

## Criteri energetici per la valutazione di diverse soluzioni tecnologiche e operative adottate nelle miniacciaierie\*

A. Borroni, B. Mazza, G. Nano,  
D. Sinigaglia  
Dip. di Chim. Fis. Appl.  
Gruppo Studi Sistemi Prod. e  
Lav. - Politecnico di Milano  
C.M. Joppolo  
CESNEF - Ist. Ing. Nucleare -  
Politecnico di Milano

*Viene svolta un'analisi degli input diretti e indiretti di energia nella produzione di acciaio al forno elettrico. Il modello sviluppato fornisce un quadro coerente di riferimento per paragonare diverse soluzioni tecnologiche. Sono analizzate le seguenti varianti, particolarmente significative, utilizzando dati operativi ricavati da impianti industriali:*

- 1) forni elettrici funzionanti in modo convenzionale;
- 2) forni elettrici nei quali sono impiegati bruciatori ossi-combustibile come sorgente integrativa di calore durante la fase di fusione;
- 3) forni elettrici nei quali il rottame è caricato in continuo dopo essere stato preriscaldato in forno separato (processo BBC-Brusa).

*Viene proposta una valutazione, sulla base di criteri multifattoriali, dell'impatto energetico dei diversi metodi di operazione del forno elettrico sopra considerati.*

Nel 1979 in Italia per la produzione di acciaio grezzo al forno elettrico si sono consumati circa 8700 GWh, pari al 44,7% dell'energia elettrica consumata nel settore siderurgico (19.395 GWh), la quale a sua volta rappresenta il 20,2% dell'energia elettrica consumata in tutti i settori industriali (96.125 GWh) e il 12,1% del consumo totale nazionale di energia elettrica (160.012 GWh). In effetti la situazione dell'industria siderurgica italiana è tutt'affatto particolare nell'ambito dei paesi industrializzati ed è caratterizzata dal rilevante sviluppo assunto dalle cosiddette miniacciaierie, per cui il

\* Memoria presentata ad ICEUM-III (The third international conference on energy use management), Berlin, October 1981, e pubblicata in inglese nel volume: R.A. Fazzolare, C.B. Smith, Eds.: Beyond the energy crisis, opportunity and challenge, Pergamon Press, Oxford, 1981, pp. 1061-1070. Si ringrazia per l'autorizzazione concessa alla ristampa. La traduzione è stata curata dagli autori.

processo di fabbricazione di acciaio al forno elettrico a partire da rottame concorre ormai a più della metà della produzione totale. Ad es. nel 1979 si è avuta la seguente ripartizione per processi di fabbricazione: su un totale di 24,25 milioni di t di acciaio, 12,9 milioni di t, pari al 53,3% sono state prodotte al forno elettrico e 10,2 milioni di t, pari al 42,0%, mediante affinazione al convertitore a ossigeno della ghisa prodotta negli altiforni, il rimanente 4,7% essendo acciaio prodotto al forno Martin-Siemens. (A titolo di confronto le aliquote di produzione di acciaio elettrico sono state nel 1979 del 34,2% in Gran Bretagna, del 24,6% negli USA, del 23,6% in Giappone, del 15,3% in Francia, del 14,0% nella Germania RF). Da queste cifre risultano evidenti da un lato la grande importanza di attuare misure per il risparmio e/o la sostituzione di energia elettrica nel processo di produzione di acciaio al forno elettrico e dall'altro lato la necessità di disporre di corrette metodologie di analisi energetica e di non ambigui criteri di valutazione.

### 1. Metodologia di analisi energetica

In questo studio viene preliminarmente presentato un modello di analisi energetica di processo\*. Tale modello intende fornire un coerente schema di riferimento per la valutazione di provvedimenti di conservazione dell'energia e per la decisione in merito a soluzioni tecnologiche alternative.

In generale, in un'analisi energetica di processo si va a ricercare il fabbisogno totale di energia per la produzione di una data quantità di

\* Per una più estesa e dettagliata descrizione del modello di analisi energetica e della sua applicazione pratica alle acciaierie elettriche si rinvia ad uno studio precedente (1) condotto con finalità e in ambiti di applicazione differenti da quelli del presente articolo.

prodotto\*\*, nel nostro caso l'acciaio ottenuto con il processo al forno elettrico. Tale fabbisogno totale di energia è la somma di tutti gli input energetici direttamente o indirettamente richiesti per la produzione di una tonnellata di acciaio (ci si riferisce cioè a tutta l'energia messa in gioco nel sistema produttivo generale e non solo a quella utilizzata nell'impianto di produzione dell'acciaio). Si deve considerare quindi non solo lo stadio finale del processo, nel nostro caso l'acciaieria, ma anche gli stadi precedenti, con lo scopo di identificare l'energia impiegata per la produzione dei vettori energetici, dei materiali di consumo e degli impianti utilizzati nell'acciaieria stessa.

Il processo «a ritroso» che deve essere percorso è riportato in Fig. 1, dove vengono arbitrariamente considerati quattro livelli di regressione per la definizione dei confini del sistema (2).

Si è deciso per questo studio di non considerare gli input energetici oltre il secondo livello di regressione. Saranno quindi mostrati separatamente i risultati ottenuti da un'analisi riferita solo al primo livello, e al primo e secondo livello congiuntamente.

La Fig. 2 mostra lo schema che si è seguito nell'analisi e indica tutti gli input che si è cercato di quantificare. Occorre precisare che non vengono considerati gli oneri energetici per il trasporto, dal momento che sono estremamente difficili da valutare e non sono significativi per il confronto di diverse alternative tecnologiche in impianti già esistenti. Inoltre, non vengono considerati neppure particolari trattamenti preliminari del rottame, come la frantumazione, la frantumazione criogenica, la pressatura, ecc.

\*\* Si prescinde quindi dagli altri fattori di produzione: materie prime non energetiche, lavoro e capitale, i quali possono essere valutati solo con analisi di tipo economico.

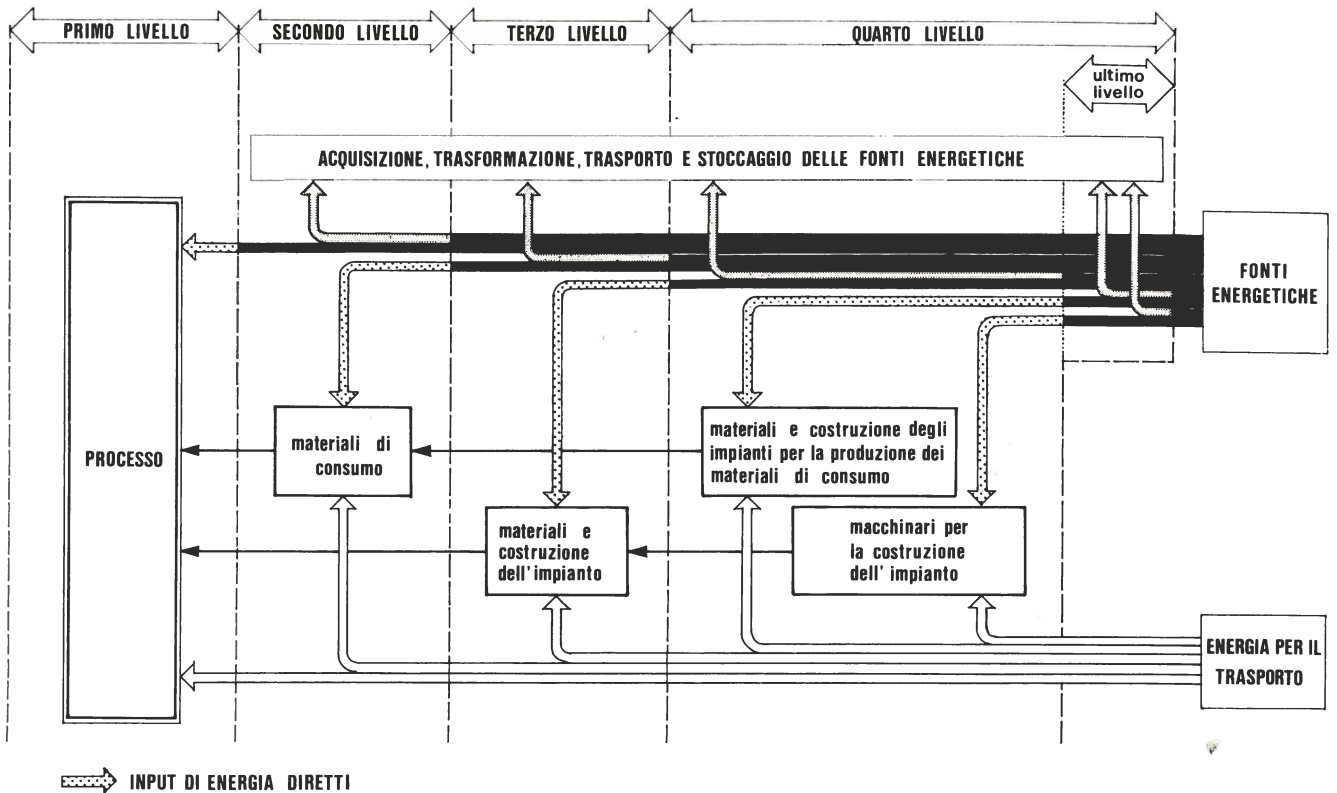


Fig. 1 - Schema di analisi energetica per un generico processo: individuazione degli input e definizione dei possibili confini per il sistema.

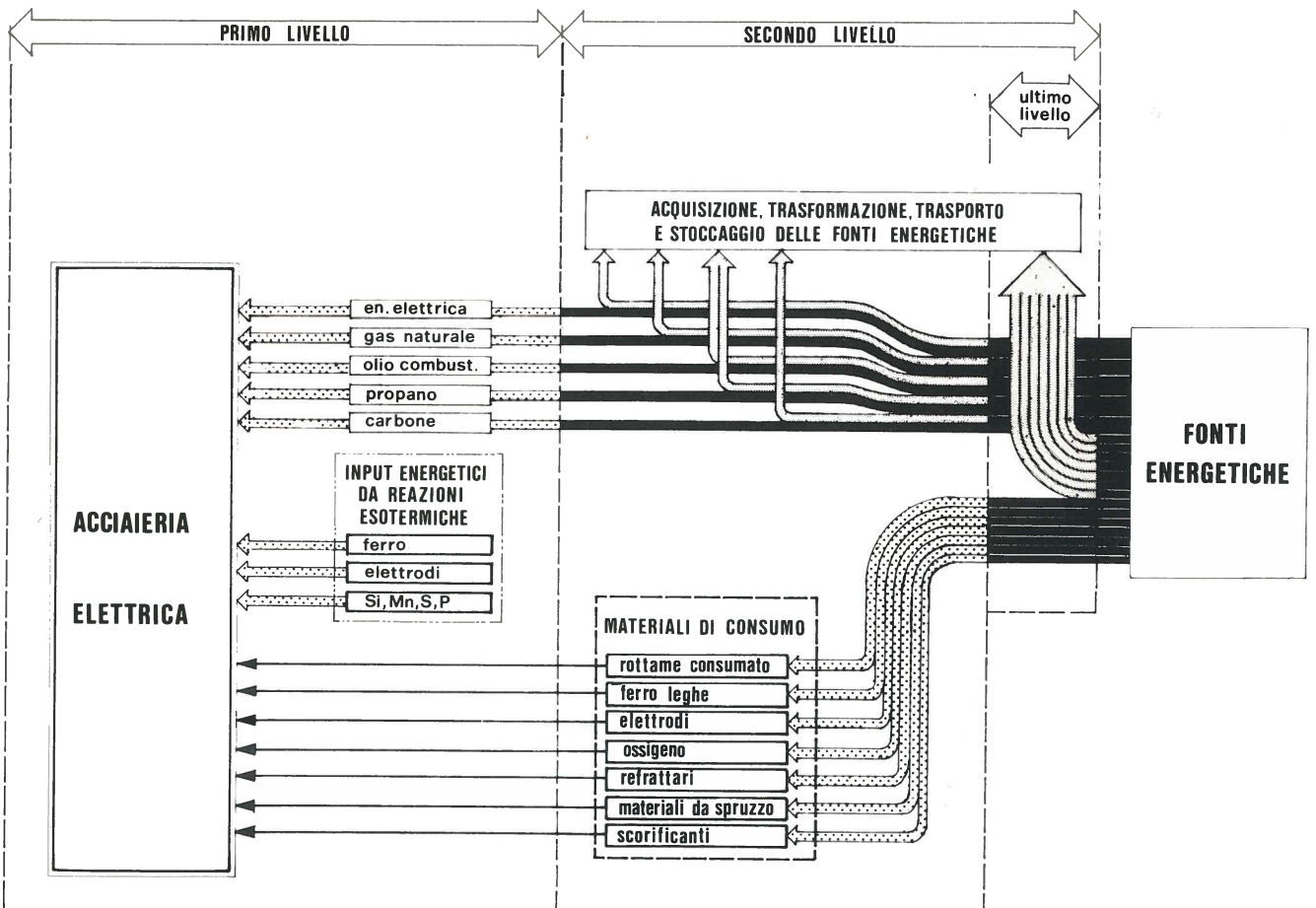


Fig. 2 - Schema dell'analisi energetica di processo applicata alle acciaierie elettriche: definizione dei confini del sistema al primo e secondo livello e individuazione degli input energetici e degli input di materiali di consumo.

## 2. Ipotesi, convenzioni e parametri utilizzati

1) Per la quantificazione degli input energetici diretti, cioè combustibili, energia elettrica, reazioni esotermiche, si sono adottate varie convenzioni dipendentemente dalle risorse energetiche utilizzate. Per i combustibili fossili (fonti energetiche primarie) le quantità consumate sono state convertite in unità di energia utilizzando i poteri calorifici inferiori\*. L'energia elettrica è stata convertita in MJ utilizzando il rapporto di 3,6 MJ/kWh. Infine, per le reazioni esotermiche che avvengono nel forno elettrico si è considerato il valore di  $\Delta H^\circ$  a 1600 °C, ovviamente con riferimento alla quantità di sostanza reagita\*\*.

2) Per quantificare gli input indiretti di energia collegati alla fornitura di quelli diretti, sono state valutate tutte le perdite che si verificano in ogni fase del processo di trasformazione a partire dalle fonti energetiche primarie. Nel caso di input forniti come energia elettrica è necessario distinguere la quota derivante da

centrali idroelettriche da quella derivante da centrali termoelettriche\*\*\*.

3) Per quantificare gli input indiretti di energia correlati al consumo dei materiali, si sono considerati gli input diretti e indiretti di energia nei diversi processi produttivi dei materiali stessi\*\*\*\*. Ovviamente si è poi considerata solamente l'energia richiesta per la produzione della quota di materiale consumato. Speciale attenzione deve essere rivolta all'input di energia relativo al rottame. In questo caso il consumo è dato solamente dalla quantità persa nel processo (in altre parole si è considerata solo l'energia inglobata nella quota di rottame necessaria a coprire la perdita metallica nei forni e i ricicli di acciaieria).

## 3. Analisi energetica applicata ai dati operativi di diverse acciaierie

Per l'analisi energetica sono state scelte tre significative varianti del processo di produzione dell'acciaio al forno elettrico:

1) forni elettrici funzionanti in modo convenzionale (impianto A);

2) forni elettrici nei quali sono impiegati bruciatori ossi-combustibile

\* Olio combustibile 41,06 MJ/kg, gas naturale 34,57 MJ/Nm<sup>3</sup>, propano 91,13 MJ/Nm<sup>3</sup>, carbone (ricarburanti) 30,17 MJ/kg.

\*\* Le principali reazioni di ossidazione considerate sono le seguenti: Fe → FeO (corrispondente alle perdite metalliche nei forni), Si → SiO<sub>2</sub> e Mn → MnO (dal silicio e manganese caricati come ferroleghie). Per la reazione di combustione degli elettrodi l'input di energia è stato preso uguale al potere calorifico del carbone.

\*\*\* Per il sistema di produzione elettrica italiano (con il 27,74% di energia elettrica fornito da centrali idroelettriche e il 72,26% da centrali termoelettriche nel 1979) si è ricavato un coefficiente di conversione fra energia elettrica ed energia primaria di 9,22 MJ/kWh.

\*\*\*\* Gli input diretti di energia per la produzione dei materiali di consumo sono stati assunti come segue: elettrodi 34,7 MJ/kg, ferro-manganese (75% di Mn) 7,2 MJ/kg, ferro-silicio (75% di Si) 34,9 MJ/kg, ferro-silicio-manganese (20% di Si, 70% di Mn) 14,6 MJ/kg, ossigeno 6,5 MJ/Nm<sup>3</sup>, calce 4,9 MJ/kg, rivestimento dei forni e delle siviere 9,9 MJ/kg, cementi e materiali da spruzzo 4,1 MJ/kg, pannelli delle paniere 5,2 MJ/kg, rottame 3,2 MJ/kg.

TABELLA I - Principali caratteristiche impiantistiche e operative delle miniacciaierie analizzate.

Descrizione	Forno HP	Forno HP con bruciatori ausiliari ossi-combustibile		Forno HP con forno di preriscaldamento del rottame (processo BBC-Brusa)
	A	Olio combustibile B	Gas naturale C	D
<i>Forno di preriscaldamento</i>				
Caratteristiche	—	—	—	vedi nota*
Numero bruciatori e potenza (MW)	—	—	—	20 × 2
Combustibile	—	—	—	gas naturale
Temperatura di preriscaldamento (°C)	—	—	—	1200
Produttività (t/h)	—	—	—	80
<i>Forno elettrico ad arco</i>				
Caratteristiche	vedi nota**	vedi nota**	vedi nota**	vedi nota***
Numero e capacità (t)	2 × 50	3 × 33	1 × 50	2 × 100
Potenza elettrica nominale (MVA)****	15	12	15	30
Potenza elettrica specifica (MVA/t)	0,30	0,36	0,30	0,30
Numero bruciatori ausiliari e potenza (MW)	—	2 × 2	2 × 2	—
Tempo di funzionamento dei bruciatori ausiliari (min)	—	30 ÷ 45	45 ÷ 60	—
Temperatura di spillatura (°C)	1665	1665	1665	1715
Tempo tap-to-tap (h e min)	3 e 10	2 e 20	3 e 10	3 e 30
Produttività (t/h)	15,8	14,2	15,8	27,4
Produttività (tutti i forni) (t/h)	31,6	42,6	15,8	54,8
<i>Colata continua</i>				
Numero macchine e linee	2 × 3	2 × 3	1 × 4	2 × 3
Dimensione del semiprodotto (billetta quadra) (mm)	115	115	90 ÷ 130	160
<i>Prodotto</i>				
	Tondo per cemento armato	tondo per c.a. vergella	tondo per c.a.	ferri a L e U, travi HE e IPE

\* Forno a suola mobile; funzionamento continuo; recupero di calore dai fumi con preriscaldamento dell'aria di combustione.

\*\* Forno di tipo convenzionale; estrazione dei fumi attraverso quarto foro nella volta; senza recupero di calore.

\*\*\* Forno rotante intorno al suo asse verticale, con volta fissa; caricamento continuo del rottame preriscaldato ed estrazione dei fumi entrambi attraverso quarto foro nella volta; recupero di calore dai fumi con preriscaldamento dell'aria di combustione che alimenta il forno di preriscaldamento del rottame.

\*\*\*\* Sovraccarico consentito 20%.

come sorgente integrativa di calore durante la fase di fusione (impianti B e C)\*;

3) forni elettrici nei quali il rottame è caricato in continuo dopo essere stato preriscaldato in forno separato (processo BBC-Brusa (3), impianto D)\*\*.

La seconda variante è stata conside-

\* Questo caso include due diversi impianti, che utilizzano bruciatori alimentati rispettivamente ad olio combustibile (B) e a gas naturale (C).

\*\* Poiché questo caso presenta rilevanti differenze impiantistiche rispetto agli altri, l'analisi dovrebbe essere più correttamente estesa al terzo livello di Fig. 1, includendo anche gli input diretti di energia relativi ai materiali e alla costruzione dell'impianto. Tuttavia, l'errore che si commette arrestando l'analisi energetica al secondo livello non altera sostanzialmente le conclusioni dello studio.

rata allo scopo di valutare la convenienza di integrare l'energia elettrica con quella ottenuta da altre fonti, in impianti già esistenti. La terza variante è stata scelta perché rappresenta una diversa tendenza nell'evoluzione impiantistica, realizzabile nella costruzione di nuove unità, che tiene conto delle problematiche energetiche già in fase di progetto.

La Tabella I illustra le principali caratteristiche delle acciaierie A, B, C e D.

Al di là delle differenze operative, impiantistiche e di scala, le alternative considerate sono tra loro confrontabili, oltre che per il tipo di materia prima impiegata (100% rottame) e di acciaio prodotto (acciaio al carbonio di base per prodotti lunghi), anche per quanto attiene ai va-

lori di potenza elettrica specifica e di produttività dei forni, valori che cadono nel campo dei forni HP\*\*\*. D'altra parte, le diversità impiantistiche e operative presenti nella terza variante (processo BBC-Brusa) si riferiscono al solo modulo di fusione, mentre tutto il resto dell'acciaie-

\*\*\* Comunemente viene fatta la seguente distinzione fra forni HP e UHP:

— forni HP (High Power): potenza elettrica specifica  $0,25 \div 0,35$  MVA/t, produttività  $15 \div 20$  t/h (incrementabile a un massimo di circa 30 t/h con l'uso di bruciatori ausiliari);

— forni UHP (Ultra High Power): potenza elettrica specifica  $0,45 \div 0,55$  MVA/t, produttività circa 40 t/h (incrementabile a più di 50 t/h con l'uso di bruciatori ausiliari).

Si noti tuttavia che i forni esaminati in questo studio sarebbero più correttamente da considerarsi come MP (Medium Power:  $200 \div 400$  kVA/t) alla luce della recentissima classificazione proposta dall'International Iron and Steel Institute (4).

TABELLA II - Consumi per tonnellata di billetta.

Consumi	Forno HP con bruciatori ausiliari			Forno MP con forno di preriscaldamento del rottame (processo BBC-Brusa)
	A	B	C	D
Energia elettrica (kWh)	682	575	637	530
Energia elettrica per i forni elettrici (kWh)	627	528	587	450*
Energia elettrica per i servizi (kWh)	55	47	50	80
<i>Combustibili</i>				
Olio combustibile (kg)	0,1	3,4	—	—
Gas naturale (Nm <sup>3</sup> )	—	—	6,6	44,8
Propano (kg)	0,2	0,2	—	—
Ricarburanti (carbone) (kg)	1,1	0,7	0,4	5**
Elettrodi (kg)	6,5	4,6	5,3	5,5
<i>Ferroleghie</i>				
Fe-Mn al 75% (kg)	12	14	12	—
Fe-Si al 75% (kg)	6	7	6	3
Fe-Si-Mn (20% di Si, 70% di Mn) (kg)	—	—	—	12
Ossigeno (Nm <sup>3</sup> )	0,5	11,5	10	6**
<i>Scorificanti</i>				
Calce (kg)	35	40	37,5	20
Calcarea (kg)	8	3	5,5	40
Fluorite (kg)	2,5	2,5	2,5	—
<i>Refrattari</i>				
Rivestimento forni (kg)	8	10	10	12***
Dolomite (kg)	13	15	15	3,8
Materiali da spruzzo (kg)	2,5	2,5	2,5	—
Cementi e altri (kg)	4,5	4,5	4,5	4
Rivestimento siviere (kg)	6	7	6	4,5
Pannelli paniero (kg)	4	4	3	2,4
Rottame consumato**** (kg)	116	116	116	63
Rottame caricato (messa a mille)*****	1163	1163	1163	1111

\* Occorre rilevare che tale valore include una quota di circa 35 kWh/t dovuta alla più elevata temperatura di spillatura (1715 invece di 1665 °C, vedi Tabella I).

\*\* I prodotti di questa acciaieria (vedi Tabella I) richiedono una fase di affinazione durante la quale l'acciaio è prima completamente decarburato con un elevato consumo di ossigeno, e poi ricarburato.

\*\*\* Incluso il forno di preriscaldamento del rottame.

\*\*\*\* Perdita metallica nei forni e ricicli di acciaieria.

\*\*\*\*\* Inclusi gli inerti.

ria (colata continua, servizi, ecc.) è strutturalmente identico rispetto alle altre due varianti.

La Tabella II riporta, per le quattro acciaierie in esame, i consumi rilevati di energia e materiali per tonnellata di billetta prodotta. Per gli impianti A, B e C i dati si riferiscono a un periodo di normale produzione di un anno (1979); per l'impianto D (che utilizza il processo BBC-Brusa) ci si riferisce a un periodo di avviamento (nel 1979) della durata di due mesi.

La Tabella III mostra i risultati dell'analisi energetica in termini di consumi di energia per tonnellata di billetta, al primo e secondo livello.

#### 4. Individuazione in base a criteri energetici multifattoriali dell'alternativa preferibile

Dopo aver presentato i risultati ottenuti applicando l'analisi energetica ai quattro impianti considerati, si intende ora affrontare il problema della valutazione delle diverse soluzioni tecnologiche e impiantistiche e della eventuale scelta di una alternativa preferibile.

Con un'ottica energetica limitata alla considerazione dello stadio finale del processo (nel nostro caso l'acciaieria), un eventuale decisore è portato a stabilire una graduatoria in base ai valori degli input energeti-

ci diretti (primo livello). In tal caso la graduatoria, come può essere visto in Tabella III, sarebbe la seguente: B, C, A, D. Alcune considerazioni vanno però fatte:

1) l'input energetico diretto richiesto dall'impianto «meno efficiente» (D) è del 44,5% superiore a quello del «più efficiente» (B): l'impianto B apparirebbe di gran lunga il migliore;

2) gli input energetici diretti richiesti dagli impianti A e C sono pressoché identici (l'impianto A richiede lo 0,16% in più rispetto al C): pertanto sarebbe indifferente scegliere l'uno o l'altro dei due.

TABELLA III - Fabbisogni energetici per tonnellata di billetta al primo e secondo livello.

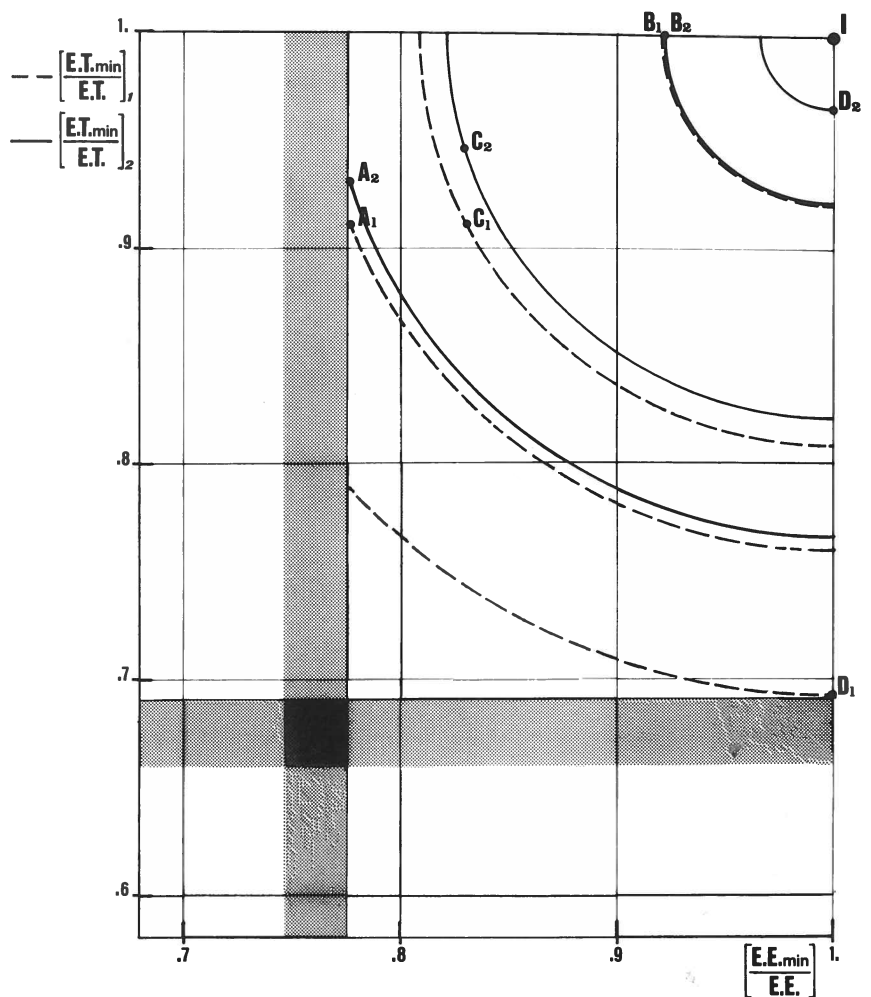
Fabbisogni energetici (MJ)	Forno HP		Forno HP con bruciatori ausiliari	Forno HP con forno di preriscaldamento del rottame (processo BBC-Brusa)
	A	B	Olio combustibile	D
<b>INPUT ENERGETICI DIRETTI</b>				
<i>Energia elettrica e combustibili</i>	2501	2240	2534	3608
Energia elettrica	2453	2069	2294	1908
Olio combustibile	4	140	—	—
Gas naturale	—	—	227	1549
Propano	10	10	—	—
Carbone	34	21	13	151
<i>Reazioni esotermiche</i>	680	656	642	578
Ferro	273	273	273	202
Elettrodi	197	138	159	166
Altre	210	245	210	210
<b>TOTALE AL PRIMO LIVELLO</b>	<b>3181</b>	<b>2896</b>	<b>3176</b>	<b>4186</b>
<b>INPUT ENERGETICI INDIRETTI</b>				
<i>Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche utilizzate nello stadio finale del processo</i>	3831	3242	3585	3017
Energia elettrica	3827	3228	3579	2976
Distillati del petrolio	1	12	—	—
Gas naturale	—	—	5	28
Carbone	3	2	1	13
<i>Input energetici diretti per la produzione dei materiali di consumo</i>	1260	1366	1302	1005
Rottame consumato	370	372	370	201
Elettrodi	227	159	183	191
Ferroleghie	296	345	296	280
Ossigeno	3	75	65	39
Scorificanti	172	196	184	102
Refrattari	192	219	204	192
<i>Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche utilizzate per la produzione dei materiali di consumo</i>	1271	1398	1326	1009
Rottame consumato	550	553	550	299
Elettrodi	227	159	183	191
Ferroleghie	431	503	431	408
Ossigeno	5	117	101	61
Scorificanti	19	22	20	11
Refrattari	39	44	41	39
<b>TOTALE AL SECONDO LIVELLO</b>	<b>6362</b>	<b>6006</b>	<b>6213</b>	<b>5031</b>
<b>TOTALE PRIMO E SECONDO LIVELLO</b>	<b>9543</b>	<b>8902</b>	<b>9389</b>	<b>9217</b>

Sempre in un'ottica esclusivamente energetica, ma che tenga conto anche degli input energetici indiretti (ad es. un decisore che abbia il compito di amministrare le risorse energetiche di una regione), la graduatoria che verrebbe stabilita sarebbe la seguente: B, D, C, A. È però importante mettere in rilievo che:

- 1) l'input energetico richiesto dall'impianto «meno efficiente» (A in questo nuovo ordine) è solamente del 7,2% superiore a quello del «più efficiente» (B): la minore differenza nei fabbisogni energetici totali mostra che un vantaggio per quanto riguarda gli input diretti viene in certa misura penalizzato da svantaggi negli input indiretti;
- 2) l'impianto D, fortemente penalizzato al primo livello, ha un input energetico che supera quello dell'impianto B solamente del 3,5%;
- 3) gli impianti A e C, in base a quest'ottica energetica più estesa, non appaiono più alla pari (il fabbisogno di A è dell'1,6% superiore a quello di C).

D'altra parte, anche restando in un'ottica esclusivamente energetica, nella situazione produttiva esistente il criterio del solo fabbisogno energetico totale potrebbe non essere sufficiente per la valutazione delle diverse soluzioni tecnologiche. In particolare sembra necessario utilizzare come criterio di scelta non solo il fabbisogno energetico totale, ma anche la frazione di questo fornita come energia elettrica. Si fa qui riferimento alla distinzione tra usi elettrici obbligati e non: si intende cioè che l'elettricità, essendo fonte particolarmente pregiata, non andrebbe utilizzata per la fornitura di calore, quantomeno a bassa temperatura.

Nella siderurgia elettrica la fornitura di calore avviene in un intervallo di temperatura molto ampio, tra temperatura ambiente e anche oltre 1700 °C: ha pertanto particolare interesse teorico determinare, in funzione di vari campi parziali di temperatura, il mix più idoneo di vettori e sorgenti energetiche da utilizzare. Inoltre, limitare il consumo di energia elettrica ha molto interesse anche da un punto di vista pratico, per i vincoli nella disponibilità che riguardano la fonte elettrica sia sotto l'aspetto dell'energia consumata



Alternativa	Spazio di preferenza 1 ---			Spazio di preferenza 2 —		
	Parametri di merito		Distanza d dall'alternativa ideale (I)	Parametri di merito		Distanza d dall'alternativa ideale (I)
$x = \left[ \frac{E.E. \cdot \min}{E.E.} \right]$	$y = \left[ \frac{E.T. \cdot \min}{E.T.} \right]$			$x = \left[ \frac{E.E. \cdot \min}{E.E.} \right]$	$y = \left[ \frac{E.T. \cdot \min}{E.T.} \right]$	
A	0,778	0,910	0,240	0,778	0,933	0,232
B	0,922	1	0,078	0,922	1	0,078
C	0,832	0,912	0,190	0,832	0,948	0,176
D	1	0,692	0,308	1	0,966	0,034
I	1	1	0	1	1	0

Fig. 3 - Spazio di preferenza: identificazione dell'alternativa preferibile in base a criteri energetici multifattoriali. E.E. = fabbisogno di energia elettrica (sempre considerato al primo livello); (E.T.)<sub>1</sub> = fabbisogno totale di energia al primo livello; (E.T.)<sub>2</sub> = fabbisogno totale di energia considerando congiuntamente primo e secondo livello; min = minimo. L'alternativa ideale (I) è definita assumendo i migliori valori di entrambi i parametri di merito x e y nell'ambito delle alternative confrontate.

(tali vincoli sono oggi molto stringenti in Italia, in particolare nelle zone in cui è concentrata la maggior parte delle miniacciaierie), sia sotto l'aspetto della potenza installata (da cui l'uso dei bruciatori ausiliari in fase di fusione come mezzo per li-

vellare il diagramma di carico elettrico). Assumiamo pertanto che il nostro ipotetico decisore persegua obiettivi energetici multipli o applichi criteri energetici multifattoriali, cioè criteri fondati su più variabili energeti-

che (nel nostro caso il fabbisogno energetico totale e il consumo di energia elettrica). In questo modo emerge un conflitto e può essere trovato un compromesso, cioè si può individuare l'alternativa preferibile. (Occorre rilevare che non c'è conflitto di fondo fra i singoli obiettivi multipli, ma piuttosto fra questi considerati nel loro insieme e i limiti tecnologici, economici, sociali ed altri, che non consentono il pieno e simultaneo raggiungimento degli obiettivi stessi).

Per quanto riguarda la metodologia di applicazione dei criteri multifattoriali si è fatto riferimento a un lavoro fondamentale di Zeleny (5).

Si consideri lo spazio di preferenza in Fig. 3. Sull'asse x viene riportato il rapporto tra il consumo di energia elettrica minimo riscontrato nei quattro impianti e il consumo di energia elettrica del generico impianto:  $E.E._{min}/E.E.$ . Sull'asse y sono contemporaneamente riportati i rapporti tra fabbisogno energetico totale minimo e fabbisogno energetico totale del generico impianto ottenuti considerando sia il primo livello da solo, che il primo e il secon-

do livello congiuntamente:  $(E.T._{min}/E.T.)_1$  ed  $(E.T._{min}/E.T.)_2$ . Su ciascun asse viene poi considerato il miglior valore assunto dal corrispondente parametro di merito nell'ambito delle alternative allo studio: l'insieme di essi forma l'alternativa ideale I. Da tale definizione di I scende che il decisore preferirà l'alternativa più vicina all'ideale. In altre parole l'ordine di preferenza è stabilito dalla distanza  $d = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]^{1/2}$  della generica alternativa da quella ideale.

Con il criterio di scelta adottato e considerando, oltre alla frazione elettrica, i fabbisogni energetici totali al primo livello soltanto, dalla Fig. 3 si vede che l'ordine di preferenza è: B, C, A, D. Ben diverse sono le conclusioni se oltre al fabbisogno di energia elettrica (sempre al primo livello), si considerano i fabbisogni energetici totali sommando primo e secondo livello. In questo caso diventa favorita l'acciaieria D, che passa dal quarto al primo posto, mentre sostanzialmente identiche restano le reciproche posizioni delle altre tre acciaierie. In effetti, mentre per l'acciaieria D siamo in

presenza di interventi impiantistici tesi alla sostituzione dell'energia elettrica, negli altri casi si tratta di adeguamenti impiantistici volti ad integrare l'energia elettrica con quella ottenuta da altre fonti.

*I dati operativi degli impianti A, B, C sono stati forniti da G. Fantinelli, quelli dell'impianto D da U. Brusa. Al finanziamento della ricerca ha contribuito il Comune di Sesto S. Giovanni (Convenzione con il Politecnico di Milano del 2/3/1981).*

### Bibliografia

1. A. BORRONI, C.M. JOPPOLO, B. MAZZA, G. NANO, D. SINIGAGLIA: *La Metallurgia Italiana*, 73, 251-263 (1981).
2. T.V. LONG, Ed.: Energy analysis and economics, IFIAS workshop report, *Resources and Energy*, 1, 151-204 (1978).
3. U. BRUSA: *La Metallurgia Italiana*, 69, 1-3 (1977).
4. International Iron and Steel Institute, *The electric arc furnace*, IISI, Brussels, 1981.
5. M.K. STARR, M. ZELENY, Eds.: *Multiple criteria decision making, TIMS studies in the management sciences*, Vol. 6, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1977, pp. 147-157.