

Alessandro Tugnoli, Valerio Cozzani, Francesco Santarelli
Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria
e delle Tecnologie Ambientali
Università di Bologna
valerio.cozzani@mail.ing.unibo.it



LA SOSTENIBILITÀ DI PROCESSO E DI PRODOTTO: NECESSITÀ DI UN APPROCCIO INTEGRATO

Parte II: approccio alla valutazione quantitativa

Molti elementi alla base del concetto di sviluppo sostenibile sono da anni patrimonio dell'ingegneria di processo. Le potenzialità che derivano da un approccio integrato alla valutazione delle alternative tecnologiche devono però ancora in gran parte essere sfruttate. In questa seconda parte sono stati descritti gli approcci alla valutazione quantitativa della sostenibilità.

Strumenti per la valutazione della sostenibilità di processo e di prodotto

Strumenti proposti per l'analisi di sostenibilità

Gli elementi messi in evidenza nella prima parte (*V. Chimica e Industria*, 2005, **87**(1), 52) sottolineano sia la centralità del tema della sostenibilità, sia l'esigenza di introdurre i principi fondanti nelle attività di sviluppo e di progettazione di processo e di impianto. Tuttavia, il passaggio da enunciazioni di principio a strumenti pro-

gettuali richiede la definizione di due diversi aspetti: in primo luogo, lo sviluppo di metodologie adeguate ed affidabili di valutazione, per poter tenere conto dell'effettiva rispondenza delle scelte progettuali all'insieme delle linee guida identificate; in secondo luogo, è necessario definire una metrica, ovvero un approccio alla quantificazione della compatibilità dei diversi aspetti di progetto con i principi definiti per lo sviluppo sostenibile.

Nello sviluppo e validazione di approcci che possano indirizzare adeguatamente la trattazione di questi aspetti, un elemento

di complicazione è dato dalla necessità di applicare questi strumenti nell'ambito delle diverse fasi di sviluppo del progetto. D'altronde, è ben noto che la maggior parte dei fattori che influenzano più profondamente, ad esempio, l'impatto ambientale di un sistema sono determinati da scelte compiute nelle prime fasi di progettazione; infatti sono scelte quali quelle del processo produttivo e delle materie prime di partenza a determinare i maggiori effetti su parametri come la sicurezza intrinseca, la generazione di rifiuti, l'impatto ambientale, la possibilità di rici-

clo, ecc. Col procedere della progettazione, aumenta il grado di dettaglio dei dati disponibili, ma si riduce la portata delle alternative progettuali possibili. Su sistemi esistenti è pertanto presente solo un margine ridotto per il miglioramento delle caratteristiche di sostenibilità e di sicurezza intrinseca. Se l'intervento deve essere concentrato sulle prime fasi di progettazione, si pone quindi il problema di rendere possibili valutazioni abbastanza affidabili su un sistema di cui si conoscono solo pochi elementi fondamentali.

In letteratura sono stati proposti numerosi approcci al problema e sono stati presentati vari strumenti da introdurre nell'ambito delle attività di progettazione per verificare la sostenibilità sia di processo sia di prodotto nonché confrontare l'adeguatezza delle alternative progettuali.

Il principale strumento proposto in questo ambito è il "life cycle assessment" o LCA. Questo, utilizzato al livello di semplificazione consono ai dati disponibili, permette un'analisi sistematica per la valutazione sia di un prodotto sia di un processo. La principale problematica è legata, come già evidenziato, alla stima, soprattutto nelle prime fasi di progetto, di alcuni elementi. Ad esempio, riguardo ad un impianto di processo, sono stati elaborati vari metodi per la stima delle emissioni: alcuni si basano su dati statistici e portano ai ben noti fattori di emissione, altri su modelli matematici predittivi (riempimento/svuotamento serbatoi, fenomeni evaporativi, ecc.) [1]. Per quanto riguarda l'aspetto dell'integrazione materiale ed energetica in un impianto chimico esistono modelli (*pinch diagram*, *source-sink mapping*, *HEN synthesis*, *MEN synthesis*, ecc. [1]) che permettono di individuare e valutare le possibili alternative riguardo le reti di scambio e recupero.

A livello di operazioni unitarie, vari suggerimenti possono essere seguiti al fine di diminuire l'impatto dell'operazione e dell'intero processo, quali: tecniche mirate a promuovere la selettività e l'efficienza delle reazioni attraverso la scelta adeguata della tipologia del reattore, dei profili di temperatura, del tipo di agitazione; tecniche finalizzate a migliorare i processi di separazione, come un'attenta pianificazione della sequenza di separazione, l'uso di metodi che sfruttino appieno le differenze tra le proprietà peculiari delle varie sostanze, l'integrazione realizzata con l'adozione e lo sviluppo di reattori separativi (reattori a membrana, *SCMCR*, ecc. [1]); tecniche

tazione degli impianti di processo. Quello che si configura come nuovo è il contesto, quello della sostenibilità, in cui essi sono inquadrati. Tipicamente il fine per cui venivano impiegati era quello dell'ottimizzazione puramente economica dell'impianto, con, al più, la necessità di rispettare i vincoli posti dalla legislazione in materia ambientale e di sicurezza. Il nuovo contesto di applicazione richiede invece l'ottimizzazione contemporanea di tutti gli aspetti del sistema e pertanto un importante lavoro per l'ulteriore sviluppo, l'aggiornamento e l'integrazione di questi strumenti sulla base dei principi chiave della sostenibilità, discussi in precedenza.



volte a diminuire le emissioni fuggitive dai serbatoi (scelta corretta della tipologia di apparato) e dalle altre parti dell'impianto (procedure sistematiche di *leak detection and repair*, uso nelle giunzioni e nelle tenute di tecnologie che garantiscano minori probabilità di perdite, ecc.).

Come si può notare, molti di questi strumenti sono già noti e utilizzati nella proget-

Indici per la sostenibilità

Nel tentativo di sviluppare una metrica adeguata all'analisi comparativa della sostenibilità di un processo o di un prodotto, allo stato attuale gli strumenti disponibili sono stati principalmente finalizzati alla valutazione di indici specifici per i diversi aspetti del problema. Gli indici specifici resi così disponibili sono quindi

Tabella 1 - Esempi delle principali tipologie di indici proposte per quantificare l'impatto ambientale (1)

- Indice di riscaldamento globale
- Indice di distruzione dell'ozono
- Indice della capacità di causare piogge acide
- Indice di formazione di smog fotochimico
- Indice di tossicità umana
- Indice di cancerogenicità
- Indice di tossicità per la fauna o la flora o specifiche specie
- Indice di eutrofizzazione

in generale utilizzati per il calcolo di indici globali di sostenibilità.

Esistono varie tipologie di indici in relazione agli aspetti del sistema che si vogliono rappresentare. Un indice efficace deve essere sufficientemente generale, per descrivere con un solo valore vari aspetti di un sistema, ma non deve comunque incorporare insieme aspetti o elementi eccessivamente differenti tra loro, rischiando così di perderne la rappresentatività. È inoltre necessario che per ogni indice siano ben definiti il significato e le limitazioni di impiego.

Non esiste, a tutt'oggi, un insieme unitario rappresentativo e generalmente accettato per gli indici di sostenibilità. Questo è ancora un campo di ricerca, nell'ambito del quale sono stati suggeriti approcci diversi ed in parte contrastanti. Ciò deriva dal fatto che la sostenibilità è un fenomeno complesso, difficile da descrivere in maniera sintetica, ma significativa con un insieme limitato di numeri.

Una prima classificazione degli indici proposti per la sostenibilità (Figura 1, parte I) può essere basata sullo schema che vuole la sostenibilità come combinazione di tre aspetti (impatto sull'ambiente, sviluppo economico ed equità sociale) [2, 3]. In questo ambito, ciascuna classe di indici deve fornire una quantificazione significativa dell'impatto del processo o del prodotto nell'ambito di appartenenza.

Nelle valutazioni dell'impatto ambientale, molti lavori propongono di usare come indicatori parametri come l'uso di materie prime, il consumo di energia non rinnovabile, il consumo di acqua, le emissioni tossiche, le emissioni inquinanti e le emissioni di gas serra, tutti espressi per unità di prodotto o per unità economica di valore aggiunto: un maggiore valore di questi parametri viene giudicato come elemento negativo nel confronto tra alternative [1-3]. Sono, inoltre, stati elaborati indici in grado di rappresentare varie tipologie di impatto ambientale, quali: indici di riscaldamento globale, di distruzione dell'ozono, di promozione delle piogge acide, di formazione di smog fotochimico, di tossicità per inalazione o ingestione, di cancerogenicità, ecc.

[1, 4]. Si tratta perlopiù di indici di impatto potenziale, ottenuti moltiplicando la quantità di una certa sostanza emessa per il potenziale fattore di impatto della medesima, determinato in riferimento a una sostanza campione (ad esempio, il potenziale di distruzione dell'ozono (ODP) per una certa molecola è determinato in rapporto agli effetti e al tempo di vita medio del CFC-11). L'uso di impatti potenziali semplifica la procedura di calcolo, evitando la necessità di determinare caso per caso il destino e la distribuzione ambientale delle sostanze emesse. La Tabella 1 fornisce un riassunto delle principali categorie di indici proposte per l'impatto ambientale, mentre la Tabella 2 fornisce alcuni esempi specifici. Per quanto riguarda gli indici economici, già da molti anni sono stati sviluppati matrici di indici in grado di quantificare le prestazioni di un'attività (valore attuale netto, payback period, ROI, ecc.), che possono essere utilizzati in modo efficace per le valutazioni di sostenibilità.

Il terzo aspetto della sostenibilità, quello sociale, è il più difficile da valutare, ed in

Tabella 2 - Alcuni esempi di indici potenziali di impatto (1, 4)

	Indice di potenziale di impatto	Potenziale di impatto	Sostanza di riferimento
Riscaldamento globale	$I_{GWP} = \sum GWP_i \cdot m_i$	$GWP_i = \int_0^t a_i C_i e^{-\lambda t} dt$	CO ₂
Distruzione dell'ozono	$I_{ODP} = \sum ODP_i \cdot m_i$	$ODP_i = \frac{C_i}{C_{CFC-11}} \cdot \frac{t_i}{t_{CFC-11}}$	CFC-11 (CCl ₃ F)
Tossicità umana per ingestione	$I_{INGTP} = \sum INGTP_i \cdot m_i$	$INGTP_i = \frac{C_w \cdot RfC_i}{C_i \cdot RfC_i}$	Toluene (C ₇ H ₈)

a_i è il coefficiente di assorbimento della radiazione (funzione di assorbanza e concentrazione)

C_i è la concentrazione in atmosfera

n è il tempo su cui viene indagato il fenomeno (di solito 120 anni)

k è la costante cinetica per la reazione con l'ossigeno atomico

t è il tempo di vita in atmosfera

C_w è la concentrazione in acqua

RfC_i è la dose di riferimento per la tossicità da ingestione

questo campo non esistono indici o sistemi di indici sufficientemente affidabili o generalizzabili.

Indici aggregati e procedure di aggregazione

Il passo successivo all'individuazione e valutazione di indici in grado di descrivere diversi aspetti della sostenibilità è la loro combinazione a formare pochi e, al limite, un solo indice. Questo genere di operazione è definito come aggregazione (*clustering*). L'aggregazione è di fatto sempre necessaria, se non altro per rappresentare il sistema attraverso un numero contenuto di indici.

Le procedure di aggregazione presentano aspetti critici [3, 5, 6], in quanto il processo di aggregazione introduce elementi arbitrari e possibilità di eccessiva semplificazione. Gli elementi che influenzano la sostenibilità variano da caso a caso e, solo usando l'esperienza professionale e la conoscenza della situazione specifica si può giungere a una valutazione corretta a partire dai singoli indici. Una procedura di aggregazione troppo spinta rischia di perdere, attraverso l'integrazione, il contatto con il problema concreto. Il punto sostanziale che emerge è quindi un monito rispetto ad un uso scorretto di indici troppo generici.

D'altronde, è evidente che disporre di procedure di aggregazione, senza tuttavia perdere di vista il contenuto di informazione dato dai singoli indici, è particolarmente importante nello sviluppo di un approccio integrato alla valutazione della sostenibilità. Infatti la disponibilità di un indice aggregato consente di eseguire un'ottimizzazione del sistema attraverso la ricerca di un estremo di tale parametro. L'ottimizzazione contemporanea rappresenta infatti un importante compromesso tra obiettivi differenti, fortemente influenzato dalle scel-

te compiute in fase di aggregazione. L'idea guida di un corretto processo di aggregazione è quindi di aggregare per permettere una valutazione, ma senza perdere le informazioni particolari che derivano dall'analisi dei singoli indici. Ciò richiama ancora una volta l'idea di analisi di sistema.

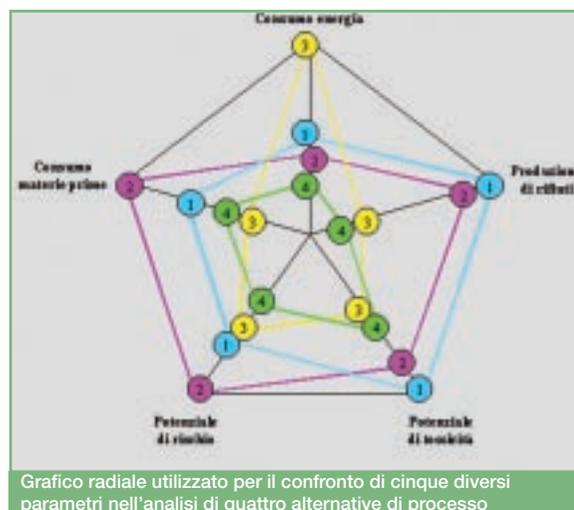
La procedura di aggregazione di due o più indici richiede in generale la definizione di una metodologia per renderli omogenei, poi di un processo di combinazione e di pesatura. Le proposte di procedure di aggregazione degli indici richiedono di solito la normalizzazione dei parametri rispetto a un valore di riferimento caratteristico di ogni indice e la loro combinazione per mezzo di una media pesata [7, 8]. La maggiore problematicità riguardo l'applicazione di queste procedure concerne la scelta dei parametri di normalizzazione e dei coefficienti di pesatura. Varie sono le metodologie proposte per determinarli. Ad esempio, si può effettuare una stima della capacità dell'ambiente di assorbire i flussi uscenti, o dell'ammontare di risorse disponibili per i flussi entranti; un piano nazionale di riduzione

dell'impatto ambientale, se esistente, può suggerire i valori opportuni (ad esempio gli scostamenti tra i valori degli impatti attuali e i valori obiettivo). Un altro metodo è quello di confrontare l'impatto con quello valutato a livello nazionale. Chiaramente, la conoscenza della situazione dell'area in cui ci si trova, della modalità e frequenza dei rilasci, della persistenza dei loro effetti, della fattibilità tecnica della loro riduzione o eliminazione e dell'accettabilità sociale di questi sono fattori imprescindibili nella procedura di definizione dei fattori di normaliz-

zazione e di pesatura delle diverse tipologie di indice. Un esempio di normalizzazione e pesatura è riportato in Tabella 3.

Sono stati proposti anche metodi di rappresentazione grafica contemporanea di vari indici, nella forma di grafici radiali o istogrammi [5, 8]. Tali rappresentazioni sono utili a fornire un'idea visiva immediata del sistema sotto differenti aspetti e permettere rapidi confronti tra alternative diverse. Un esempio è riportato nella Figura sottostante.

Un'ulteriore metodo di aggregazione proposto è basato sulla quantificazione in termini economici dei diversi aspetti del problema. Si può, ad esempio, valutare il



costo del trattamento delle correnti di rifiuto prodotte, o i costi di ripristino a seguito dello sfruttamento di risorse naturali, o, ancora, il ritorno economico sull'immagine di un'azienda derivante da una corretta politica ambientale. Tutto ciò consente di effettuare, in definitiva, un'ottimizzazione economica del sistema, nella quale l'ottimo economico comprenderebbe anche gli aspetti ambientali. A conferma della potenziale fattibilità di un approccio di questo tipo, alcuni studi effettuati hanno rilevato che il processo più vantaggioso dal punto

Tabella 3 - Esempio di procedura di normalizzazione e aggregazione per il confronto tra quattro alternative di processo partendo da dati su cinque diversi parametri

Valori di indici potenziali di impatto riguardanti aspetti differenti					
	Consumo di energia (kJ/h)	Produzione di rifiuti (kg/h)	Potenziale di tossicità (g/h)	Potenziale di rischio	Consumo di materie prime (kg/h)
Alternativa 1	8,486	3,25	2,50	95	67,3
Alternativa 2	6,550	2,75	2,13	125	101,0
Alternativa 3	15,623	1,01	0,79	78	31,2
Alternativa 4	4,187	0,50	0,40	55	47,2

Valori di indici ambientali normalizzati rispetto all'alternativa peggiore					
	Consumo di energia	Produzione di rifiuti	Potenziale di tossicità	Potenziale di rischio	Consumo di materie prime
Alternativa 1	0,54	1,00	1,00	0,76	0,67
Alternativa 2	0,42	0,85	0,85	1,00	1,00
Alternativa 3	1,00	0,31	0,32	0,62	0,31
Alternativa 4	0,27	0,16	0,16	0,44	0,47

Valori stabiliti per i fattori di peso utilizzati per l'aggregazione					
	Consumo di energia	Produzione di rifiuti	Potenziale di tossicità	Potenziale di rischio	Consumo di materie prime
W_k	0,22	0,24	0,20	0,10	0,24

Indice aggregato secondo la formula $I_{PC} = \sum_k I_{N,k} W_k$				
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
I_{PC}	0,80	0,81	0,49	0,28
I_{PC} normalizzato	0,99	1,00	0,61	0,35

di vista ambientale è anche quello che assicura un maggiore profitto, perché il miglioramento delle prestazioni ambientali porta a minori spese di trattamento, mino-

re spreco di risorse e maggiore resa di trasformazione delle materie prime in prodotti valorizzabili dal punto di vista economico [1]. Analogamente, il miglioramento della

sicurezza intrinseca, portando all'uso di apparecchiature più piccole, alla riduzione degli stoccaggi, all'utilizzo di impianti più semplici e alla diminuzione delle precauzio-

Process and Product Sustainability: the Need of an Integrated Approach.

ABSTRACT 

Part II: Approach to the Quantitative Assessment

Several key concepts of sustainable development are comprised in the methodologies used for product, process and plant design in the framework of the chemical and process industry. However, the potentialities deriving from an integrated approach to the assessment of technological alternatives are far from being fully exploited. In the following, the more important elements necessary for a quantitative evaluation of sustainability are analyzed.



più corretta valutazione economica aspetti che rientrerebbero tra le cosiddette esternalità ambientali con oneri integralmente a carico della collettività.

Conclusioni

I temi della sostenibilità stanno diventando centrali nello sviluppo tecnologico. In prospettiva, la selezione delle alternative di processo e la progettazione di impianto sono destinate ad essere fortemente condizionate da valutazioni integrate relative ai diversi aspetti della sostenibilità, di cui i principali, legati allo sviluppo di processo, sono la minimizzazione dell'impatto ambientale, la sicurezza intrinseca, l'ottimizzazione delle rese e la riduzione del consumo di risorse non rinnovabili. Alcuni di questi temi sono diventati da anni patrimonio dell'ingegneria di processo, nel cui contesto sono stati sviluppati strumenti di progettazione e verifica delle alternative progettuali ormai consolidati che appartengono alla pratica corrente. Tuttavia, sono evidenti le potenzialità di un approccio integrato che comprenda questi aspetti nell'ambito della valutazione della sostenibilità delle alternative di processo. In questo ambito è evidente la necessità di un approfondito ed incisivo lavoro di ricerca mirato allo sviluppo di strumenti e procedure di analisi integrata da utilizzare in fase sia di scelta progettuale sia di verifica.

ni necessarie alla manipolazione e controllo delle correnti, può risultare in vantaggi economici sia rispetto ai costi delle apparecchiature sia a quelli operativi.

Quanto sopra mette in evidenza come l'attenzione al tema della sostenibilità e l'adozione di comportamenti conseguenti non debbano essere considerate dalle aziende come oneri aggiuntivi ma debbano invece essere integrate tra le variabili strategiche sulle quali basare il proprio sviluppo.

Operare secondo le procedure sopra delineate comporta infatti un'approfondita

considerazione del processo e/o delle caratteristiche del prodotto. Ciò costituisce una rilevante opportunità di promuovere innovazione e inoltre, dando attenzione agli aspetti ambientali e sociali, concorre alla pratica effettiva della responsabilità sociale d'impresa, superando l'ottica più restrittiva attenta soltanto alla considerazione di costi diretti. In questo modo si possono individuare condizioni ottimali anche significativamente diverse da quelle identificabili secondo la logica tradizionale e si riportano all'interno di una

Bibliografia

- [1] S.K. Sikdar, *Environmental Progress*, Dic. 2003, **22**(4), 227.
- [2] S.K. Sikdar, *AiChE Journal*, Ago. 2003, **49**(8), 1928.
- [3] M.A. Gonzales, R.L. Smith, *Environmental Progress*, Dic. 2003, **22**(4), 269.
- [4] D.T. Allen, D.R. Shonnard, *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*, Prentice Hall PTR, 2002.

- [5] D.T. Allen, K.S. Rosselot, *Pollution Prevention for Chemical Processes*, Wiley, 1997.
- [6] J. Venselaar, *Indicators for environment and sustainability*, EFCE Working Party Environmental Protection and Sustainable Development.
- [7] H. Chen *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, **41**, 4503.
- [8] P. Saling *et al.*, *Eco-efficiency Analysis by BASF: the Method, Life Cycle Management*, 2002.