MJ/Mg _{MSW}] – external use of the heat									
	Other processes	Avoided electric energy	Avoided thermal energy	Reactant 1° stage	Reactant 2° stage	Disposal of 1° stage residues	RSC valorization	NG for temperature increase	Total
A	628	-6956	-97	57	-	169	-8.0	219	-5989
B	628	-6956	-97	37	18	260	-2.7	219	-5894
C	628	-7343	-97	34	18	248	-2.7	760	-5754
D	628	-6956	-97	33	17	199	-2.6	219	-5959

Tabella 10: Cumulative Energy Demand (CED) [MJ/Mg_{MSW}] – combustion air pre-heating

	Other processes	Avoided electric energy	Avoided thermal energy	Reactant 1° stage	Reactant 2° stage	Disposal of 1° stage residues	RSC valorization	NG for temperature increase	Total
A	628	-7258	0	57	-	169	-8.0	219	-6193
B	628	-7258	0	37	18	260	-2.7	219	-6098
C	628	-7643	0	34	18	248	-2.7	760	-5957
D	628	-7258	0	33	17	199	-2.6	219	-6163

Il risultato meno favorevole è ottenuto da C (calce a 140 °C nel primo stadio). Il recupero di energia elettrica è migliore rispetto alle altre configurazioni, ma la temperatura limitata lungo la linea dei fumi a monte dell'SCR richiede un consumo maggiore di NG che ha un impatto negativo sul valore CED complessivo.

Quando il calore recuperato a monte del camino è utilizzato per preriscaldare l'aria di combustione, le prestazioni complessive del ciclo del vapore migliorano, aumentando quindi l'efficienza elettrica e riducendo l'impatto ambientale. I valori della CED vengono quindi ridotti in tutte le configurazioni studiate, ma la valutazione relativa dei 4 casi non cambia.

Dai dati presentati si evince che il processo SOLVAir® presenta dei vantaggi economici importanti rispetto alle tecnologie ad umido e anche rispetto alla tecnologia a secco con utilizzo di calce. Particolarmente significativa è la riduzione dell'energia necessaria in combinazione con sistemi catalitici di coda a bassa temperatura.

Inoltre l'efficienza del bicarbonato permette una drastica riduzione della temperatura del punto di rugiada acida, rendendo il recupero energetico a valle del catalizzatore effettivamente disponibile. Considerando un indice energetico di 0,031 €/kWh riferito al prezzo del gas naturale per consumi indu-

striali in Italia, i risparmi energetici sono significativi e sono direttamente proporzionali alla taglia dell'impianto.

Con riferimento all'impianto qui considerato, nel confronto tra le configurazioni C e D possiamo notare un significativo vantaggio economico (riportato in Figura 3) della soluzione D (doppio stadio a bicarbonato) rispetto alla soluzione C (1° stadio a calce e 2° stadio a bicarbonato), legato alla Cumulative Energy Demand e al costo/gestione dei reagenti e dei residui agli attuali costi di mercato:

- circa 250 k€/anno con riferimento alla CED complessiva dell'impianto;
- circa 300 k€/anno con riferimento alla gestione dei reagenti e dei residui della linea di trattamento fumi;
- il vantaggio economico annuale si aggira quindi attorno a 550 k€.

Le tematiche del recupero energetico si integrano anche con la sostenibilità ambientale del processo SOLVAir®, soprattutto in relazione alla valorizzazione dei prodotti sodici residui, che comporta una riduzione di consumo di materia prima naturale e del conferimento in discarica.

Le SOLVAir® Solutions contribuiscono pertanto in maniera determinante all'accettazione sociale degli impianti di termovalorizzazione.

Figura 3: Vantaggio economico D (doppio stadio bicarbonato) rispetto a C (calce + bicarbonato)

