

Analisi energetica del processo produttivo delle acciaierie elettriche e applicazione a cinque impianti lombardi *

*Energy analysis of electric arc furnace
steelmaking process and practical application
to five plants located in Lombardy **

A. Borroni *, C.M. Joppolo **, B. Mazza *, G. Nano *, D. Sinigaglia *

* Istituto di Chimica Fisica, Elettrochimica e Metallurgia - Politecnico di Milano

** CESNEF - Istituto di Ingegneria Nucleare - Politecnico di Milano

L'uso diretto ed indiretto di energia nel processo produttivo delle acciaierie elettriche viene valutato applicando tecniche di analisi energetica di processo a cinque impianti lombardi (miniacciaierie caricate a rottame, con colata continua, per la produzione di acciai al carbonio per tondo e vergella).

Preliminarmente viene affrontato il problema metodologico e viene presentato un modello di analisi energetica. Con tale modello ci si propone di predisporre un quadro coerente di riferimento che consenta valutazioni dell'impatto di provvedimenti di conservazione dell'energia nonché confronti tra soluzioni tecnologiche ed impiantistiche adottate in ciascuno degli impianti sottoposti ad analisi.

Per i cinque impianti, a partire dai dati di esercizio relativi ad un periodo di tredici mesi, sono stati individuati gli input energetici diretti (energia elettrica e combustibile) e quelli indiretti (energia necessaria per la produzione dei materiali consumati nel processo e per la fornitura dell'energia diretta consumata).

Vengono infine presentati a titolo di esempio alcuni confronti (aziende con o senza bruciatore, con bruciatore ossi-metano o con bruciatore ossi-nafta, con consumo di ossigeno elevato o modesto). Si evidenzia in tal modo come una corretta individuazione anche degli input energetici indiretti sia indispensabile per valutare in modo significativo l'impatto energetico di diverse soluzioni tecnologiche.

The direct and indirect energy utilized in the electric steel production is evaluated applying energy analysis process techniques to five plants in Lombardy (scrap-based mini-mills, with continuous casting for the production of round bar and wire rod carbon steel).

First the methodological problem is analysed and an energy analysis model is presented. The aim is to provide a coherent reference framework that allows evaluations of the impact of energy conservation measures, as well as comparison between different technology and plant options taken in each of the mini-mills under analysis.

The direct energy inputs (i.e. electricity and fuels) and the indirect ones (i.e. energy required to produce the materials used in the process and to provide the direct energy) have been pointed out for each of the five plants, starting from the operating data concerning a period of thirteen months.

Finally some comparisons (plants with or without auxiliary burners, with oxy-methane or oxy-oil burners, with high or low oxygen consumption) are shown as examples. It then becomes evident that the indirect energy inputs must also be considered in order to correctly evaluate the energetic impact of different technology options.

1. Premessa

Nella ottimizzazione dei processi industriali sempre più importanza riveste una corretta utilizzazione di una risorsa limitata quale è l'energia. Gli aumenti di costo e anche talune difficoltà negli approvvigionamen-

1. Introduction

A correct utilization of a limited resource like energy is more and more important in the industrial process optimization. The growing costs and also some supply constraints induced many operators to carry out

* Memoria presentata alla giornata di studio AIM-CEI sulla razionalizzazione dei consumi energetici nella acciaieria elettrica, Milano, 18 febbraio 1981.

* Paper presented at the AIM-CEI study day about energy consumption rationalization in electric steel plants, Milan, February 18th, 1981.

ti hanno fatto sì che da più parti, anche con riferimento al settore siderurgico, si proponessero analisi ed interventi (1, 2, 3).

In particolare in questo studio si intende affrontare un'analisi energetica della produzione delle acciaierie elettriche. Obiettivo è quello di fornire un quadro coerente che consenta valutazioni di provvedimenti di risparmio energetico, di interventi di sostituzione tra fonti di energia, di soluzioni tecnologiche e di prassi operative.

Per l'applicazione dell'analisi energetica si è scelto, all'interno di un comparto particolarmente significativo e sufficientemente omogeneo quale è quello delle acciaierie elettriche lombarde, un campione costituito da cinque impianti (miniacciaierie caricate a rottame, con colata continua, per la produzione di acciai al carbonio per tondo e vergella).

Si tenga presente che in Italia nel 1979 il 53% della produzione siderurgica è stato coperto da acciaierie elettriche con una potenza totale dei forni pari a 3792 MVA e che in Lombardia viene prodotto oltre il 50% dell'acciaio elettrico nazionale con un consumo di sola elettricità di circa 7000 GWh.

2. Obiettivi e fondamenti dell'analisi energetica

Obiettivo di questo studio è la messa a punto di un modello per la valutazione del costo energetico di produzione dell'acciaio in acciaierie elettriche. Con tale modello ci si propone di predisporre un quadro coerente di riferimento che consenta valutazioni dell'impatto (ed eventualmente di priorità) di provvedimenti di conservazione dell'energia nonché confronti tra soluzioni tecnologiche e impiantistiche diverse adottate in ciascuno degli impianti sottoposti ad analisi.

Si intende cioè applicare l'analisi energetica per la valutazione dei flussi di risorse nei processi produttivi utilizzando unità di misura fisiche (e non economiche). In generale, obiettivo dell'analisi energetica è quello di fornire informazioni utilizzabili nella allocazione di una risorsa limitata (quale è l'energia). Tuttavia il fatto che nel processo produttivo entrino, come altri indispensabili input primari, lavoro, materie prime (non energetiche) e capitale, implica che l'analisi energetica non può (e non deve) sostituire l'analisi economica. Va inoltre chiarito che nell'utilizzare l'analisi energetica è necessario scegliere tecniche appropriate agli obiettivi che ci si propone e porre in modo esplicito le ipotesi semplificative che si adottano, giustificandone la validità nell'ambito degli scopi della ricerca.

L'analisi energetica per quanto riguarda un generico processo produttivo, in particolare quindi quello siderurgico, può essere condotta a due livelli di aggregazione. Primo, si può scegliere di analizzare in dettaglio un singolo processo, così come è realizzato in un insediamento produttivo, individuando in modo quantitativo i flussi di energia e di materiali utilizzati. Secondo, si può optare per un'analisi del consumo energetico per la produzione di acciaio su larga scala (regionale, nazionale), utilizzando dati statistici e individuando le molteplici relazioni tra i diversi comparti produttivi.

In un'analisi del primo tipo vanno applicate tecniche

analyses and to suggest conservation measures, even in the iron and steel field (1, 2, 3).

In particular this paper introduces an energy analysis of the production process in electric steel plants. The purpose is to provide a coherent framework which can allow evaluations of energy saving actions, energy sources substitutions, technology options and operation methods.

For the application of the energy analysis, a sample of five plants (scrap-based mini-mills, with continuous casting, for the production of round bar and wire rod carbon steel) was chosen. This sample is sufficiently homogeneous and meaningful to draw some conclusions.

It must be noticed that in Italy in 1979 the 53% of the steel production was covered by electric steel plants with a total furnaces power of 3792 MVA and that more than 50% of the national electric steel is produced in Lombardy, with an electric energy consumption of about 7000 GWh.

2. Aims and guidelines of energy analysis

Aim of this paper is to set up a model for the energy analysis in steel production in electric arc furnace plants.

This model is intended to provide a coherent reference framework which can allow evaluations of the impact (and possibly of priority) of energy conservation measures as well as comparisons between different technology and plant options.

The energy flows in the production processes will be evaluated using physical units (and not economic ones).

In general, energy analysis is an attempt to supply informations useful in the allocation of a limited resource (like energy).

However, in the production process other essential primary inputs as labor, (non-energy) raw materials and capital are present; therefore energy analysis cannot (and must not) substitute economic analysis. Moreover it is necessary to choose techniques suitable to the proposed purposes, clearly define the hypotheses adopted and check their validity.

Energy analysis in a generic production process, in particular in the iron-steel one, can be applied at two aggregation levels. First, a single process can be analysed in detail, so as it is carried out in a certain factory, quantifying energy and materials flows. Second, an energy analysis can be made on large scale (regional and national scale), using statistical informations and pointing out the various connections among the different productive sectors.

In the first kind of analysis, engineering process evaluation techniques (process analysis) must be applied (4); in the second kind of analysis, statistical techniques and data and input-output matrices are used.

2.1. Process analysis

In this paper only process analysis techniques are applied to five lombard plants. These techniques allow

di valutazione ingegneristica di processo (analisi di processo) (⁴); nel secondo tipo di analisi si utilizzano tecniche e dati statistici e matrici di input-output.

2.1. Analisi di processo

In questo studio vengono applicate esclusivamente tecniche di analisi di processo a cinque impianti lombardi. Tali tecniche consentono di individuare e sommare i costi (input) energetici per la produzione di una quantità unitaria di acciaio.

Si definisce costo energetico di produzione la somma dei costi energetici diretti ed indiretti. I costi energetici diretti sono dovuti ai combustibili e all'energia elettrica (senza tener conto della sua origine) direttamente usati nell'acciaieria.

I costi energetici indiretti sono quelli sostenuti in una qualche parte del sistema produttivo (al di fuori cioè dell'acciaieria) per la produzione di materiali, beni e servizi consumati nell'acciaieria stessa.

Un primo problema va dunque affrontato. Si tratta della definizione del sistema oggetto dello studio e in particolare dell'individuazione in termini rigorosi dei confini che lo separano dall'intero apparato produttivo.

2.2. Definizione dei confini del sistema

In generale si definisce come sistema quella parte dell'universo scelta per lo studio. I confini del sistema separano le attività che interessano lo studio da quelle che si ritiene lo influenzino in misura trascurabile.

E' evidente che con una definizione di questo genere, e in relazione agli obiettivi dello studio, è possibile fissare in modo arbitrario i contorni del sistema partendo dallo stadio finale del processo (l'acciaieria nel nostro caso) e ripercorrendo fino ad un livello opportuno i passaggi che i vari input hanno subito prima di arrivare allo stadio finale.

In Fig. 1 è riportato, per un generico processo produttivo, uno schema (⁴) che evidenzia la regressione percorribile nell'analisi energetica a partire dallo stadio finale. Con riferimento a tale schema vengono introdotti quattro livelli successivi di regressione per la definizione dei confini del sistema.

Il primo livello è quello degli input energetici diretti allo stadio finale del processo. Un'analisi condotta a tale livello comporta la valutazione dei consumi di combustibili e di energia elettrica forniti al processo, ma trascura tutti i costi energetici delle fasi a monte. Il secondo livello comprende gli input energetici necessari per la produzione dei materiali di consumo utilizzati nel processo e per l'acquisizione, la trasformazione, il trasporto e lo stoccaggio dell'energia diretta.

Sebbene nella Fig. 1 per necessità di chiarezza metodologica siano riportati quattro livelli di definizione dei confini, nel nostro studio ci occupiamo solamente dei primi due livelli. Infatti la scelta di fermare l'analisi al primo livello non è opportuna in quanto non consente valutazioni di provvedimenti di sostituzione tra fonti energetiche e non evidenzia le correlazioni

to identify and sum up energy inputs for the production of a unitary quantity of steel.

Let us define the total energy cost (of the product unit) as the sum of direct and indirect energy inputs. The direct energy inputs are the fuels and electricity directly used in the steel plant.

The indirect energy inputs are the ones required in some other part of the productive system (outside the steel plant) for the production of materials, goods and services used in the steel plant.

The first problem to be faced is the definition of the system object of study and in particular the strict definition of the boundaries which divide it from the remaining productive system.

2.2. System boundaries definition

Generally one defines a system as the portion of the universe chosen for study. The system boundaries separate the activities that are related to the question under analysis from those that one believes to have negligible impact in it.

According to such a definition, and in relation to the aims of the study, it is possible to arbitrarily determine the system boundaries starting from the final stage of the process (the steel plant in our case) and then going upstream to the processes that generate the inputs to the final stage, up to an appropriate level. A scheme (⁴) which evidences the possible regression in energy analysis beginning from the final stage in a generic productive process is shown in Fig. 1. In this scheme four levels of regression for the system boundaries definition are introduced.

Level 1 is the level of direct energy inputs to the final stage of the process. An analysis at this level includes the evaluation of fuels and electricity supplied to the process, but neglects the energy requirements for prior steps.

Level 2 includes the energy inputs needed for the production of the materials used in the process and for the acquisition, conversion, transport and storage of direct energy.

Though for methodological reasons in Fig. 1 four boundaries definition levels are shown, through our paper we shall consider only the first two.

In fact it is not correct to stop the analysis at level 1, because it does not provide a basis for evaluations of energy sources substitution measures and does not show the correlations between materials and direct energy consumptions.

On the opposite side, it is not suitable to extend the analysis beyond level 2: in this way, besides the variable energy requirements (running costs), also capital energy requirements (capital costs) would be emphasized. This extension would be very useful when evaluating new plants installations or comparing different processes for the production of the same good.

Anyway, an analysis carried out through level 2 will include a big part (about 90%) of the energy requirement calculated through level 4.

che esistono tra consumi energetici diretti e consumi di materiali.

D'altra parte non è opportuna un'estensione dell'analisi oltre il secondo livello, in quanto in tal modo verrebbero evidenziati, oltre ai costi energetici variabili (connessi cioè con l'esercizio), i costi energetici fissi (necessari per la costruzione ed installazione degli impianti). Tale estensione è quindi utile per decisioni che riguardano l'installazione di nuovi impianti o il confronto di differenti processi per la produzione di uno stesso bene.

In generale comunque un'analisi limitata al secondo livello consente di valutare una grossa parte (solitamente pari a circa il 90%) del costo energetico che si ottiene estendendola al quarto livello.

2.3. Ipotesi e convenzioni adottate

Per la quantificazione degli input energetici vanno introdotte alcune convenzioni.

Primo, per i combustibili fossili (fonti energetiche primarie) alle quantità fisiche consumate viene associato il corrispondente potere calorifico inferiore.

Secondo, per l'energia elettrica consumata va introdotta una distinzione tra energia elettrica primaria (idroelettrica essenzialmente) ed energia elettrica secon-

2.3. Hypotheses and basic conditions

For the energy input evaluation some hypotheses and basic conditions must be introduced.

First: for the fossil fuels (primary energy sources), the physical quantities used will be connected with the corresponding net heat values.

Second: a distinction between primary electric energy (essentially hydroelectric energy) and secondary energy (obtained from fossil fuels) must be made for the used electricity.

At the first level of the energy analysis, electricity inputs are always converted according to the ratio 3.6 MJ/kWh. At level 2, a requirement corresponding to generation and transport losses⁽⁵⁾ must be added to the electricity part derived from hydroelectric sources. Likewise, to the electricity part derived from thermoelectric power plants, the losses due to plant operation, to transport and to the fuel supply to the plant itself will be added.

Thus the energy inputs in an analysis carried out through level 1 are treated in the same way independently from their source. Extending the analysis to level 2, the different losses due to the energy supply to the process are correctly evaluated.

In other words a conversion coefficient between electric energy unit (kWh) and primary energy unit (MJ),

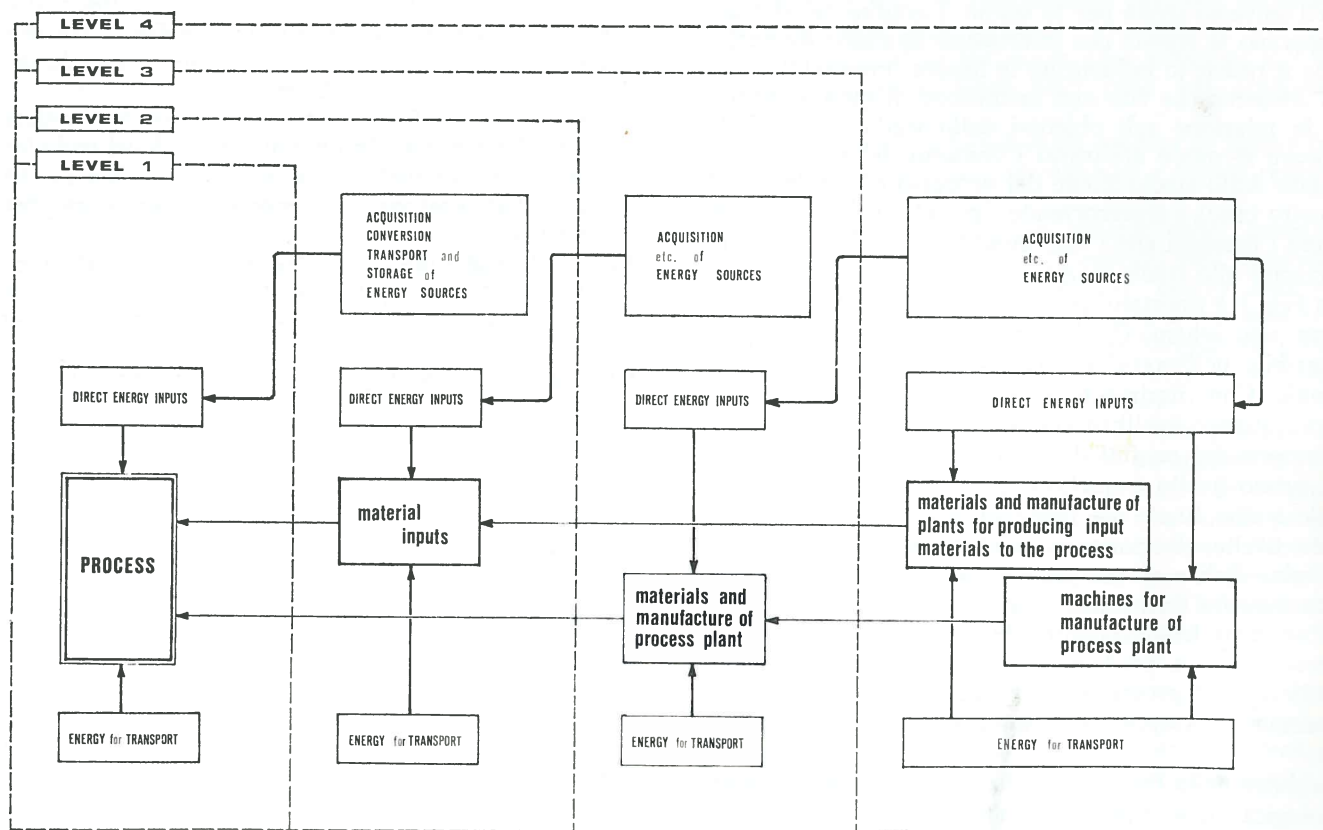


Fig. 1 - Schema di analisi energetica per un generico processo: individuazione degli input e definizione di possibili confini per il sistema.

Fig. 1 - Energy analysis scheme for a generic process: inputs specification and definition of possible system boundaries.

daria (ottenuta in impianti utilizzando combustibili fossili).

Introdotta questa distinzione, al primo livello di analisi energetica i consumi elettrici sono convertiti utilizzando l'eguaglianza $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

Per quanto riguarda invece l'analisi al secondo livello, alla quota di consumi elettrici derivanti da fonte idroelettrica viene associato un consumo corrispondente alla perdita di generazione e a quella di trasporto (⁵), mentre alla quota elettrica derivante da centrali termiche si aggiungeranno le perdite associate al funzionamento della centrale, quelle di trasporto, oltre a quelle dovute alla fornitura del combustibile alla centrale stessa.

In definitiva, i costi energetici ottenuti al primo livello di analisi trattano in modo indifferenziato gli input energetici da qualunque fonte essi provengano. I costi energetici ottenuti estendendo l'analisi al secondo livello permettono invece di considerare anche le perdite connesse con la fornitura di energia al processo. In altre parole viene introdotto (e quantificato) un coefficiente di conversione tra unità di energia elettrica (kWh) e unità di energia primaria (MJ) rappresentativo sia del mix di impianti per la produzione di energia elettrica sia del mix di rendimenti.

Questa ipotesi in particolare differenzia i risultati del nostro studio da quelli di chi ipotizza un coefficiente di conversione che non tiene conto delle perdite nelle diverse fasi e da quelli di chi fa riferimento a energia elettrica completamente prodotta da centrali termiche (sovrastimando in tal modo le perdite reali).

Va però detto che con fini particolari (valutazione di modifiche limitate rispetto alla condizione impiantistica e operativa di base) è talora necessario ragionare in un'« ottica marginale ». Si ipotizza in tal caso che le variazioni (limitate) di consumi elettrici (risparmi o costi aggiuntivi) siano completamente assorbite dalla produzione termoelettrica. Pertanto in un'ottica marginale il coefficiente di conversione da adottare è quello corrispondente alla produzione per via termoelettrica.

Terzo, taluni materiali di consumo danno luogo nel forno elettrico a reazioni sia endotermiche che esotermiche; si assume che gli input energetici derivanti dalle reazioni esotermiche vadano valutati, sommati a quelli derivanti dagli input energetici diretti e inseriti, come questi ultimi, al primo livello di analisi. Si assume invece che le reazioni endotermiche siano inevitabilmente associate al processo, influenzino il suo rendimento, ma non vadano quantificate, in quanto non costituiscono un input di energia ma solamente un utilizzo.

Quarto, si definisce consumo di un generico materiale solamente la quantità persa nel processo. Da tale definizione segue in particolare che nella valutazione dei costi energetici connessi con la fornitura di rottame si computa solamente la quota che è in tal senso « consumata » nel processo, cioè a dire la quantità necessaria a coprire le perdite metalliche e le perdite di acciaieria.

Anche questa ipotesi, come le altre, trova giustificazione negli obiettivi dello studio (e cioè valutazioni tecnologiche tra miniacciaierie tutte alimentate a rottame) e differenzia quindi i risultati ottenuti da quelli

which represents either the mix of electric energy generation stations, or the mix of their efficiencies, is introduced.

This hypothesis makes our results different from the ones obtained by those researchers who for example do not consider the losses in the different steps, or refer to electricity completely produced by thermoelectric plants (thus overvaluing the real losses).

Sometimes, with particular aims different from the ones of this paper (e.g. evaluation of minor changes in the plant and process), it would be necessary to leave the average conversion coefficient and to adopt a « marginal » one. In this case, small electric consumption variations would be considered as completely absorbed by thermoelectric generation.

Third: some materials used in the electric furnace are involved in endothermic or exothermic reactions. We assume that energy inputs from exothermic reactions must be evaluated adding them to the direct energy inputs, at the first level of the analysis.

On the contrary we suppose that endothermic reactions arise as unavoidable by-products of the process (and affect its efficiency), but must not be taken into account, as they are not an energy input, but an energy use.

Fourth: let us define as material consumption only the amount lost in the process. Therefore it follows that in the evaluation of energy inputs connected to the scrap supply, only the part of scrap that it is « consumed » in the process is taken into account. In other words we consider only the energy embodied in the amount of scrap needed to cover metallic and steel plant losses.

Also this assumption arises from the particular aims of this paper (i.e. technological evaluations of all scrap-based mini-mills) and therefore must be kept in mind when comparing our results with the ones obtained by other authors who ascribe an energy content to all the scrap, or on the contrary consider as nil the energy content of this material.

3. Plant and process features of the analysed mini-mills

Plant features of the analysed mini-mills are shown in Table I (⁶). All the plants produce steel of the same quality, i.e. carbon steel for reinforcing bars. Only A and D factories produce also an amount of wire rod steel, which needs a higher amount of ferro-alloys.

The charge is 100% scrap. The steel is melted and refined in the electric arc furnace and then continuously casted. During the melting-down period auxiliary oxy-oil burners are used in steel plant A and oxy-methane burners in steel plant C.

No recovery of the heat content of the exhaust gases from the electric furnaces is carried out in the analysed plants.

Measured consumptions per ton of billet are given in Table II (⁶).

di chi attribuisce a tutto il rottame un costo energetico nullo, oppure un costo energetico a tutto il rottame.

3. Principali caratteristiche impiantistiche e operative delle acciaierie sottoposte ad analisi

L'analisi energetica è stata applicata ai processi di cinque mini-acciaierie, le cui caratteristiche impiantistiche sono riportate in Tabella I⁽⁶⁾. Le billette prodotte hanno caratteristiche omogenee, in quanto si tratta di acciaio al carbonio per la preparazione di tondo per l'edilizia. Solo le aziende A e D producono anche

4. Energy analysis application

Energy analysis was carried out according to the scheme of Fig. 2.

For each of the five steel plants, Table III gives total and partial energy inputs in MJ per ton of billet.

As can be seen, we do not take into account transport energy requirements, either at the first level (i.e. transport of all the materials used in the steelmaking process from their places of production to the steel plant), or at the second level (i.e. transport to the materials production plants of all the raw materials used in the corresponding processes).

TABELLA I - Principali caratteristiche impiantistiche delle acciaierie analizzate⁽⁶⁾.

TABLE I - Plant features of the analysed factories⁽⁶⁾.

Caratteristiche	Azienda				
	A	B	C	D	E
Prodotto	tondo c.a. vergella	tondo c.a.	tondo c.a.	tondo c.a. vergella	tondo c.a.
Numero forni e capacità (t)	3 x 33	2 x 50	1 x 50	2 x 50	1 x 50
Potenza nominale di ogni forno (MVA)	12	15	15	14	15
Brucciatori	si	no	si	no	no
Macchine colata continua x linee	2 x 3	2 x 3	1 x 4	2 x 4	1 x 3
Sezione semiprodotto (mm)	115 □	115 □	90 ÷ 130 □	90 ÷ 160 □	115 □

Altre caratteristiche: sovraccarico consentito per la potenza nominale = 20%. Pannelli raffreddati ad acqua non installati. Sistemi di aspirazione mediante quarto foro analoghi in tutti i forni. $\cos \phi = 0,82 \div 0,90$.

Other features: allowed overload for rated power = 20%.

No water cooled panels. Suction system through a fourth hole in the roof similar in all furnaces. $\cos \phi = 0.82 \div 0.90$.

TABELLA II - Consumi per 1 t di billetta rilevati nel periodo gennaio 1979 - gennaio 1980⁽⁶⁾.

TABLE II - Consumptions per ton of billet measured in the period January 1979 - January 1980⁽⁶⁾.

Consumi	Azienda				
	A	B	C	D	E
Energia elettrica (kWh)	574	681	637	685	715
Metano (Nm ³)	—	—	6,6	—	—
Olio combustibile (kg)	3,4	0,1	—	0,1	0,1
Propano (kg)	0,2	0,2	—	0,2	0,1
Ricarburanti (kg)	0,7	1,1	0,4	4,2	2,2
Elettrodi (kg)	4,6	6,5	5,3	6,7	6,5
Fe-Mn 75 (kg)	14	12	12	14	12
Fe-Si 75 (kg)	7	6	6	7	6
Ossigeno (Nm ³)	11,5	0,5	10	12	9

Nota: per le cinque acciaierie considerate si è assunto un valore medio di messa a mille pari a 1163 rispetto al peso della billetta. I contributi a tale eccedenza, espressi in % in peso rispetto al rottame caricato, sono così ripartiti: spuntature 3%, fondi seccia, ecc. 2% (la somma di questi due contributi costituisce il riciclo interno), perdita metallica (ossidi di ferro nella scoria e nei fumi) 5%, inerte: il complemento al peso caricato. I consumi di refrattari indicano una media di 40 kg/t di billetta suddivisi in: rivestimento forni 5,5 kg, dolomite 14 kg, massa a spruzzo 2,5 kg, rivestimento siviere 6,5 kg, pannelli paniere 3,5 kg, rivestimento volte 3,5 kg, cementi e altri 4,5 kg. I consumi di scorificanti sono così ripartiti: CaO 37,5 kg, calcare 5,5 kg, spatofluore 2,5 kg/t di billetta.

Note: for the five examined steel factories an average scrap to billet ratio equal to 1163:1000 has been taken.

The contributions to this surplus, expressed in weight % of the charged scrap, are so divided: discards 3%, skulls, etc. 2% (the sum of this two contributions is the internal recycle), metallic losses (iron oxide in the slag and in the fumes) 5%, inerts: the complement to the charged weight. The refractory consumptions show an average value of 40 kg/t billet, divided in: furnace lining 5.5 kg, dolomite 14 kg, spray mass 2.5 kg, ladle lining 6.5 kg, tundish panels 3.5 kg, roof lining 3.5 kg, cement and others 4.5 kg. Slag forming material consumptions are so divided: CaO 37.5 kg, limestone 5.5 kg, fluorspar 2.5 kg/t billet.

una quota di acciaio per vergella, che richiede un maggior impiego di ferroleghe.

La carica è costituita integralmente da rottame; l'acciaio, fuso e affinato al forno elettrico, è successivamente colato in continuo. E' da rilevare che, in fase di fusione, nelle acciaierie A e C vengono utilizzati bruciatori alimentati, nella prima, da olio combustibile e, nella seconda, da metano.

Negli impianti presi in esame non viene attuato nessun tipo di recupero del calore degli effluenti.

I consumi rilevati, riferiti alla tonnellata di billetta prodotta, vengono riportati in Tabella II (6).

4. Applicazione dell'analisi energetica

L'analisi energetica è stata eseguita secondo lo schema riportato in Fig. 2. Gli input energetici totali e parziali (per le singole voci), espressi in MJ/ tonnellata di billetta, in ciascuna delle cinque acciaierie sono riportati in Tabella III.

Rispetto a tale schema non viene presa in considerazione l'energia per il trasporto sia di primo livello (trasporto, dal luogo di produzione all'impianto siderurgico, di tutti i materiali impiegati nel processo) che di secondo livello (trasporto ai relativi impianti di produzione di tutte le materie prime utilizzate nei processi).

La valutazione degli oneri energetici per il trasporto è essenziale quando si voglia determinare la più conveniente localizzazione di nuovi impianti, mentre non è significativa per confronti tra diverse soluzioni impiantistiche e operative di acciaierie esistenti. Nel seguito viene comunque fornita una stima (limitata al primo livello), dell'incidenza degli input energetici di trasporto.

4.1. Analisi energetica limitata allo stadio finale del processo (primo livello)

Input energetici diretti da energia elettrica e combustibili

L'energia elettrica consumata viene convertita in MJ (1 kWh = 3,6 MJ).

Le quantità di combustibili utilizzate nel processo vengono convertite in unità di energia utilizzando i seguenti poteri calorifici (p.c.i.): metano 34,57 MJ/Nm³ (8250 kcal/Nm³), olio combustibile 41,06 MJ/kg (9800 kcal/kg), propano 91,13 MJ/Nm³ (21750 kcal/Nm³), carbone 30,17 MJ/kg (7200 kcal/kg) (7). I ricarburanti vengono assimilati a carbone.

Input energetici da reazione esotermiche

Per le diverse reazioni di ossidazione (esclusa la combustione degli elettrodi) che avvengono durante la lavorazione al forno elettrico, i contributi sono assunti pari ai ΔH° di reazione a 1600 °C. Sono state prese in considerazione le reazioni di ossidazione del ferro ($\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}$), del silicio ($\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2$), del manganese ($\text{Mn} \rightarrow \text{MnO}$), dello zolfo ($\text{S} \rightarrow \text{SO}_2$) e del fosforo ($\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$) (8).

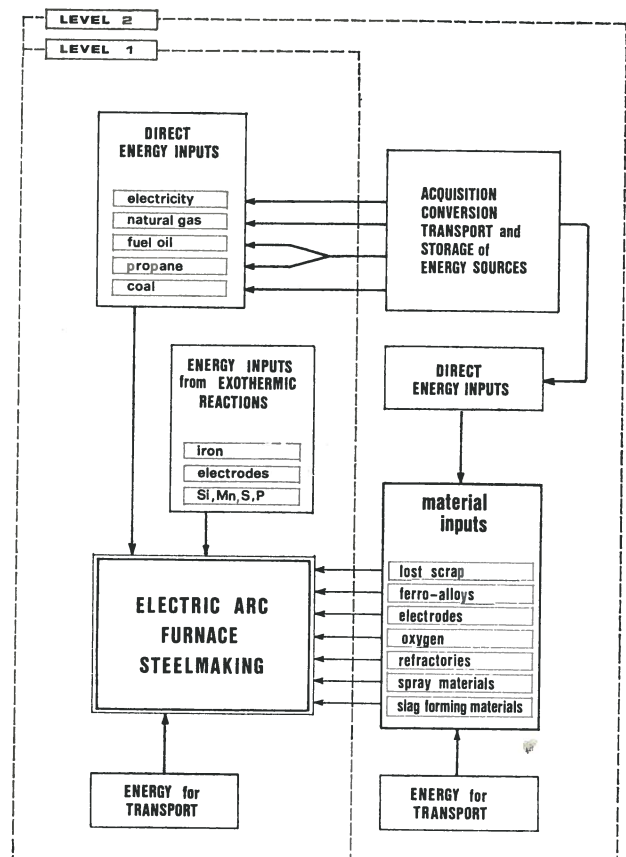


Fig. 2 - Schema dell'analisi energetica di processo applicata alle acciaierie elettriche: definizione dei confini del sistema (primo e secondo livello), degli input energetici e degli input di materiali di consumo.

Fig. 2 - Process energy analysis scheme applied to electric steel plants: definition of system boundaries (level 1 and 2), energy inputs and material inputs.

The transport energy evaluation is essential for the best choice of the localization of new plants, while it is not so important when comparing different technology options and operation methods of existing steel plants. Anyway, a rough estimate (at the first level) of the transport energy incidence will be given.

4.1. Energy analysis stopped at the final process stage (level 1)

Direct energy inputs from electricity and fuels

The electric energy consumed is converted according to the ratio 3.6 MJ/kWh. The amounts of fuels used in the process are converted into energy units using the following net heat values: natural gas 34.57 MJ/Nm³ (8250 kcal/Nm³), fuel oil 41.06 MJ/kg (9800 kcal/kg), propane 91.13 MJ/Nm³ (21750 kcal/Nm³), coal 30.17 MJ/kg (7200 kcal/kg) (7).

The recarburizers are considered as coal.

La quantità di ferro, contenuta nella carica del forno elettrico, ossidata durante il processo di lavorazione è stata assunta pari a una perdita metallica del 5% ⁽¹⁾, corrispondente a 58 kg/t di billetta. La reazione di combustione degli elettrodi viene valutata mediante il potere calorifico del carbone ⁽⁷⁾.

4.2. Analisi energetica estesa ad alcuni input indiretti (secondo livello)

Acquisizione, trasformazione, trasporto e stoccaggio delle fonti energetiche.

Con riferimento alle cinque aziende esaminate, la cui fornitura elettrica è totalmente garantita dall'Enel (non intervenendo contributi di autoproduzione), l'in-

Energy inputs from exothermic reactions

For the different oxidation reactions which occur during electric furnace process, the contributions are taken equal to ΔH° of reaction at 1600 °C. The iron ($Fe \rightarrow FeO$), silicon ($Si \rightarrow SiO_2$), manganese ($Mn \rightarrow MnO$), sulphur ($S \rightarrow SO_2$) and phosphorus ($P \rightarrow P_2O_5$) oxidation reactions are taken into account in this way ⁽⁸⁾.

The iron fraction of the electric furnace charge oxidised during the process has been considered as metallic loss of 5% ⁽¹⁾, corresponding to 58 kg/t of billet. Lastly the electrodes combustion reaction is taken into account by means of carbon heat value ⁽⁷⁾.

TABELLA III - Input energetici rilevati nelle cinque acciaierie suddivisi nei due livelli (MJ/t di billetta).
TABLE III - Energy inputs for the five steel plants shared between the two levels (MJ/t billet).

Input energetici	Azienda				
	A	B	C	D	E
<i>Input energetici diretti</i>					
energia elettrica	2069	2240	2501	2534	2653
metano	—	—	—	—	—
olio combustibile	140	4	—	4	4
propano	10	10	—	10	8
carbone	21	34	13	126	67
<i>Input energetici da reazioni esotermiche</i>					
ferro	273	656	680	642	719
elettrodi	138	273	273	273	273
altre	245	197	159	201	197
	245	210	210	245	210
<i>Totale primo livello</i>		2896	3181	3176	3325
					3333
<i>Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche utilizzate nello stadio finale del processo</i>					
energia elettrica	3099	3113	3678	3441	3705
metano	—	—	—	—	—
distillati del petrolio	12	1	—	1	1
carbone	2	3	1	11	6
<i>Input energetici diretti di materiali di consumo</i>					
rottame consumato	371	1366	1327	1345	1441
ferroleghe	244	371	371	371	371
elettrodi	159	209	209	244	209
ossigeno	75	227	183	231	227
refrattari	75	3	65	78	58
scorificanti	333	333	333	333	333
	184	184	184	184	184
<i>Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche per i materiali di consumo</i>					
rottame consumato	531	1248	1152	1203	1322
ferroleghe	366	531	531	531	531
elettrodi	153	313	313	366	313
ossigeno	112	218	176	222	218
refrattari	65	4	97	117	87
scorificanti	21	65	65	65	65
	21	21	21	21	21
<i>Totale secondo livello</i>		5727	6157	5989	6468
					6479
Totale		8623	9338	9165	9793
					9812

dividuaione degli input energetici di secondo livello è effettuata prendendo in considerazione il sistema elettrico lombardo, ipotizzando che gli scambi con la rete nazionale siano omogenei con la produzione locale. Si fa quindi riferimento a una produzione che per il 70,75% deriva da centrali termoelettriche e per il restante 29,25% (comprensiva degli acquisti dagli autoproduttori) da centrali idroelettriche^(9, 10).

In Fig. 3 sono evidenziate le perdite sia per quanto riguarda la produzione termoelettrica (fase di acquisizione, trasporto e raffinazione del combustibile⁽⁷⁾; fase di conversione in energia elettrica e trasporto allo stadio in alta tensione⁽⁹⁾), sia per la produzione idroelettrica (fase di conversione e trasporto⁽¹¹⁾).

In definitiva per l'energia elettrica utilizzata dalle acciaierie esaminate si è ricavato un coefficiente di conversione di 9,13 MJ/kWh (corrispondente a 2179 kcal/kWh) comprensivo delle perdite di trasporto allo stadio in alta tensione.

Le perdite di trasporto e distribuzione del carbone (in questa analisi non si considera la trasformazione del carbone in coke) sono desunte dal bilancio energetico nazionale 1978⁽⁷⁾. Dalla medesima fonte si ricavano le perdite riguardanti i distillati del petrolio (raffinazione, trasporto e distribuzione) e il metano (distribuzione e trasporto).

4.2. Energy analysis extended to some indirect inputs (level 2)

Acquisition, conversion, transport and storage of energy sources

The electric energy required by the five examined factories is totally supplied by Ente Nazionale Energia Elettrica (National Electricity Generating Board). The specification of the energy inputs at level 2 is carried out considering the lombard electricity generation system and assuming that the exchanges with the national electric network and the local generation are similar with respect to their sources. Therefore we refer to an electricity production whose 70.75% is supplied by thermoelectric power plants and the remaining 29.25% (including the amounts purchased from self-producers) by hydroelectric plants^(9, 10).

Total thermoelectric production losses (in fuel acquisition, transport and refining steps⁽⁷⁾; energy conversion and high voltage transport steps⁽⁹⁾), as well as total hydroelectric production losses (in conversion and transport steps⁽¹¹⁾) are shown in Fig. 3.

In conclusion, a conversion coefficient of 9.13 MJ/kWh (corresponding to 2179 kcal/kWh), including high voltage transport losses, was obtained for the electric energy used in the examined steel plants.

The data for quantifying the losses in coal transport and distribution (we do not consider the carbon-coke

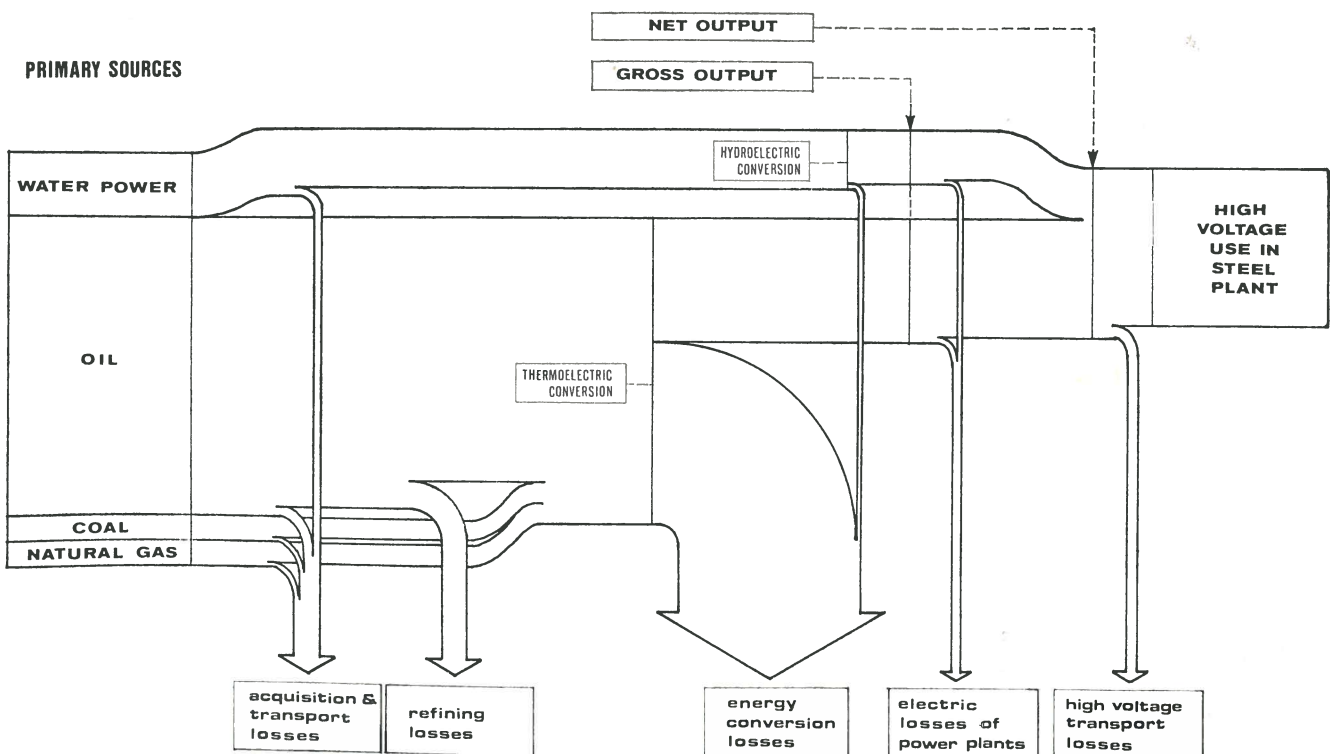


Fig. 3 - Fornitura di energia elettrica alle acciaierie lombarde: schematizzazione delle fasi (a partire dalle fonti primarie) e perdite corrispondenti.

Fig. 3 - Electric energy supply to steel plants in Lombardy: schematization of the different steps (from primary sources) and corresponding losses.

Input energetici diretti per la produzione dei materiali di consumo

Il rottame consumato per la produzione di una tonnellata di billetta risulta dalla perdita metallica⁽¹⁾ nel forno elettrico e dalle perdite di acciaieria (spuntature, fondi secchia, ecc.) e corrisponde a 116 kg/t di billetta⁽⁶⁾ cui va attribuito un costo energetico di primo livello. A questo scopo si ipotizza una provenienza del rottame da acciaio prodotto in acciaierie elettriche e si assume quindi il costo energetico medio di primo livello fra le cinque acciaierie considerate (3,2 MJ/kg), trascurando i costi energetici di primo livello dovuti a successive lavorazioni.

L'input energetico diretto per la produzione di ferro-silicio (75% di Si) è di 34,9 MJ/kg, per il ferro-manganese (75% di Mn) di 7,2 MJ/kg^(12, 13); per gli elettrodi l'input è valutato in 34,7 MJ/kg⁽¹⁴⁾; per l'ossigeno in 6,5 MJ/Nm³⁽¹⁵⁾.

Gli input energetici diretti per la produzione di calce e cementi sono valutati rispettivamente in 4,9 MJ/kg⁽¹⁶⁾ e in 4,1 MJ/kg⁽¹⁷⁾. I restanti refrattari e scoriificanti vengono computati distinguendo i diversi prodotti⁽¹⁸⁾.

Acquisizione, trasformazione, trasporto e stoccaggio delle fonti energetiche per la produzione dei materiali di consumo

Per i materiali di consumo è stata individuata la composizione degli input energetici di primo livello (energia elettrica, distillati del petrolio, gas naturale, carbone) e sono state introdotte, per ogni fonte primaria, le medesime perdite precedentemente valutate.

4.3. Stima dell'energia per il trasporto delle materie prime

L'input energetico per il trasporto è funzione del mezzo impiegato e della distanza percorsa. Per la situazione italiana si hanno valori di 0,25 MJ/t km per il trasporto merci mediante ferrovia e di 1 MJ/t km per il trasporto merci con autocarro pesante^(19, 20). Facendo riferimento a una distanza media di 100 km per il trasporto delle ferroleghie, refrattari, scoriificanti ed elettrodi, realizzato con autocarro, si ottiene un valore di 11 MJ/t di billetta prodotta.

Il trasporto del rottame, mancando valutazioni più accurate, viene calcolato riferendosi a una distanza media di 500 km e a diversi sistemi di trasporto. Si ottengono i seguenti costi energetici di trasporto: 138 MJ/t di billetta (100% ferrovia), 345 MJ (50% ferrovia e 50% autocarro), 553 MJ (100% autocarro). Tale input risulterebbe pari a una quota variabile fra il 5 e il 18% del costo energetico di primo livello.

5. Conclusioni

La metodologia di analisi adottata consente di valutare i costi energetici riferiti ai due livelli di regressione introdotti. Tali costi sono anche riportati nella Fig. 4 che mette in evidenza la ripartizione tra primo e se-

condimento) are taken from national energy balance 1978⁽⁷⁾. The data for quantifying the losses in petroleum distillates refining, transport and distribution and the losses in natural gas distribution and transport, are taken from the same source.

Direct energy inputs for production of material inputs

The scrap lost per ton of billet results from the metallic losses⁽¹⁾ in electric furnace and from the steel plants losses (i.e. discards, skulls, etc.) and corresponds to 116 kg/t of billet⁽⁶⁾, to which we must ascribe a first level embodied energy. We assume that the five plants use scrap coming from steel produced in electric furnace plants.

Then we take as embodied energy figure the average first level energy requirement of the five considered factories (3.2 MJ/kg), neglecting the first level energy requirements for the subsequent working.

The direct energy input for ferro-silicon production (75% of Si) is 34.9 MJ/kg, for ferro-manganese (75% of Mn) is 7.2 MJ/kg^(12, 13), for electrodes is 34.7 MJ/kg⁽¹⁴⁾ and for oxygen 6.5 MJ/Nm³⁽¹⁵⁾.

Direct energy inputs for lime and cement production are respectively 4.9 MJ/kg⁽¹⁶⁾ and 4.1 MJ/kg⁽¹⁷⁾. The other refractories and slag forming materials are separately reckoned⁽¹⁸⁾.

Acquisition, conversion, transport and storage of energy sources for production of material inputs

The different first level energy inputs (electricity, petroleum distillates, natural gas, coal) for the produc-

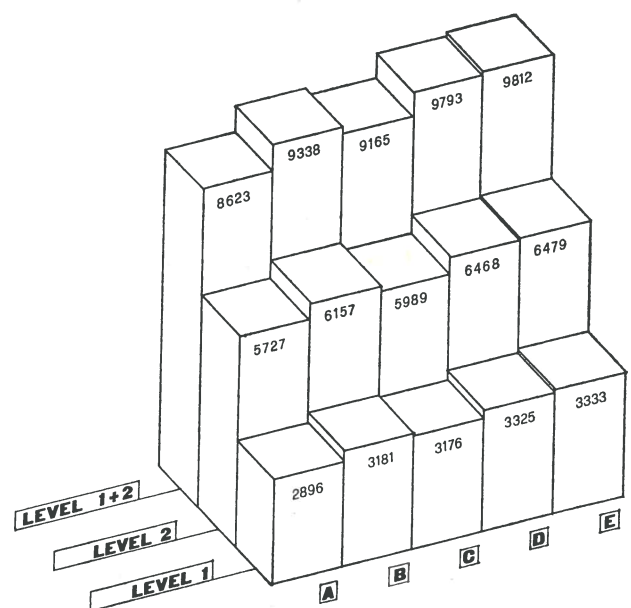


Fig. 4 - Suddivisione degli input energetici fra primo e secondo livello per le acciaierie esaminate (MJ/t di billetta).

Fig. 4 - Sharing between first and second level energy inputs for the analysed steel plants (MJ/t billet).

condo livello; in Fig. 5 è messa in evidenza la ripartizione tra input da attribuire ai materiali e quelli da attribuire all'energia direttamente utilizzata.

Gli input energetici delle cinque acciaierie considerate si distribuiscono per il 34% al primo livello (27% come input energetici diretti, 7% da reazioni esotermiche), per il 66% al secondo livello (38% per l'acquisizione, la trasformazione e il trasporto delle fonti energetiche, 15% come input energetici diretti per la produzione dei materiali di consumo, 13% per l'acquisizione, la trasformazione e il trasporto dell'energia necessaria per i materiali).

La metodologia messa a punto e i risultati ottenuti consentono valutazioni sia di modifiche (o diversità) operative sia di modifiche (o diversità) impiantistiche. Tra le modifiche impiantistiche vanno distinti gli interventi finalizzati alla conservazione dell'energia (riduzione dell'energia diretta per unità di prodotto) da quelli che hanno come obiettivo la sostituzione tra fonti energetiche (riduzione dell'energia indiretta per unità di energia diretta).

I dati di esercizio (relativi al periodo: gennaio 1979 - gennaio 1980) che sono stati presi in considerazione consentono esclusivamente valutazioni di diversità operative e impiantistiche tra i cinque impianti.

Il campione dei cinque impianti è sicuramente omogeneo dal punto di vista dello schema di processo, delle dimensioni dei forni, del prodotto finale e presenta variazioni limitate per quanto riguarda la potenza (elettrica) specifica installata ($0,28 \div 0,36$ MVA/t). Il fatto di disporre di dati medi relativi ad un periodo di tredici mesi e talune incertezze nella quantificazione degli input va tenuto presente.

Nell'ambito del modello di analisi energetica proposto è evidente che diversità operative e diversità impiantistiche con conseguenze sulla conservazione del-

tion of material inputs have been specified. The same losses previously evaluated for every primary source have been introduced.

4.3. Energy requirement for raw materials transport

The transport energy requirement depends on the used means and covered distance. In Italy we have values of 0.25 MJ/t km for rail transport and of 1 MJ/t km for lorry transport (19, 20).

In lack of more accurate evaluations, for ferro-alloys, refractories, slag forming materials and electrodes we assume an average distance of 100 km and a lorry transport. So we obtain a contribution of 11 MJ/t of billet.

For the scrap we assume an average distance of 500 km and different transport means. So we obtain the following transport energy requirements: 138 MJ/t billet (100% by rail), 345 MJ (50% by rail and 50% by lorry), 553 MJ (100% by lorry). These values range from 5 to 18% of the total energy requirement at the first level.

5. Conclusions

The analysis methodology introduced in this paper allows to evaluate the energy requirements referred to the two levels of regression considered. Fig. 4 shows the sharing of energy requirements between level 1 and level 2. Fig. 5 shows the sharing between the total energy requirement to supply direct energy to the final process stage and the total energy requirement to supply material.

The energy inputs of the five steel plants are so shared: 34% at the first level (27% as direct energy inputs, 7% as exothermic reactions), 66% at the second level (38% as acquisition, conversion and transport of energy sources for the final process stage, 15% as direct energy inputs for production of material inputs, 13% as acquisition, conversion and transport of energy sources for production of material inputs).

The adopted methodology and the obtained results allow evaluations of changes (or differences) in operation or plant features.

Among the changes in plant features, we must distinguish between measures for energy saving (with direct energy reduction per product unit) and measures aimed at the substitution of energy sources (with indirect energy reduction per direct energy unit).

The operating data (referred to the period: January 1979-January 1980) which are considered permit to evaluate only differences in operation and plant features of the five factories.

The sample of five factories is certainly homogeneous with reference to the process scheme, to the furnaces capacity and to the final product and shows small differences in installed specific electric power ($0.28 \div 0.36$ MVA/t). However we must bear in mind that only average data relative to a period of thirteen months are available and that there are some uncertainties about the inputs quantification.

It is evident that differences in process and plant

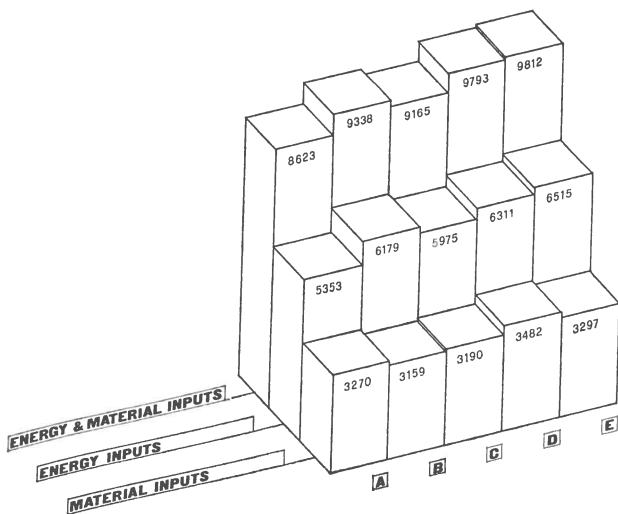


Fig. 5 - Suddivisione degli input energetici fra costi dovuti all'energia e costi dovuti ai materiali di consumo (MJ/t di billette).

Fig. 5 - Sharing between total energy requirement to supply direct energy to the final process stage and total energy requirement to supply materials (MJ/t billet).

l'energia possono essere rilevate dai costi energetici di primo livello; solo i costi energetici di secondo livello consentono però di valutare in modo omogeneo tali diversità.

Inoltre diversità impiantistiche con conseguenze sulla sostituzione tra fonti energetiche non possono essere rilevate che dai costi energetici di secondo livello. La valutazione di singole diversità è possibile confrontando, volta per volta, una coppia di aziende che si assume differiscano essenzialmente solo per un aspetto (di prodotto, impiantistico o operativo).

Confronto tra azienda senza bruciatore (B) e azienda con bruciatore (C)

Limitando l'analisi energetica solo al primo livello non è possibile dare alcun giudizio sulla bontà della soluzione con bruciatore, trattandosi di un intervento di sostituzione tra fonti. Si può unicamente vedere la ripartizione degli input energetici: l'uso del combustibile utilizzato dal bruciatore consente un minor consumo di elettrodi.

Al secondo livello si rileva che l'uso esclusivo di energia elettrica in fase di fusione comporta un maggior costo di acquisizione e trasformazione e un maggior costo per la produzione di elettrodi; l'uso del bruciatore comporta d'altra parte un maggior costo per la produzione di ossigeno. In definitiva la soluzione C risulta più conveniente.

Confronto fra azienda con elevato consumo di ossigeno (E) e azienda con modesto consumo di ossigeno (B)

L'azienda E, che ha un elevato consumo di ossigeno, ha un maggiore costo energetico di primo livello, dovuto ad un maggiore consumo di elettricità e di ricarburanti. L'analisi al secondo livello penalizza ulteriormente l'azienda E in quanto tiene in conto il maggior consumo di elettricità e ossigeno.

Confronto fra azienda con bruciatore ossi-nafta (A) e azienda con bruciatore ossi-metano (C)

Si tratta di valutare una diversità impiantistica con conseguenze sulla sostituzione tra fonti energetiche. L'acciaieria A ha un costo energetico di primo livello inferiore (dovuto tra l'altro a una più elevata potenza specifica installata).

La valutazione dei due bruciatori installati è effettuata prendendo in considerazione al secondo livello l'input energetico indiretto per unità di energia diretta fornita dai bruciatori stessi. Per l'acciaieria A tale rapporto vale 1,41; per l'acciaieria C 0,74. Ciò indica che è favorito un bruciatore ossi-metano.

Inoltre, con finalità diverse e disponendo di dati opportuni, il modello di analisi proposto consente di evidenziare anche i complessi rapporti di interscambio che si possono stabilire tra fonti energetiche diverse, tra diversi materiali di consumo, tra fonti energetiche e materiali di consumo.

features which affect energy conservation can be shown by energy requirement data at the first level; nevertheless, only energy requirement data at the second level allow a much more homogeneous evaluation of such differences. Furthermore differences in plant features which affect the substitution of energy sources can be pointed out only by energy requirement data at the second level.

The evaluation of each difference is possible comparing two factories which should differ only in one aspect (of product, plant or operation).

Comparison between factories with burner (C) or without burner (B)

Stopping the energy analysis at the first level it is not possible to evaluate the auxiliary burner introduction, being a measure for the substitution of energy sources. It is only possible to verify the energy inputs distribution: in fact the fuel consumption in the burner allows a lower consumption of electrodes.

At the second level of the energy analysis it can be noticed that the use of electricity alone during the melting-down period involves a higher requirement for acquisition and conversion of sources, and a higher requirement for electrodes production; on the other hand in the factory with burner the requirement for oxygen production is higher. Finally solution C is more profitable.

Comparison between factory with high oxygen consumption (E) and factory with low oxygen consumption (B)

Factory E, with a high oxygen consumption, shows a higher energy requirement at the first level, due to a higher electricity and recarburizers consumption. The analysis at the second level is even heavier for factory E, as it takes into account the higher consumption of electricity and oxygen.

Comparison between factory with oxy-oil burner (A) and factory with oxy-methane burner (C)

Also in this case we evaluate a difference which affects the substitution of energy sources.

The steel plant A shows a lower energy requirement at the first level (also due to a higher installed specific power).

The comparison of the two auxiliary burners is done considering at the second level the indirect energy input per direct energy unit supplied by the burner themselves. Such a ratio is 1.41 in steel plant A and 0.74 in C. This shows that the oxy-methane burner is more profitable.

In addition, being the necessary data available, the proposed analysis model also allows to study the complex interchange relationships that can occur among different energy sources, among different material inputs and between energy sources and material inputs.

Bibliografia - References

1. International Iron and Steel Institute: *A Technological Study on Energy in the Steel Industry*, Brussels 1976.
2. T.V. LONG et al.: *Economic Determinants of the Use of Energy and Materials in the U.S. and Japanese Iron and Steel Industries*, Energy, Vol. 3, n. 4, August 1978.
3. A. PALAZZI: *Il problema dell'energia nel settore siderurgico*, Bollettino Tecnico Finsider, Marzo-Aprile 1979.
4. International Federation of Institutes for Advanced Studies: *Energy Analysis and Economics*, Resources and Energy, Vol. 1, n. 2, October 1978.
5. J. HOOKER: *Some Problems of Definition Raised by a Transportation Energy Data Base*, Proceedings 2nd International Conference on Energy Use Management, Los Angeles, October 22-26, 1979, Vol. 1, Pergamon Press.
6. G. FANTINELLI: Comunicazione personale, Marzo 1980.
7. ENI: *Energia ed idrocarburi 1978*, Roma 1980.
8. LANDOLT, BORNSTEIN: *Kalorische Zustandsgrossen*, 1961.
9. ENEL: *Produzione e consumo di energia elettrica in Italia 1978*, Milano 1980.
10. UNAPACE: *I produttori industriali di energia elettrica in Italia nell'anno 1978*, Roma 1979.
11. S.S. PENNER, L. ICERMAN: *Energy*, Vol. 2, *Non-Nuclear Technologies*, Addison-Wesley, 1975.
12. G. RATH, H. ROTH: *The Operation and Design of Electric Reduction Furnaces for the Production of Ferrosilicon and Silicon Metal*, Demag.
13. F.W. MÖLLENKAMP, W. HAIDUK: *Development Trends in the Production of Ferro-Alloys in Electric Reduction Plants*, Demag.
14. UNION CARBIDE: *Electric Arc Furnace. Electrode Digest*, Union Carbide Corporation, 1977.
15. ENEL: *Possibilità di modulazione dei prelievi di energia elettrica nell'industria*, Milano 1979.
16. ENI: *Gli usi finali dell'energia in Italia*, Roma 1978.
17. Ministero Industria, Commercio e Artigianato: *Consumi finali di fonti energetiche*, Roma 1979.
18. Aziende produttrici lombarde: *Comunicazioni personali*, Ottobre 1980.
19. G. GABRIELLI: *Considerazioni sul grado di utilizzazione dell'energia richiesta nei veicoli passeggeri e merci di tutti i tipi in rapporto alle loro capacità nette di trasporto*, XX Convegno Internazionale delle Comunicazioni, Genova, 8-13 Ottobre 1972.
20. G. GABRIELLI, G. GONELLA: *Sul valore del fattore di utilizzazione dell'energia di alcuni tipi di veicoli da trasporto alla velocità media delle rispettive missioni basiche*, Ingegneria Ferroviaria, Giugno 1975.