

# **Valutazione comparativa delle tecnologie di termovalorizzazione dei rifiuti urbani attraverso l'incenerimento diretto o dopo trasformazione in CDR**

Angelo Bonomi  
Consulente ambientale  
Verbania (VB)  
[angelo.bonomi2@tin.it](mailto:angelo.bonomi2@tin.it)

IV Convegno Nazionale "Utilizzazione Termica dei Rifiuti" Abano 12-14 giugno 2003  
Relazioni Tecniche pp. 369-378

## **Sommario**

Esiste un certo numero di tecnologie per lo smaltimento dei rifiuti urbani, alcune in sviluppo ed altre già ben assestate, e che attualmente sono in competizione tra di loro. Di particolare interesse è sicuramente la competizione che esiste tra le tecnologie di termovalorizzazione del rifiuto urbano attraverso l'incenerimento e quelle invece che trasformano il rifiuto in combustibile (CDR) che viene poi in seguito termovalorizzato. In questo studio abbiamo effettuato una valutazione comparativa di queste due tecnologie sul piano economico, energetico ed ambientale utilizzando dati industriali disponibili e simulando le varie vie di smaltimento su un modello sviluppato per una realtà territoriale di dimensioni medio piccole, quale la Provincia del Verbano-Cusio-Ossola.

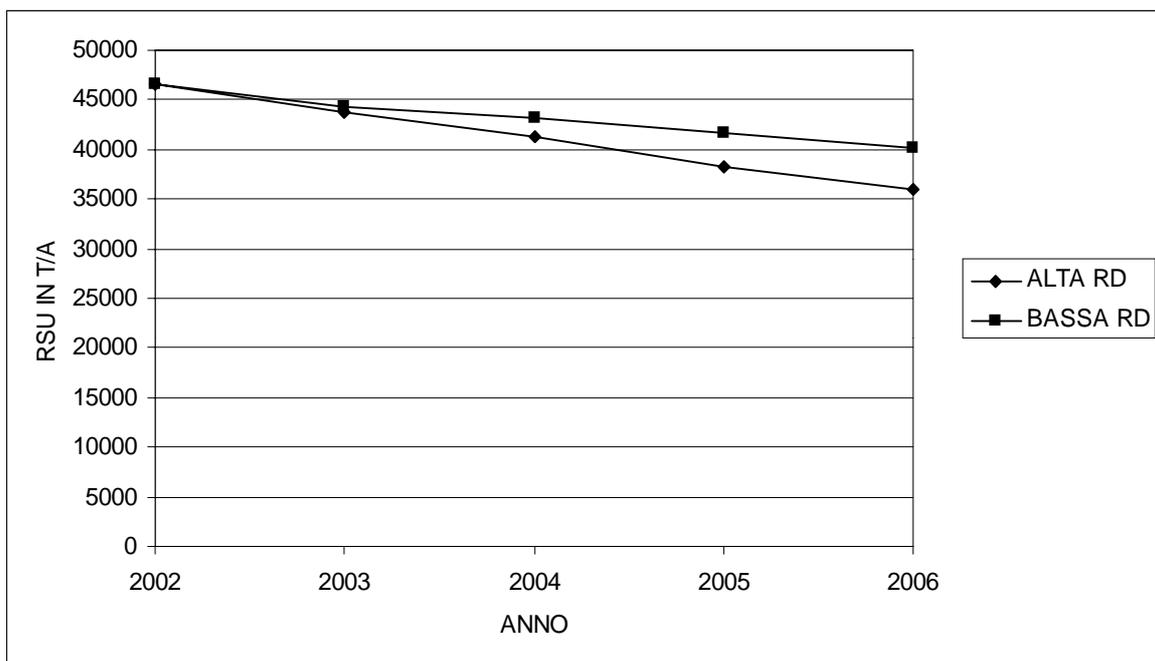
## **1. Introduzione**

L'abbandono dello smaltimento in discarica dei rifiuti solidi urbani (RSU), come previsto dalle direttive europee e dalla legge italiana, lascia l'incenerimento o la trasformazione del RSU in un combustibile da rifiuti (CDR) con la sua successiva termovalorizzazione praticamente come le più importanti alternative allo smaltimento dei rifiuti in discarica.

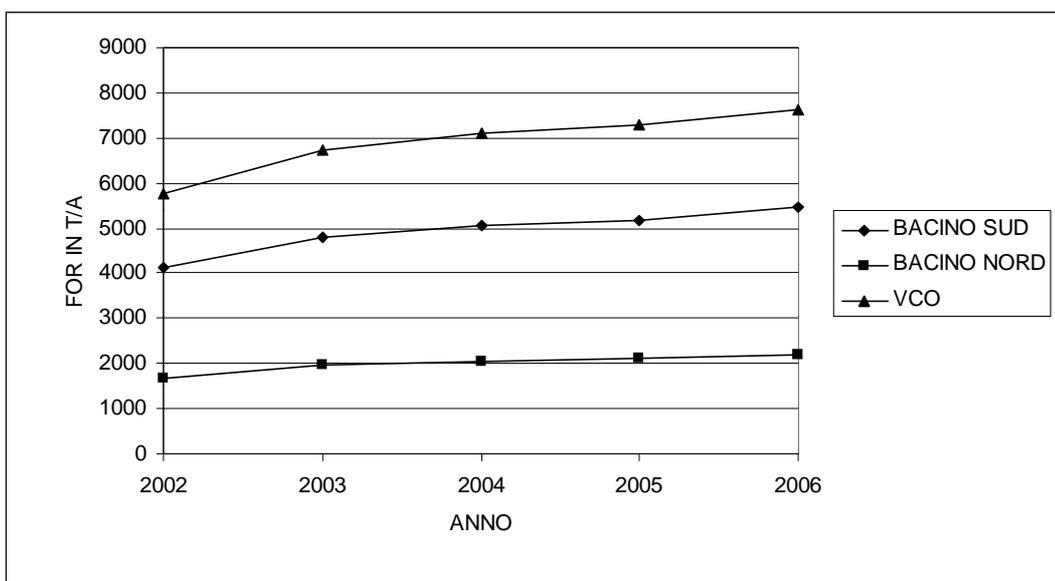
L'incenerimento del RSU è una tecnologia ormai matura che esiste da molto tempo e che, come prevede attualmente la legge, deve comunque assicurare un recupero di energia sotto forma di energia elettrica e, se possibile, anche in parte sotto forma di energia termica. La tecnologia di produzione del CDR è invece più recente e la termovalorizzazione del CDR risulta ancora in fase di industrializzazione. In questa memoria si è cercato di esaminare vari aspetti di queste due tecnologie valutandole sia dal punto di vista economico che da quello energetico ed ambientale. Per lo studio comparativo si è considerato il caso dello smaltimento di rifiuti urbani in una realtà medio piccola costituita dalla Provincia del Verbano-Cusio-Ossola di cui è ben conosciuta la situazione dei rifiuti e per la quale è stato sviluppato un modello previsionale che ha dimostrato una buona affidabilità. E' così possibile simulare con il modello varie situazioni di smaltimento del RSU prodotto annualmente, stimare i costi di smaltimento, la produzione energetica e gli impatti ambientali. Alcuni risultati preliminari di questo studio hanno fatto oggetto di una memoria presentata alla manifestazione RICICLA 2002 a Rimini (1).

## 2. Modello previsionale

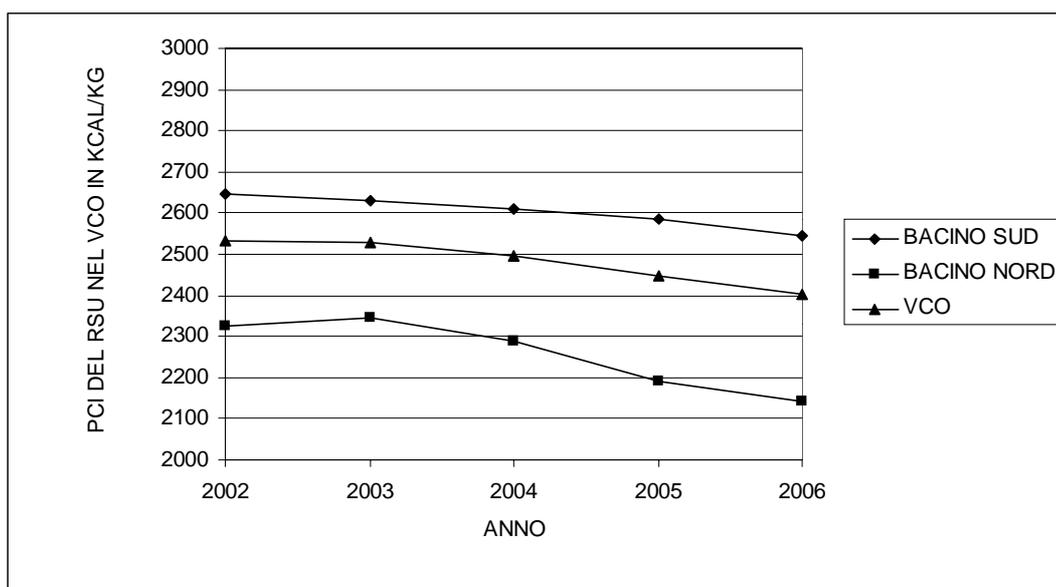
Il modello previsionale elaborato è in grado di calcolare la possibile evoluzione dei vari flussi di rifiuto differenziato e indifferenziato con le rispettive composizioni merceologiche e il corrispondente Potere Calorifico Inferiore (PCI) del rifiuto, considerando che la generazione totale di rifiuti urbani (RUR) resti approssimativamente costante, fatto dimostrato dalle statistiche degli ultimi 5 anni. In pratica il modello, a partire da una situazione nota per un anno di riferimento e dettagliata sulla base di due bacini di raccolta (bacino sud e bacino nord della Provincia), calcola, sulla base di scenari possibili di evoluzione della percentuale dei vari tipi di raccolta differenziata (RD), i flussi corrispondenti, la generazione di RSU con la composizione merceologica e il potere calorifico corrispondente. Una descrizione più dettagliata del modello è riportata in una tesi di laurea (2) sostenuta presso la Facoltà di Economia di Novara dell'Università degli Studi del Piemonte Orientale. I risultati previsionali del modello calcolati per l'anno 2002 ed estesi fino al 2006 sono riportati nelle Fig. 1 e 2. In particolare nella Fig. 1 è riportata l'evoluzione della generazione di RSU secondo due scenari (alto e basso) della raccolta differenziata, nella Fig. 2 è riportata l'evoluzione della raccolta della FOR (scenario ad alta RD), nella Fig. 3 infine è riportata l'evoluzione del PCI del RSU raccolto (scenario ad alta RD).



**Fig. 1.** *Evoluzione della raccolta di RSU nel V.C.O.*



**Fig. 2.** *Evoluzione della raccolta della FOR nel V.C.O.*



**Fig. 3.** *Evoluzione del PCI del RSU nel V.C.O.*

### 3. Scenari considerati

Lo studio comparativo è stato condotto considerando come riferimento la situazione dei rifiuti urbani nel territorio per il 2002 e per l'anno 2006, in quest'ultimo anno, seguendo il Programma di Gestione dei Rifiuti Provinciale, si dovrebbe raggiungere l'obiettivo di una elevata percentuale di raccolta differenziata dell'ordine del 57%. Oltre ai due anni di riferimento si sono considerati anche due scenari: il primo considerando l'esistenza della raccolta della FOR nella parte del territorio in cui è programmata, il secondo assumendo che

non venga effettuata nessuna raccolta della FOR. I dati ottenuti in questo modo dal modello previsionale sono riportati nella Tabella 1:

**Tab. 1.** *Dati previsionali per gli anni 2002 e 2006 usati per lo studio comparativo*

<b>SCENARIO 2002</b>	<b>CON RACCOLTA FOR</b>	<b>SENZA RACCOLTA FOR</b>
RUR (t/a)	68999	68999
RSU (t/a)	46627	52285
RD%	43%	31%
FOR (t/a)	5781	0
PCI (kcal/kg RSU)	2534	2338

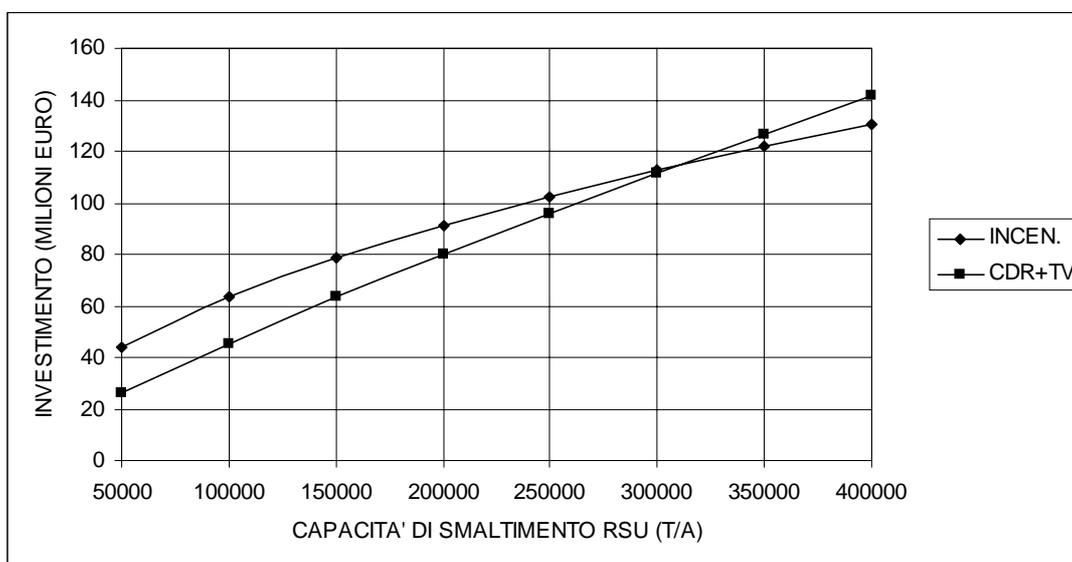
<b>SCENARIO 2006</b>	<b>CON RACCOLTA FOR</b>	<b>SENZA RACCOLTA FOR</b>
RUR (t/a)	68999	68999
RSU (t/a)	35949	43450
RD%	57%	43%
FOR (t/a)	7638	0
PCI (kcal/kg RSU)	2404	2113

La produzione di CDR è stata considerata pari al 50% in peso del RSU trattato. Più complessa si presenta la stima del potere calorifico del CDR prodotto a partire da una certa composizione merceologica e potere calorifico del RSU. Innanzitutto si è considerata la tecnologia di trasformazione in CDR del RSU senza separazione preliminare dell'umido, questa scelta è stata dettata tra l'altro dal fatto che per questo CDR esistono dei primi dati industriali sulla sua termovalorizzazione. In questo modo il RSU subisce dapprima una fase di ossidazione batterica con emissione di anidride carbonica il cui calore sviluppato unitamente all'insufflazione di aria provoca una biodisidratazione del prodotto che infine è sottoposto a una raffinazione per l'eliminazione di una buona parte dei metalli e parte degli inerti. L'eliminazione di acqua dal RSU rappresenta il fattore principale di incremento del potere calorifico del rifiuto, tuttavia, sulla base dei dati di trattamento disponibili, è difficile collegare la composizione merceologica del RSU con il PCI finale del CDR poiché il processo, attraverso l'insufflazione d'aria e la raffinazione, tende a produrre un CDR con un PCI abbastanza costante. In definitiva si è adottato, attraverso una stima della possibile composizione del CDR ottenibile nel 2002 (1), un valore di 4064 kcal/kg per il CDR ottenuto da RSU con raccolta della FOR e di 4086 kcal/kg per il CDR ottenuto RSU senza raccolta della FOR. Questi valori sono stati considerati approssimativamente validi anche per il CDR ottenibile nel 2006. Tuttavia, consci dell'imprecisione possibile della stima del PCI fatta, nello studio comparativo si è considerata anche l'incidenza di una possibile riduzione di questi valori a un valore minimo di 3700 kcal/kg.

### 3. Valutazioni economiche

La valutazione economica di una tecnologia è in generale alquanto complessa poiché gli investimenti e i costi possono variare in maniera molto ampia in funzione delle specifiche condizioni del progetto di impianto o dell'impianto funzionante. Per queste ragioni, pur scegliendo delle condizioni ragionevoli per i calcoli economici, i risultati in termini di investimenti e costi di smaltimento rimangono generalmente puramente indicativi. Un fattore che ha grande importanza nel calcolo di costi ed investimenti è sicuramente l'effetto scala che, in linea generale, riduce i costi unitari di investimento e di smaltimento all'aumentare della taglia degli impianti, e questo in maniera differente a seconda della tecnologia considerata. Per i nostri calcoli abbiamo utilizzato aggiornando dati esistenti in studi precedenti (3) (4) e informazioni ricevute da società costruttrici di questi impianti. Per l'incenerimento è stato considerato il caso di forni a griglia composti da due linee, mentre si è considerato il caso di forni a letto fluido per la termovalorizzazione del CDR.

Nella nostra valutazione abbiamo calcolato gli investimenti e i costi totali di smaltimento in funzione della capacità di smaltimento da un minimo di 50.000 t/a RSU a un massimo di 400.000 t/a RSU. Occorre precisare che nel caso della produzione e termovalorizzazione di CDR l'investimento risulta la somma degli investimenti per le due operazioni e che la capacità di termovalorizzazione del CDR è praticamente la metà, in termini di tonnellate, rispetto a quella di trattamento del RSU, visto che il rapporto di trasformazione del RSU in CDR che è di circa il 50%. La Fig. 4 riporta l'andamento di questi investimenti in funzione delle capacità di smaltimento.

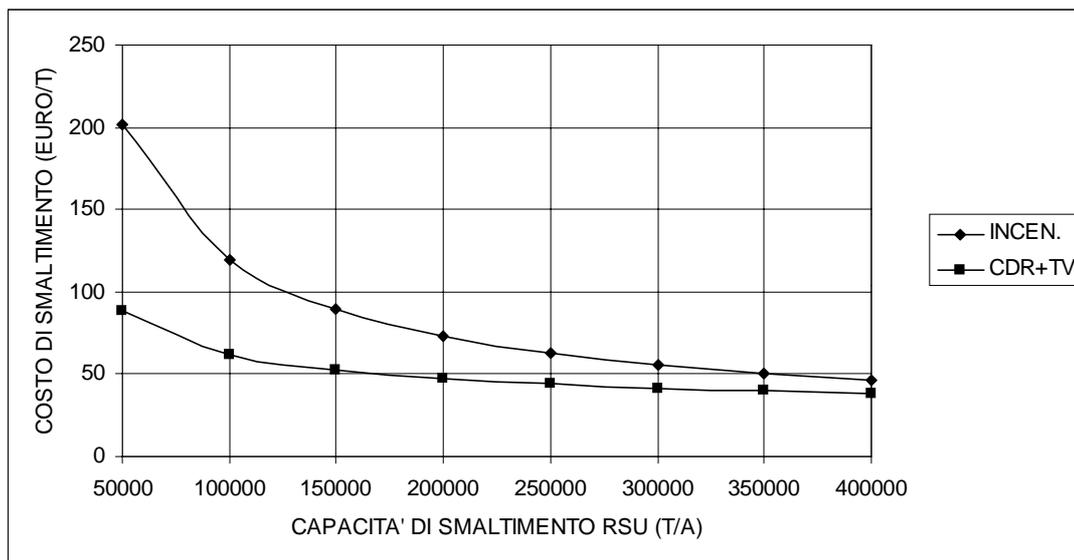


**Fig. 4. Investimenti per gli impianti di smaltimento in funzione della loro capacità**

Possiamo osservare che gli investimenti sono sensibilmente più bassi per il caso del CDR per capacità di smaltimento inferiori a 200.000 t/a RSU per poi diventare più alti a partire da capacità di smaltimento superiori alle 300.000 t/a RSU. Questo è ben spiegato dal fatto che mentre per i forni a griglia e a letto fluido si ha un forte effetto scala per gli investimenti che aumentano meno che proporzionalmente con le capacità di smaltimento, nel caso della produzione del CDR si ha una tecnologia modulare con investimenti che sono quasi

proporzionali alle capacità di smaltimento, il che penalizza, dal punto di vista degli investimenti, la tecnologia del CDR nel campo delle alte capacità di smaltimento.

I costi totali di smaltimento in funzione delle capacità di trattamento sono riportati nella Fig. 5. Questi costi sono fortemente influenzati in particolare dal possibile prezzo di vendita del kWh. Nel nostro caso abbiamo considerato un prezzo di vendita del kWh molto contenuto e pari a 0,075 Euro/kWh. I costi di ammortamento sono stati calcolati sulla base di un periodo di 15 anni mentre non è stato considerato nessun onere finanziario.



**Fig. 5. Costo di smaltimento in funzione della capacità**

Come si vede dalla Fig.5. i costi di incenerimento rispetto a quelli del CDR sono molto più alti per le basse capacità mentre diventano dello stesso ordine per le grandi capacità. Tenuto conto del carattere indicativo dei costi calcolati possiamo affermare che la tecnologia del CDR potrebbe essere più economica per le basse capacità di smaltimento mentre l'incenerimento potrebbe essere più economico per le capacità elevate.

Considerando ora i nostri scenari possiamo vedere dalla Tabella 1 che la quantità di RSU da smaltire varia da un massimo di 52.285 t/a per il 2002 in assenza di raccolta della FOR a un minimo di 35.949 t/a per il 2006 con raccolta della FOR. Considerando che la capacità minima modulare della tecnologia del CDR è di 50.000 – 60.000 t/a, e considerando la stessa capacità per l'incenerimento del RSU e termovalorizzazione del CDR, si può calcolare un costo di smaltimento del CDR che varia da circa 85 Euro/t RSU per il 2002 in assenza di raccolta della FOR a circa 118 Euro/t RSU per il 2006 in assenza di raccolta della FOR. Per l'incenerimento i valori rispettivi calcolati sono di circa 200 Euro/t RSU e di circa 230 Euro/t RSU. Naturalmente questi costi, in particolare nel caso dell'incenerimento, possono essere più bassi se la termovalorizzazione viene effettuata in forni di capacità maggiore come si può comprendere dalla Fig. 5, anche se bisogna tener conto in questo caso dei costi di trasporto che non sono stati considerati nei nostri calcoli.

#### 4. Valutazioni energetiche

La valutazione energetica effettuata per i vari scenari è stata fatta in termini di quantità annuale di energia elettrica prodotta nei vari scenari calcolata sulla base della resa energetica e cioè del rapporto percentuale tra l'energia elettrica ottenibile e l'energia termica fornita dal RSU o CDR calcolabile a partire dal loro rispettivo PCI. L'utilizzazione di parte dell'energia termica, ad esempio per il teleriscaldamento, e l'autoconsumo di energia, che tra l'altro può essere alquanto variabile, non sono stati considerati in questa valutazione che quindi si riferisce all'energia elettrica totale prodotta.

Per quanto riguarda la resa energetica dell'incenerimento misurata in inceneritori di piccola o media dimensione come quelli di Vercelli e Mergozzo (VB) indicano un valore dell'ordine del 10% che quindi è stato considerato come resa energetica di riferimento per l'incenerimento.

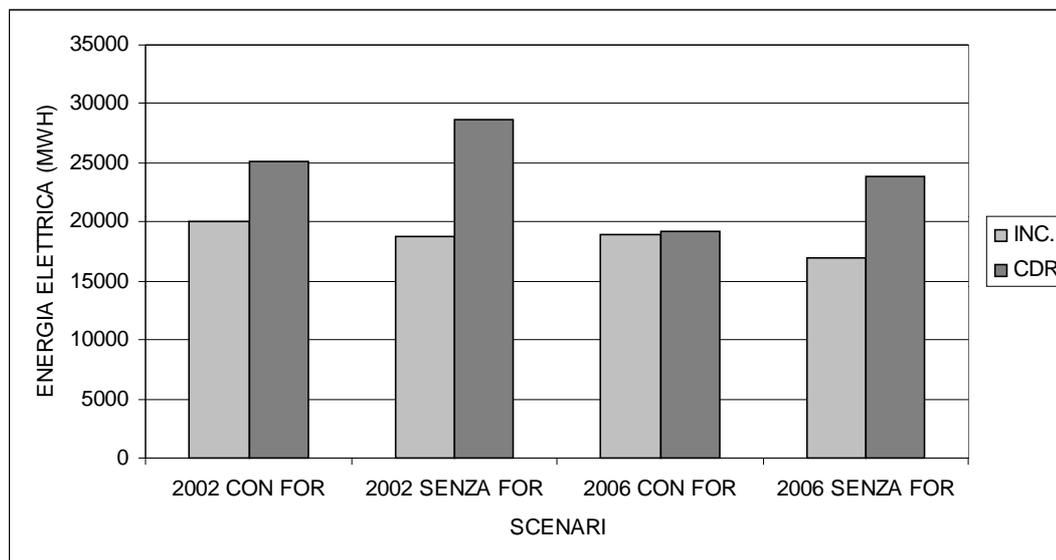
Riguardo la resa energetica della termovalorizzazione del CDR i dati disponibili sono più scarsi. In Europa esiste un solo impianto di termovalorizzazione di CDR in funzione situato ad Asslar in Germania. L'impianto della potenza termica di 10 MW è in grado di fornire una potenza elettrica di 2 MW per usi interni con una resa elettrica dell'ordine del 20%. Secondo quanto discusso con gli ingegneri della Herhof che lo hanno sviluppato, un impianto più grande potrebbe facilmente raggiungere una resa dell'ordine del 23-24%. Altre indicazioni al riguardo vengono dal progetto Ecodeco di costruzione dell'impianto di Corteolona (5) in grado di termovalorizzare 60'000 t/a di CDR con una potenza termica di 31 MW in grado di fornire una potenza elettrica di circa 7 MW con una resa elettrica di circa il 23%. Considerando possibili progressi che possono essere ancora fatti su questo tipo di termovalorizzazione abbiamo considerato come riferimento il valore del 24% per la resa energetica di termovalorizzazione del CDR.

Nel calcolo della produzione di energia elettrica a partire da una certa quantità di RSU occorre considerare che sia la produzione di CDR che lo smaltimento della FOR, a cui va aggiunta una quantità equivalente di verde, consumano un certo quantitativo di energia essenzialmente elettrica. Sulla base di dati disponibili da studi precedenti (4) si è fissato a 48 kWh/t di FOR l'energia elettrica necessaria per la trasformazione in composta e a 45 kWh/t di RSU l'energia elettrica necessaria per trasformare il RSU in CDR. I quantitativi di energia consumati per queste operazioni devono essere sottratti all'energia elettrica prodotta per avere un valore di energia elettrica netta comparabile per i vari scenari.

Nel grafico della Fig. 6 abbiamo riportato l'energia elettrica prodotta in funzione dei vari scenari annuali in presenza o no di raccolta differenziata della FOR per il 2002 e in caso di una raccolta differenziata spinta come si potrebbe avere nel 2006. Possiamo osservare che, in linea generale, la produzione di energia elettrica è nella maggior parte dei casi nettamente superiore per la tecnologia di produzione di CDR e successiva termovalorizzazione rispetto all'incenerimento diretto del RSU. La differenza maggiore si ha per lo scenario del 2002 senza raccolta della FOR mentre la differenza è minore nel caso di raccolta della FOR in presenza di una forte raccolta differenziata come potrebbe realizzarsi nel 2006.

Per completare la valutazione abbiamo studiato anche l'influenza sulla produzione di energia da parte del PCI del CDR e della resa energetica della sua termovalorizzazione. Poiché il valore del PCI del CDR presenta un certo grado di incertezza è stato rifatto un calcolo considerando un valore di PCI molto più basso pari a sole 3700 kcal/kg CDR. In questo caso l'energia elettrica netta prodotta ad esempio nel 2002 diminuisce rispettivamente a 22769 MWh e 25843 MWh nei casi con raccolta e senza raccolta della FOR rimanendo tuttavia ancora nettamente più elevata di quella recuperabile con l'incenerimento. Un altro controllo è stato fatto considerando una resa energetica di termovalorizzazione del CDR più

bassa pari a solo il 20%. In questo caso le energie elettriche nette prodotte ad esempio nei due scenari con raccolta o senza raccolta della FOR nel 2002 sono rispettivamente di 20728 MWh e 23689 MWh. In questo caso il valore dell'energia elettrica netta ottenuta con il CDR con raccolta della FOR è solo leggermente superiore a quella corrispondente ottenuta per incenerimento del RSU dimostrando che il sistema è fortemente sensibile alla variazione delle rese energetiche.



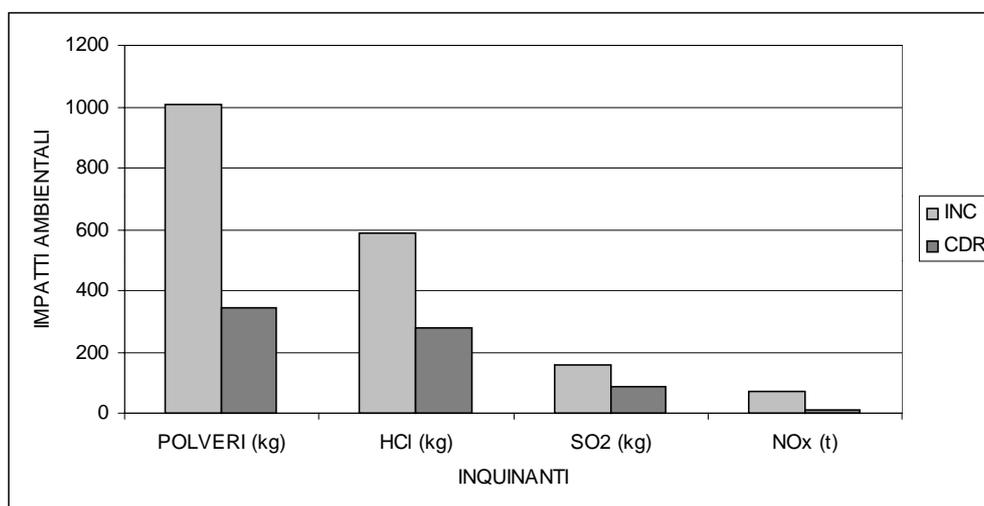
**Fig. 6. Produzione di energia elettrica nei vari scenari considerati**

## 5. Valutazioni ambientali

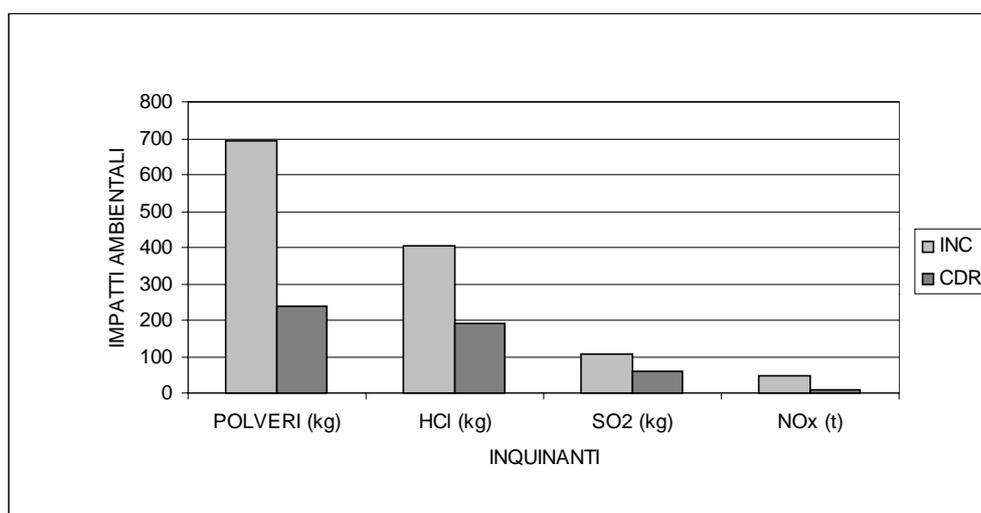
Gli impatti ambientali coinvolti nello smaltimento del RSU come pure della FOR secondo le varie vie possibili sono molteplici. Tuttavia, mentre i rifiuti solidi e gli effluenti sono in generale trattati e smaltiti completamente, le emissioni gassose, ed in particolare quelle emesse durante la termovalorizzazione, costituiscono, nonostante il trattamento dei fumi, la sorgente di inquinanti ambientali più importante e che è quindi stata considerata nella nostra valutazione ambientale. Sulla base dei dati di funzionamento dell'inceneritore di RSU di Mergozzo (VB), che possiede un moderno sistema di depurazione, e dei dati forniti per la termovalorizzazione del CDR nell'impianto di Corteolona (5), è possibile stimare le concentrazioni di inquinanti nei fumi per le due tecnologie. Tenendo conto dei dati di portata fumi in funzione della quantità di combustibile bruciata è poi possibile calcolare le emissioni per 1000 t di RSU o CDR termovalorizzato. Nella Tabella 2 abbiamo riportato questi dati utilizzati per la valutazione ambientale. Nelle Fig. 7 e 8 abbiamo riportato gli impatti ambientali calcolati per i due scenari estremi e cioè lo scenario 2006 senza raccolta della FOR, che corrisponde a un massimo di RSU da smaltire, e lo scenario 2006 con raccolta della FOR, che corrisponde a un minimo di RSU da smaltire. Possiamo osservare che, in ambedue gli scenari, gli impatti ambientali della tecnologia del CDR sono nettamente inferiori in particolare per quello che riguarda l'emissione di  $\text{NO}_x$  di quella di incenerimento. Ciò è dovuto essenzialmente alla migliore efficienza energetica della termovalorizzazione del CDR.

**Tab. 2. Concentrazioni e impatti ambientali dei principali inquinanti nei fumi**

COMBUSTIBILE	RSU	CDR
Polveri (mg/Nm <sup>3</sup> )	2,5	2,0
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	1,5	1,6
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,4	0,5
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	175	69
Polveri (kg/1000 t)	19,3	13,2
HCl (kg/1000 t)	11,2	10,6
SO <sub>2</sub> (kg/1000 t)	3,0	3,2
NO <sub>x</sub> (kg/1000 t)	1354	457



**Fig. 7. Impatti ambientali dello scenario 2002 senza raccolta della FOR**



**Fig. 8. Impatti ambientali dello scenario 2006 con raccolta della FOR**

## 6. Osservazioni conclusive

I risultati delle simulazioni mostrano che la termovalorizzazione del rifiuto urbano attraverso la produzione di CDR permette un recupero di energia elettrica per una stessa quantità di RSU smaltita che può arrivare a valori superiori di circa il 30% rispetto all'incenerimento diretto, anche tenendo conto dell'energia consumata per la produzione di CDR, mentre gli impatti ambientali in termini di emissioni annuali di polveri, HCl, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> sono meno della metà. Gli investimenti e i costi di smaltimento del RSU attraverso il CDR si mostrano competitivi rispetto all'incenerimento per capacità di smaltimento inferiori alle 200.000 t/a di RSU. Gli studi parametrici condotti sul modello mostrano che la produzione di energia elettrica è fortemente dipendente dalla resa di trasformazione dell'energia termica del rifiuto in energia elettrica mentre è poco sensibile al potere calorifico del CDR. Possiamo infine osservare che la raccolta differenziata della FOR, mentre tende ad aumentare la produzione di energia elettrica nel caso della tecnologia di incenerimento, essa tende a ridurre la produzione nel caso della tecnologia di produzione e termovalorizzazione del CDR. Ciò è dovuto nel primo caso al netto miglioramento del PCI del RSU in caso di raccolta della FOR, mentre nel secondo caso la riduzione è dovuta semplicemente a una minor quantità di CDR prodotta.

## Bibliografia

- (1) Bonomi A. 2002 *“Possibili scenari energetici per lo smaltimento dei rifiuti urbani”* Atti dei seminari RICICLA, Rimini 6-9 novembre 2002, p.716
- (2) Bonomi M. 2001 *“Le tecnologie di smaltimento del rifiuto solido urbano nell'era della raccolta differenziata”* Tesi di laurea, Università del Piemonte orientale, Facoltà di Economia, Novara, Anno Accademico 1999/2000
- (3) Dodero G. Coletti M. 1999 *“Energy from town wastes thermal treatment technologies and their capital costs”* Atti dei seminari RICICLA, Rimini 21-24 ottobre 1999, p. 72
- (4) Bonomi A. 2001 *“Selezione di tecnologie appropriate per lo smaltimento dei rifiuti urbani”* Atti dei seminari RICICLA, Rimini 26-29 settembre 2001, p. 447
- (5) ECODECO, Giugno 2000 *“Progetto Ecoenergia: aspetti progettuali, compatibilità territoriale e valutazione socio-economica dell'impianto di Cortelona”*