

*Giuseppe Tassielli, Bruno Notarnicola
Facoltà di Economia, Dipartimento di Scienze
Geografiche e Merceologiche
Università di Bari
g.tassielli@dgm.uniba.it*



IL CONSUMO ENERGETICO NELLA PRODUZIONE DEL NERO DI CARBONIO

Il nero di carbonio si ottiene prevalentemente col processo al forno che, come altri processi dell'industria chimica, consuma notevoli quantità di energia in varie forme.

Il processo viene pertanto analizzato per calcolare il costo energetico diretto ed indiretto, alla luce delle innovazioni introdotte negli anni, cercando di delineare le prospettive di questo prodotto.

La valutazione dei consumi di energia nei vari settori produttivi è indispensabile se si vogliono fare corrette previsioni dei consumi energetici e un razionale programma di approvvigionamento energetico. Nella presente nota vengono presentati i risultati dello studio relativo al consumo di energia nella produzione del nero di carbonio o nerofumo (carbon black), un prodotto chimico usato principalmente come rinforzante della gomma, come pigmento colorante e per migliorare la conducibilità elettrica dei materiali. Attualmente si producono vari tipi (gradi) di nero di carbonio che si differenziano per il processo di produzione, per le dimensioni delle particelle, struttura e purezza. Il processo più diffu-

so è quello al forno, con il quale si ottiene circa il 95% della produzione mondiale, che nel 2003 è stata di 7,8 Mt, corrispondente al valore commerciale di circa 7 miliardi di euro superiore a quello di altri elementi non metallici (zolfo, fosforo, ecc.). Il restante 5% si ottiene con altri processi (termico, da acetilene, a lampada, da gas) impiegati per ottenere prodotti speciali. Nel 2003 la produzione italiana di nerofumo è stata di circa 210.000 t, circa il 2,7% di quella mondiale [1].

Uno dei problemi importanti dell'industria chimica, oltre a quello ambientale, riguarda la grande quantità di energia assorbita nei processi produttivi e la dipendenza dai prodotti petroliferi di importazione disponibili a prezzi sempre crescenti, come

dimostrano le recenti impennate del prezzo del petrolio. Da vari anni le industrie chimiche dei Paesi industrializzati cercano di ridurre la loro dipendenza, pur sapendo che la loro attività futura sarà subordinata ancora per molti anni alla disponibilità di petrolio, unica fonte di materie prime e di energia [2, 3]. La Tabella 1 contiene i dati relativi al costo energetico e al consumo di energia per alcuni prodotti chimici di base in Italia nel 2001. Da notare che il costo energetico dei prodotti chimici della Tabella 1 è stato ottenuto sommando l'apporto di energia "diretto", cioè l'energia impiegata sotto forma di calore e di elettricità nel ciclo produttivo, a quella indiretta, "incorporata" nelle materie prime, fonti di energia e

reagenti chimici usati. Da tali dati è possibile notare che circa il 12% dell'energia consumata dall'intero settore industriale viene assorbita in una decina di prodotti chimici di base, per lo più destinati ad ulteriori trasformazioni o ad essere utilizzati in altri settori. L'energia "incorporata" nell'ammoniaca si ritroverà nell'urea e nei fertilizzanti azotati assorbiti dall'agricoltura, l'energia "incorporata" nel carbonato di sodio si ritroverà in buona parte assorbita dall'industria del vetro e in altri sistemi industriali e così via. Passiamo ora al calcolo del costo energetico del nerofumo per valutare la possibilità di migliorare l'efficienza energetica del ciclo produttivo.

Consumo di energia nel processo al forno

Il ciclo produttivo al forno del nerofumo comprende due fasi: nella prima la carica viene riscaldata ad elevata temperatura con consumo di energia ottenendo il nerofumo grezzo; nella seconda fase il prodotto grezzo viene trasformato in pro-



Tabella 1 - Costo energetico e consumo di energia di alcuni prodotti chimici in Italia nel 2001

Prodotti chimici	Costo energetico* (GJ/t)	Produzione italiana** (10 ³ t)	Consumo energetico relativo (PJ)
Acido solforico	2,6	1.579	4,1
Acido nitrico	8,4	562	4,7
Acido cloridrico	9,6	563	5,4
Ammoniaca	48,2	364	17,5
Cloro	24,0	684	16,4
Idrossido di sodio	24,0	828	19,9
Carbonato di sodio	6,9	750	51,8
Acetilene	86,0	9	0,8
Polietilene	92,3	1.099	101,4
Polistirolo	62,5	265	16,6
Cloruro di polivinile	98,8	446	44,1
Totale			282,7

* Da [4] ** Da [5]

dotti di qualità diversa con vari sistemi e differenti consumi di energia. La materia prima di partenza è una frazione ricca in idrocarburi aromatici pesanti (che d'ora innanzi indicheremo come "olio combustibile"), ottenuta come sottoprodotto dello steam cracking della virgin nafta nella produzione di etilene o dal cracking dell'olio combustibile per ottenere benzine o dalla distillazione secca del carbone fossile, e come fonte di energia primaria il gas naturale [6-9]. Il processo inizia bruciando il gas naturale nel forno con aria preriscaldata proveniente dagli ugelli disposti intorno al reattore e collegati con gli scambiatori di calore posti alla base del reattore, nei quali vengono fatti passare i gas di scarico che fuoriescono a temperatura elevata. A questo punto si fa entrare la carica preriscaldata di olio combustibile che, bruciando a sua volta in parte, porta la temperatura del forno a 1.900 °C. Le reazioni di aggregazione del

nerofumo avvengono in difetto di ossigeno, in quanto l'aria immessa è soltanto il 20-25% di quella richiesta dalla combustione completa. La struttura e la qualità del nerofumo che si forma dipendono dalla composizione della carica, temperatura di reazione e tempo di residenza. Il processo si arresta inviando nel reattore un getto di acqua che abbassa la temperatura fino a circa 800 °C, per evitare che parte del nerofumo vada persa reagendo con l'anidride carbonica e il vapore prodotti dalla combustione. Le rese sono nell'ordine del 40-60% per i neri di carbonio rinforzanti. Così raffreddati, i gas di reazione vengono avviati ai recuperatori di calore dove, per scambio termico, si raffreddano ulteriormente cedendo calore ai materiali reagenti. Il gas in uscita dal reattore contiene tutto il nero di carbonio e ha un potere calorifico inferiore che varia fra 300 e 800 kcal/Nm³. Esaminando la Tabella 2, che riporta il consumo di

Tabella 2 - Bilancio energetico del forno per produrre 1 t di nero di carbonio di grado rinforzante

Materie prime	Unità di misura	Quantità impiegata	GJ	%
Energia in entrata				
Carica: olio combustibile preriscaldato (a 40 GJ/t)	t	1,75	70,0	80
Energia preriscaldamento olio (a 0,5 GJ/t)	t	1,75	0,9	1
Combustibile: gas naturale (a 36,0 MJ/m ³)	m ³	333	12,0	14
Aria preriscaldata (a 0,92 MJ/m ³)	m ³	5.000	4,6	5
Totale			87,5	100
Energia in uscita				
Nero di carbonio (a 34,4 GJ/t)	t	1	34,4	39
Gas di reazione (a 2,72 MJ/Nm ³ +calore sensibile)	Nm ³	10.500	39,9	46
Acqua di raffreddamento (a 2,5 MJ/L)	L	4.200	10,5	12
Perdite per irraggiamento			2,7	3
Totale			87,5	100

Fonte: Elaborazione dati aziendali

energia per produrre una tonnellata di nero di carbonio di grado rinforzante tramite il processo al forno, risulta che il prodotto "incorpora" circa il 39% dell'energia di processo; della parte restante il 46% circa si ritrova nei gas di reazione e il 15% si perde come vapore nella fase di raffreddamento o per irraggiamento.

I gas di reazione contenenti il nero di carbonio vengono poi avviati ad un collettore collegato al filtro principale, formato a sua volta da numerosi scomparti dotati di maniche filtranti che separano la quasi totalità del prodotto dalla corrente gassosa. Il nero di carbonio raccolto passa ai mulini polverizzatori e di qui all'impianto di addensamento dove avviene la granulazione ad umido che fornisce un pro-

dotto finale in pellets con una massa volumica apparente cinque volte superiore a quella del prodotto uscito dal reattore. Il nero di carbonio dopo essiccazione viene avviato ai silos di deposito, da dove viene caricato direttamente in autocarri speciali attrezzati per il trasporto del prodotto sfuso o avviato altrove per essere confezionato in sacchi speciali. Tutte le fasi del processo richiedono un consumo di energia riportato in Tabella 3 dove, accanto al costo energetico diretto, pari a circa 99,9 GJ/t di nerofumo, è indicato anche il costo energetico indiretto, ricavato seguendo le norme ISO 14040 per l'analisi del ciclo di vita di prodotto. Il ciclo produttivo del nero di carbonio mostra che la

fabbricazione di questo materiale assorbe nelle varie fasi del processo rilevanti quantità di energia sotto forma principalmente di combustibili e, in misura più ridotta, di energia elettrica; circa l'80% dell'energia impiegata riguarda il consumo diretto. Il costo energetico totale di 125,7 GJ/t di nerofumo pone questo prodotto fra quelli a più elevato consumo di energia [10], se confrontato con gli altri riportati nella Tabella 1.

Innovazioni adottate per migliorare l'efficienza energetica del processo

Nel corso degli ultimi anni crescente interesse sta assumendo la riduzione del consumo di energia del ciclo produttivo e l'attenzione è stata rivolta maggiormente al recupero del calore dei gas di reazione (gas del forno) dopo aver separato il nero di carbonio. In Italia l'operazione è favorita anche dal fatto che l'energia recuperata nei cicli produttivi viene assimilata alla produzione di energia rinnovabile che, secondo il provvedimento n. 6/1992 del Comitato Interministeriale dei Prezzi (CIP 6), consente di ottenere varie agevolazioni economiche. Le industrie produttrici di nero di carbonio, pertanto, si sono dotate di bruciatori e caldaie più efficienti che consentono l'utilizzo delle grandi quantità del gas del forno (circa 10.500 Nm³/t di nerofumo), costituito prevalentemente dal 10% di idrogeno, 7% di ossido di carbonio, insieme al 40% di N₂, 40% di H₂O, 3% di CO₂ e piccole quantità di idrocarburi, composti solforati e azotati (H₂S, NO_x, CH₄, C₂H₂), con basso potere calorifico (2,7 MJ/Nm³) [11]. Attualmente viene usato per preriscaldare la carica del forno e per essiccare il prodotto, mentre

Tabella 3 - Costo energetico (diretto ed indiretto) di 1 t di nero di carbonio di grado rinforzante senza recupero di energia (in GJ)

	Unità di misura	Quantità impiegata	Costo energ. diretto GJ	Costo energ. indiretto GJ
Carica: olio combustibile (a 40 GJ/t)	t	1,75	70,0	17,6
Combustibile: gas naturale (a 36 MJ/m ³)	m ³	333	12,0	2,1
Gas naturale per preriscaldare l'aria	m ³	128	4,6	0,8
Vapore per preriscaldare la carica (a 3,15 MJ/kg)	kg	286	0,9	0,3
Energia elettrica*	kWh	416	1,5	2,6
Vapore per altri usi	kg	1.048	3,3	1,1
Gas naturale per l'essiccazione e pellettizzazione del nerofumo	m ³	211	7,6	1,3
Totali parziali			99,9	25,8
Totale costo energetico				125,7

* Il costo energetico diretto e totale dell'energia elettrica è rispettivamente calcolato in 3,6 MJ/kWh e 9,72 MJ/kWh. Fonte: Elaborazione dati aziendali

operanti in Italia che producono annualmente 210.000 t di nero di carbonio con circa 280 addetti, dividendo il consumo totale di energia (210.000 t x 109,8 GJ/t = 23,06 PJ) per il numero di addetti addetti, risulta che l'industria del nero di carbonio ha un'intensità di energia di circa 82.350 GJ/addetto per anno, che la pone fra le industrie con alta intensità di energia all'anno per addetto, al di sopra dell'industria del cemento, siderurgica, cartaria, ecc.

Conclusioni

Nonostante le innovazioni introdotte negli anni recenti, il nero di carbonio ottenuto con il processo al forno mostra ancora un elevato costo energetico che si traduce anche in alti costi di produzione, per il fatto che il 50% del costo di fabbricazione è dovuto all'acquisto dei derivati

la parte restante, che in passato veniva inviata alla torcia o venduta a stabilimenti vicini provvisti di generatori di vapore, viene bruciata in adatti impianti ottenendo solo vapore o vapore insieme ad energia elettrica. Viene riportato nella Figura a lato il bilancio energetico del gas del forno, come sottoprodotto associato alla produzione di 1 t di nerofumo, utilizzato in un impianto di cogenerazione. Dal riciclo totale del tail gas è possibile ridurre il costo energetico dell'unità di peso di nerofumo da 125,7 GJ/t a 109,8 GJ/t, con un risparmio complessivo del 13%, 3% e 48% in meno rispettivamente per il costo energetico diretto ed indiretto (Tabella 4).

Tra i vari settori industriali, l'industria del nerofumo presenta uno dei più alti consumi di energia per addetto; se si considerano i dati delle industrie di nerofumo

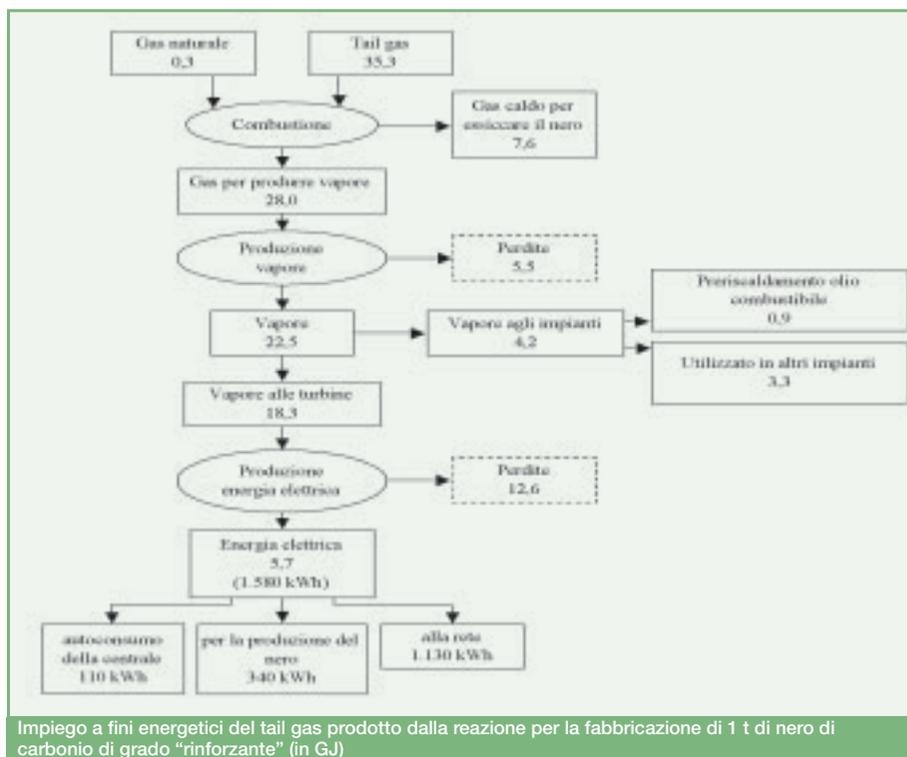


Tabella 4 - Costo energetico (diretto ed indiretto) di 1 t di nero di carbonio, grado rinforzante, riferito ad un impianto con centrale di cogenerazione e recupero interno di energia nelle fasi di lavorazione (in GJ)

	Unità di misura	Quantità impiegata	Costo energ. diretto* GJ	Costo energ. indiretto GJ
Olio combustibile (a 40,0 GJ/t)	t	1,75	70,0	17,6
Gas naturale (a 36,0 MJ/m ³)	m ³	333	12,0	2,1
Preriscaldamento aria			(4,6)	-
Preriscaldamento olio combustibile			(0,9)	-
Essiccazione e pellettizzazione del nerofumo			(7,6)	-
Produzione di vapore (a 3,15 MJ/kg)	kg	1.048	(3,3)	-
Energia elettrica dalla rete**	kWh	76	0,3	0,5
Energia elettrica dalla centrale interna	kWh	340	(1,2)	-
Energia elettrica per il funzionamento della centrale di cogenerazione	kWh	110	(0,4)	-
Gas naturale per la centrale	m ³	8	0,3	0,1
Energia elettrica ceduta alla rete**	kWh	1.130	- 4,1	- 7,0
Totali parziali			96,5	13,3
Totale costo energetico				109,8

* Fra parentesi è riportata l'energia ottenuta attraverso il recupero interno dei gas di reazione

** Il costo energetico diretto e totale dell'energia elettrica è rispettivamente calcolato in 3,6 MJ/kWh e 9,72 MJ/kWh

Fonte: Elaborazione dati aziendali

petroliferi e del gas naturale impiegati nel processo. Bastano lievi oscillazioni nei prezzi del petrolio e del gas naturale per non essere più competitivi rispetto alle società produttrici di altri Paesi che di-

spongono di fonti di energia fossili a basso prezzo. Ciò provoca lo spostamento della produzione nei Paesi in via di sviluppo e la conseguente chiusura di stabilimenti o di linee di produzione in

Europa e negli Stati Uniti. Negli ultimi due anni la società Degussa ha chiuso un impianto della capacità produttiva di 100.000 t/a a Baytown (USA) e quattro linee di produzione ad Ambès (Francia) e Karlsruhe (Germania); lo scorso anno la società Cabot Corporation ha chiuso l'impianto da 60.000 t/a di Zierbena (Spagna). Quasi contemporaneamente molti progetti di costruzione di nuovi impianti e di ampliamento della capacità produttiva di altri già esistenti vengono realizzati nei Paesi emergenti, prima fra tutti la Cina [12]. Peraltro, la ristrutturazione del settore del nero di carbonio si inserisce in un più ampio panorama di riorganizzazione della chimica mondiale, che dipende anche da altri fattori quali la crescita del mercato dei Paesi in via di sviluppo, ma soprattutto dalla convenienza economica dovuta ai bassi salari e alla scarsa attenzione dei governi ai problemi ambientali [13].

In questo contesto le società produttrici di nero di carbonio che decideranno di continuare a produrre negli Stati Uniti e in Europa dovranno impegnarsi maggiormente in un programma di riduzione dei consumi energetici, migliorando l'efficienza energetica del processo e incentivando l'uso di materie prime alternative, di sistemi di recupero dei sottoprodotti, di macchinari che possano essere prodotti e funzionare con minori consumi di energia, piuttosto che lasciarsi vincere dalla tentazione di formare cartelli o di spostare le produzioni.

Energy Consumption in Carbon Black Production

ABSTRACT 

Carbon black is mainly obtained through the furnace black process which, as other processes of the chemical industry, is responsible for a great energy consumption. Therefore, the process is analysed to calculate its direct and indirect energy "cost", trying to put in evidence the technical innovations realised in recent years and to trace the trends of this production.



ciente le materie prime, trasformando quasi interamente la carica di gas naturale in nerofumo e idrogeno e riducendo sensibilmente la produzione di anidride carbonica. Il costo energetico del nero di carbonio ammonterebbe a 88 GJ/t, di cui quasi il 50% derivante dal consumo indiretto dovuto all'elevato consumo di energia elettrica per il funzionamento del reattore. Inoltre, con questo processo si possono ottenere nuovi gradi di nero, potendo portare la temperatura anche a 2.500 °C [14, 15]. Nel futuro, quindi, l'impegno delle aziende del settore dovrà focalizzarsi sulla ricerca di quelle innovazioni di processo che portino alla riduzione del consumo energetico, in modo tale che la maggiore efficienza energetica possa fornire le condizioni di base per un rafforzamento delle produzioni di prodotti chimici importanti come il nero di carbonio.

Storicamente il passaggio dal processo al "canale", in uso negli anni Cinquanta del secolo scorso, al processo al forno alimentato con frazioni petrolifere ha stimolato innovazioni di vario tipo per ottenere nero di carbonio di migliore qualità con un processo più economi-

co, energeticamente più efficiente e meno inquinante. Da vari anni si sviluppano altri processi per ottenere il nero di carbonio in sostituzione di quello al forno attualmente più usato. Fra questi, il processo al plasma è molto interessante perché utilizza in modo più effi-

Bibliografia

- [1] R. Adams, *Focus on Pigments*, June 2003, 1.
- [2] F. Trifirò, *Chimica e Industria*, 2002, **84**(5), 32.
- [3] S. Marcinowski, *Chemistry and Industry*, July 5 2004, **13**, 16.
- [4] I. Bousted, G.F. Hancock, *Handbook of Industrial Energy Analysis*, 1979, Ellis Horwood Ltd, Chichester (GB).
- [5] *Chemical & Engineering News*, June 24, 2002, **80**(25), 78.
- [6] O. Vohler *et al.*, Carbon Black, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 6th Edition, 2000, Electronic Release, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
- [7] E.M. Dannenberg *et al.*, Carbon Black, Kirk-Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 1992, 4th Ed. Vol. 4, p. 1037-1074, John Wiley & Sons, New York.
- [8] G. Tassielli, L. Notarnicola, *Aspetti tecnici ed economici nella produzione ed impiego del nerofumo*, Pubblicazione n. 24 del Dipartimento di Scienze Geografiche e Merceologiche, 2001, Puglia Grafica Sud, Bari.
- [9] J.F. Auchter *et al.*, Carbon Black, *Chemical Economics Handbook*, 2002, SRI International, Menlo Park, California, 731.3000A-731.3003N.
- [10] B. Notarnicola, *Rivista di Merceologia*, 1996, **35**(IV), 337.
- [11] Environmental Protection Agency, Report AP42: Emission factors for atmospheric pollutants, Organic chemical process industry, 1995, Section 6.1-6.10, Cincinnati (OH, Usa).
- [12] G. Tassielli, B. Notarnicola, *Economic and Technological Trends in the World Carbon Black Industry*, 2004. Proceedings of the XIV IGWT Symposium "Focusing New Century Commodity Trade Environment", 25-29 August 2004, Beijing, Cina.
- [13] Federchimica, *L'industria chimica in Italia. Rapporto 2002/2003*.
- [14] L. Fulcheri, Y. Schwob, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1995, **20**(3), 197.
- [15] L. Fulcheri *et al.*, *Carbon*, 2002, **40**, 169.