

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 I: principi e strumenti metodologici

Molti elementi alla base del concetto di sviluppo sostenibile sono da anni patrimonio dell'ingegneria di processo. Le potenzialità derivanti da un approccio integrato alla valutazione delle alternative tecnologiche devono però ancora in gran parte essere sfruttate. In questa prima parte sono stati analizzati i principali elementi connessi alla definizione della sostenibilità.

La tematica dello sviluppo sostenibile è una delle sfide più difficili ed importanti a cui rispondere nell'ambito dello sviluppo di processo. Il punto di partenza per l'idea di sviluppo sostenibile è stata la presa di coscienza che le attuali modalità di sviluppo non potranno essere applicate ancora per lungo tempo senza generare un collasso del sistema di produzione a livello globale. L'aumento della popolazione e la richiesta di maggior benessere da parte di questa rischiano di produrre danni irreparabili all'ambiente e generare sempre maggiori iniquità a livello globale. Le risorse naturali del pianeta, che appartengono a tutta l'umanità, sono limitate in quantità e

legate a un proprio tempo caratteristico e ad una propria dinamica di rigenerazione. Tali risorse sono attualmente usate quasi totalmente da una minoranza della popolazione mondiale, creando una iniquità intragenerazionale nel fare fronte ai bisogni presenti. Inoltre l'incremento della velocità di sfruttamento rischia di privare le generazioni future delle risorse necessarie a standard di vita compatibili con quelli attuali dei Paesi sviluppati, generando quindi un'iniquità intergenerazionale.

La definizione di sviluppo sostenibile universalmente accettata è quella che si trova nella pubblicazione "Our Common Future", redatta nell'aprile 1987 dalla *World Commission on Environment and Deve-*

*lopement*, meglio nota come "Brundtland Commission", un gruppo creato dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite: lo sviluppo sostenibile è "lo sviluppo che fa fronte ai bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di fare fronte ai propri". Tale definizione viene, a seconda dei contesti e degli autori, riferita alla globalità degli esseri viventi, umani e non, oppure alla sola popolazione umana. In genere, tuttavia, l'elemento critico è il rapporto uomo-natura e pertanto sono i bisogni umani quelli a cui si fa riferimento.

Lo sviluppo sostenibile può essere visto come interazione di tre elementi fondamentali: sviluppo economico, salvaguardia

ambientale ed equità sociale. Tale combinazione viene detta "triple bottom line". I tre elementi, intrinsecamente collegati tra di loro, devono essere contemporaneamente considerati e valutati per essere realmente perseguiti (Figura 1).

Prendendo in considerazione l'andamento dell'incremento della popolazione, l'incremento dei consumi conseguenti al miglioramento delle condizioni di vita nelle varie parti del mondo e il fatto che i problemi ambientali esistono già oggi, si è stimato che uno sviluppo realmente sostenibile dovrebbe portare a un miglioramento dell'efficienza dell'uso delle risorse, materie prime ed energia, di un fattore 10 [1] o addirittura 20 [2] nei prossimi 50 anni. Per raggiungere questo obiettivo è necessario un radicale cambiamento del sistema: processi, prodotti e modalità organizzativa delle attività economiche totalmente nuovi. Il solo sviluppo della tecnologia e dell'organizzazione produttiva attuale può bastare a ridurre l'impatto ambientale solo nel breve termine; poi, la crescita della popolazione, dei consumi e dell'economia ne annullerà l'efficacia. L'autentico sviluppo sostenibile richiede un nuovo approccio di sistema nel fornire i prodotti e i servizi di cui abbiamo bisogno. Tale scopo non può essere raggiunto solamente attraverso nuove tecnologie, ma anche attraverso un'innovazione culturale, politi-

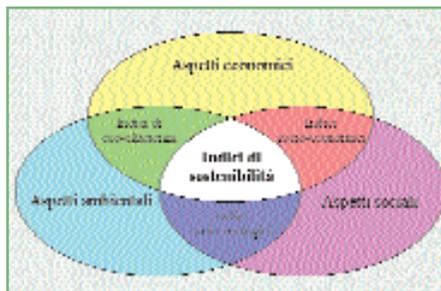


Figura 1 - Rappresentazione grafica dei tre principali aspetti della sostenibilità e delle tipologie di indice rivolte a quantificarli [adattato da 6]

## Tabella 1 - Le strategie del *Design for Environment* (9)

- 1. Sviluppare nuovi concetti** (dematerializzazione, favorire l'uso condiviso di prodotti e servizi, fornire un servizio piuttosto che un prodotto,...)
- 2. Ottimizzare il prodotto** (integrare le funzioni caratteristiche, ottimizzare le funzioni, aumentare affidabilità e durata, facilitare manutenzione e riparazione, realizzare una struttura modulare,...)
- 3. Ottimizzare l'uso di materie prime** (usare materie prime rinnovabili, usare materie prime a più basso contenuto energetico, usare materie prime più "pulite", ridurre l'uso di materie prime, usare materiali riciclati, usare materiali riciclabili,...)
- 4. Ottimizzare le tecniche di produzione** (usare tecniche alternative di produzione, diminuire il numero delle fasi di produzione, prediligere consumi energetici più bassi e a minor impatto ambientale, ridurre la produzione di rifiuti,...)
- 5. Ottimizzare la distribuzione** (impiegare imballaggi in minor quantità e riutilizzabili, usare efficientemente l'energia nella logistica,...)
- 6. Ridurre l'impatto durante l'uso** (diminuire i consumi energetici, utilizzare fonti energetiche più "pulite", diminuire il consumo di risorse durante la fase d'uso,...)
- 7. Prevedere le azioni alla fine della vita utile** (riuso del prodotto, rifabbricazione del prodotto, riciclaggio del materiale, progettare per il disassemblaggio,...)

ca ed economica. In questo processo risulta, pertanto, necessaria la partecipazione e la spinta da parte di varie differenti discipline. La complessità dei problemi ambientali richiede competenze ecologiche, tecniche, legali, economiche, amministrative e sociali; al mutamento tecnologico e industriale è indispensabile affiancare una modifica degli stili di vita degli individui. La sostenibilità si configura pertanto anche come un'etica, una nuova mentalità con cui affrontare, ad ogni livello, le sfide presenti e future dell'umanità.

Un cambiamento così radicale nel modo di agire richiede tempo per essere compiuto e può solamente essere sviluppato passo-passo, affiancandolo, nel breve-medio periodo, con procedimenti più classici di ottimizzazione delle strutture esistenti e con lo sviluppo di nuove tecnologie che consentano di ridurre l'impatto ambientale grazie alla riduzione della produzione di rifiuti e di emissioni inquinanti. Perseguire la sostenibilità si rivela molto

interessante anche dal punto di vista delle aziende, poiché è un mezzo per ottenere il consenso della comunità e per valorizzare il proprio prodotto. Questo è sottolineato dalla diffusione delle certificazioni in materia (*ecolabeling*, certificati ISO 14000 [3], ecc.), dall'adozione di sistemi di gestione ambientale (*Environmental Management Systems*, EMS) e dalla nascita di programmi volontari come il *Responsible Care* dell'ICCA [4] o il CERES (*Coalition for Environmentally Responsible Economies*, nato già nel 1989 [5]).

### I principi della sostenibilità

Le tematiche della sostenibilità possono essere affrontate su diversi livelli di approccio; Sikdar [1, 6] ne individua quattro: temi di interesse planetario, da affrontare, anche dal punto di vista politico, su scala globale (es. distruzione dell'ozono, riscaldamento globale, ecc.); problemi caratterizzati da una dimensione territoriale o di comunità (es. uso del territorio,

**Tabella 2 - I 12 Principi della *Green Chemistry* (Chimica Verde) (10)**

- 1) Prevenzione della formazione di sostanze indesiderate
- 2) *Atom economy*
- 3) Diminuzione dell'uso di sostanze pericolose e della loro generazione in reazioni di sintesi
- 4) Progettazione e sintesi di sostanze più sicure
- 5) Impiego di solventi e sostanze ausiliarie più sicure e in minor quantità
- 6) Miglioramento dell'efficienza energetica dei processi e preferenza di sintesi condotte a temperatura e pressione ambiente
- 7) Uso di risorse rinnovabili
- 8) Riduzione dei derivati non necessari
- 9) Utilizzo di processi catalitici selettivi
- 10) Progettazione di sostanze facilmente degradabili alla fine della loro vita utile
- 11) Prevenzione della formazione di sostanze inquinanti e pericolose attraverso metodi analitici di controllo continuo
- 12) Prevenzione degli incidenti attraverso la sicurezza intrinseca

sistemi di trasporto, ecc.); attività di singole aziende o siti produttivi sia localizzati sia distribuiti (es. relazioni dell'azienda con ambiente e popolazione, processi produttivi puliti e responsabili); analisi e sviluppo di specifiche tecnologie sostenibili (es. uso fluidi supercritici, nuove vie di sintesi, ecc.). La possibilità di affrontare il problema a diversi livelli e gli specifici interessi di ogni settore hanno portato alla redazione di varie raccolte di linee guida sul tema. Alcune di esse sono molto generali (ad esempio l'“*Earth Charter Principles*”,

patrocinata dall'ONU [7]), altre riguardano settori specifici, come ad esempio l'urbanistica (“*Ahwahnee Principles*” [8]). Nel campo industriale si sono fatti strada il concetto di *industrial ecology* per i processi produttivi e di *Design for Environment* per i prodotti (Tabella 1). Per il settore chimico sono stati enunciati i 12 Principi della *Green Chemistry* (Tabella 2), la cui diffusione è stata promossa da associazioni internazionali e nazionali, come, in Italia, il Consorzio Interuniversitario Nazionale la Chimica per l'Ambiente

**Tabella 3 - I 12 Principi della *Green Engineering***

- 1) Perseguire le caratteristiche intrinseche positive
- 2) Prevenire la formazione di rifiuti evitandone il trattamento “end of pipe”
- 3) Ottimizzare tipologia e sequenza delle operazioni di separazione
- 4) Massimizzare l'efficienza dell'utilizzazione di massa, di energia, di spazio e di tempo
- 5) Ottimizzare le condizioni di equilibrio (sistemi *output-driven*)
- 6) Conservare la complessità nelle operazioni di riuso e riciclo
- 7) Progettare per una vita utile prestabilita
- 8) Dimensionare il processo in funzione delle esigenze reali
- 9) Minimizzare la diversità dei materiali nei prodotti multicomponente
- 10) Integrare i flussi materiali ed energetici locali
- 11) Progettare tenendo conto della vita successiva a quella utile
- 12) Utilizzare flussi materiali ed energetici da fonti rinnovabili

(INCA) [11]. Riguardo alla progettazione di processo sono stati formulati i 12 Principi della *Green Engineering* (Tabella 3). Tuttavia il problema della sostenibilità interessa trasversalmente tutti i settori dell'ingegneria, come conferma il documento stilato al termine di una conferenza che ha recentemente coinvolto le quattro principali associazioni professionali di ingegneria degli Stati Uniti (Tabella 4) [13].

### Elementi chiave per l'analisi di sostenibilità di un processo industriale

Gli interventi riguardanti la chimica industriale, l'ingegneria chimica e di processo, pur nella specificità delle varie trattazioni proposte, presentano alcuni importanti elementi in comune, discussi di seguito.

#### Approccio “olistico” all'analisi di sistema

Un primo concetto è quello di approccio di sistema: bisogna sempre considerare ciò che si sta analizzando come parte di un sistema complesso, facendo riferimento a un adeguato orizzonte temporale e spaziale. Un aggettivo spesso usato per descrivere questo genere di analisi è “olistica”.

Considerare un sistema dal punto di vista “olistico” rappresenta un approccio ben diverso da quello tradizionale. Allontanandosi dall'approccio storico delle tecnologie di trattamento “*end of pipe*” nei processi chimici, che si preoccupavano di ricondurre entro i valori limite le emissioni fuori norma attraverso azioni a valle di un processo progettato sovente in base a criteri differenti da quelli ambientali, l'analisi di sistema porta al superamento anche dell'ormai diffusa visione di tutela ambientale in senso restrittivo, limitata cioè a un'operazione o a una specifica fase di

produzione, per arrivare a considerare il processo nella globalità delle interazioni che esso ha con l'esterno e a ottimizzare contemporaneamente aspetti di natura economica, ambientale e di sicurezza. Intimamente legato all'approccio di sistema è il concetto di "ciclo di vita" (*life cycle*) di un prodotto e di un processo (Figura 2). Un prodotto ha una sua vita che si articola attraverso varie fasi (acquisizione materie prime, produzione, distribuzione, uso, smaltimento o riciclo), ognuna delle quali ha i propri scambi di energia e materia con l'ambiente. In una corretta progettazione del prodotto è necessario valutare attentamente gli aspetti riguardanti ciascuna fase del ciclo di vita, in relazione agli impatti che essi possono determinare (es. pericolosità, consumo energetico, manutenzione, destino dopo l'uso ecc.). Analogamente anche il processo ha un proprio ciclo di vita che si articola in varie

fasi (ricerca e sviluppo, progettazione, realizzazione, funzionamento, smantellamento e bonifica sito) e che si intreccia con quello del prodotto nella fase di produzione. Il ciclo di vita del processo produttivo non costituisce solo una parte del ciclo del prodotto, ma, visti gli ingenti investimenti richiesti e la possibilità di evoluzione nel tempo per produrre anche prodotti diversi, merita uno studio autonomo.

Una sistematica analisi del ciclo di vita dei prodotti è quella delineata dalle strategie del *Design for Environment* [9], che suggeriscono per ogni fase gli elementi da valutare e le possibilità di miglioramento. Benché l'analisi sia qui esplicitamente congegnata per i prodotti dell'industria



Figura 2 - Schema delle diverse fasi del ciclo di vita di un processo e di un prodotto, che evidenzia la loro interazione reciproca e nei confronti dell'esterno [adattato da 16]

manifatturiera, molti di questi concetti sono facilmente estendibili anche al settore chimico.

Un ciclo di vita può essere analizzato con diversi gradi di dettaglio, che vanno da analisi quantitative dettagliate a semplici schemi qualitativi, che forniscono un'idea dei tipi di impatto presenti; differenti approcci sono appropriati per esigenze diverse e, soprattutto, richiedono differenti informazioni e dati di partenza, nonché differenti tempi, per essere sviluppati. In generale ci si riferisce a questo tipo di analisi come LCA (*life cycle assessment*). Il LCA propriamente detto è la forma più dettagliata dello studio del ciclo di vita, che si articola nella determinazione di quali siano i confini e gli scopi dell'analisi, quali i flussi materiali ed energetici entranti e uscenti da ogni fase della vita, quali impatti determinino e nell'individuazione di quale sia la preferibile tra varie alternative e possibilità di miglioramento [14-16]. Forme più semplificate, che risultano in valutazioni semiquantitative o addirittura qualitative, possono essere utilizzate nelle fasi iniziali di progetto e in quelle situazioni in cui l'enorme quantità di dati e il tempo necessari a uno studio di dettaglio non siano disponibili [17].

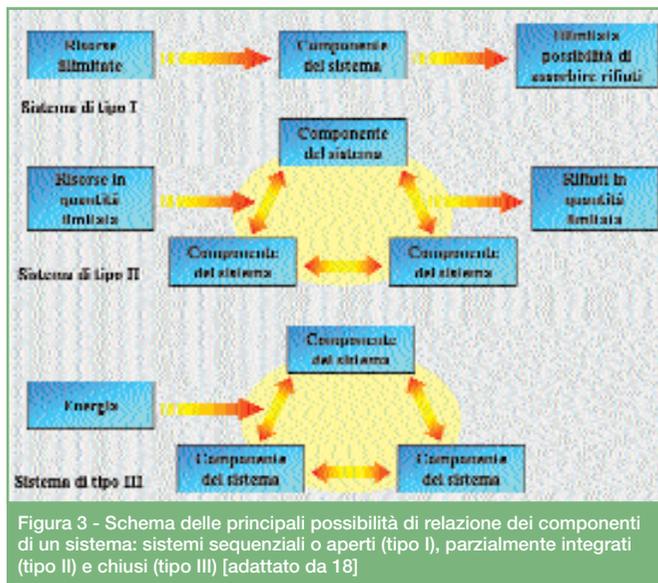
## Tabella 4 - I 9 Principi della Green Engineering

La *Green Engineering* si propone di trasformare le discipline e le pratiche dell'ingegneria esistente in maniera da promuovere la sostenibilità.

La *Green Engineering* associa nell'attività dell'ingegneria lo sviluppo e l'applicazione di prodotti, processi e sistemi tecnologicamente ed economicamente validi e in grado di incrementare il benessere dell'umanità, con la contemporanea salvaguardia della salute umana e della vita della biosfera.

Per l'attuazione della *Green Engineering*, gli ingegneri si fanno guidare dai seguenti principi:

- 1) Progettare processi e prodotti in maniera "olistica", attraverso l'analisi di sistema e l'uso di strumenti di valutazione dell'impatto ambientale
- 2) Conservare e valorizzare gli ecosistemi naturali proteggendo al tempo stesso la salute e il benessere dell'uomo
- 3) Considerare l'intero ciclo di vita in tutte le attività di ingegneria
- 4) Assicurare che tutti i flussi materiali ed energetici siano il più possibile intrinsecamente sicuri e non dannosi
- 5) Minimizzare l'esaurimento delle risorse naturali
- 6) Prevenire la formazione di rifiuti
- 7) Sviluppare e realizzare soluzioni nel rispetto della geografia, cultura e aspirazioni del luogo
- 8) Creare soluzioni innovative con più elevate caratteristiche di sostenibilità
- 9) Coinvolgere attivamente le comunità e gli stakeholders nello sviluppo delle soluzioni.



## L'ecologia industriale

Come si è visto, ciascun elemento di un sistema, in ogni fase del suo ciclo di vita, scambia necessariamente materia ed energia con l'ambiente circostante. In particolare, lo scambio può avvenire con altri elementi di altri sistemi o del medesimo, aprendo la strada al concetto di integrazione che si basa sul collegare tra loro elementi che abbiano richieste ed esigenze complementari, così da soddisfarle per entrambi, diminuendo la necessità di scambi con l'ambiente naturale.

A livello di integrazione tra processi industriali, anche di natura differente, questa possibilità è analizzata dall'"ecologia industriale" (*industrial ecology*), disciplina che si propone di progettare e sviluppare le relazioni tra i vari processi, in similitudine agli ecosistemi naturali [18]. In questi ultimi, infatti, gli scambi materiali ed energetici tra organismi differenti vengono a realizzare un ciclo chiuso, in cui ognuno sfrutta i prodotti di qualcun altro per vivere; l'unica fonte esterna al ciclo è una fonte di energia rinnovabile, in genere quella solare. Si tratta di una forma di equilibrio dina-

mico, regolata da appositi meccanismi di controllo, che hanno avuto modo di svilupparsi in milioni di anni. In maniera simile, ma in tempi ragionevolmente più brevi, si può prospettare di collegare tra loro diverse realtà industriali. Ci si rende infatti conto di come non sia possibile lavorare secondo una logica che preleva dall'ambiente materie

prime non rinnovabili, soggette pertanto ad esaurimento, e produce, a fianco dei prodotti desiderati, dei rifiuti che vanno ad accumularsi nell'ambiente (Figura 3). L'integrazione tra diversi processi produttivi è una condizione che, benché conveniente dal punto di vista economico ed ambientale, presenta particolari difficoltà di realizzazione: i processi produttivi risultano infatti fortemente legati e interdipendenti tra loro e pertanto suscettibili di mutue influenze sugli andamenti di mercato dei loro prodotti, delineando un quadro intrinsecamente non stazionario di rapporti e pertanto difficile da gestire.

Il più famoso e documentato esempio di realizzazione di un ecosistema industriale è quello di Kalundborg, in Danimarca, dove una centrale elettrica, una raffineria, varie industrie (biotecnologiche, produzione cartongesso, produzione acido solforico, cementifici, ecc.) e attività agro-alimentari e civili (serre, itticultura, teleriscaldamento) sono collegate da una rete di scambi di materia ed energia [16, 18].

Deve comunque essere sottolineato che nel settore dell'industria chimica, sia pure

per finalità diverse da quelle ambientali, il concetto di integrazione è già abbastanza diffuso, sia all'interno di un singolo processo (tipicamente integrazione energetica), sia tra processi differenti (poli chimici e aree chimiche integrate). L'esperienza dimostra che i risultati dell'integrazione, quando non abbinati ad altri elementi, quali l'intensificazione e la minimizzazione (vedi Tabella 5), non sempre sono positivi, in quanto comportano un'accentuazione della pressione ambientale in un'area limitata.

## La minimizzazione della produzione di rifiuti e residui

Tra gli aspetti importanti dell'integrazione c'è l'eliminazione dei rifiuti: il rifiuto è tale non per qualche sua qualità intrinseca, ma perché non riesce a trovare un qualche impiego in un altro processo (deve essere però sottolineato che questo non è sempre riconosciuto dalle norme vigenti nella UE e quindi in Italia). Pertanto il rifiuto, anche se correttamente inertizzato, è destinato ad accumularsi nell'ambiente, rappresentando uno spreco, tanto più se erano state utilizzate materie prime non rinnovabili nel processo che ha portato alla sua produzione. Trovare un utilizzo per ogni genere di potenziale rifiuto prodotto, attraverso l'integrazione, è una via equivalente ad eliminarlo. L'altra via, più radicale, è appunto quella della vera e propria eliminazione dei rifiuti generati in fase di produzione, attraverso una modifica o un cambiamento di processo.

Per i processi chimici, ciò può essere perseguito a livello di chimismo di reazione con l'adozione di percorsi di reazione che portino alla formazione di meno co- e sottoprodotti possibili. Ci si riferisce a questa pratica con il nome di *atom economy*, in quanto ciò a cui si mira è ritrovare nel prodotto finale desiderato la maggior quantità possibile degli atomi alimentati inizial-

mente al processo; bisogna notare come questo bilancio si riferisca non solo ai reagenti utilizzati, ma anche a tutte le altre sostanze utilizzate come solventi o ausiliari per condurre il processo e in un qualche modo deteriorati o consumati dal medesimo. Un esempio di ricerca in questo settore è lo sviluppo di reazioni che seguano un meccanismo di addizione.

Passando dai rifiuti generati in fase di produzione a quelli derivanti dalla fine della vita utile di un prodotto, si nota come il recupero e la possibilità di riciclo o riuso siano elementi fondamentali per la riduzione o l'eliminazione. Ritorna qui, ancora una volta, il concetto di analisi globale del ciclo di vita, in quanto queste fasi finali devono essere tenute in considerazione, attraverso opportune scelte che le rendano possibili e le favoriscano, fin dal momento della progettazione.

### Il problema del "risk shift"

Deve essere ricordato che, nell'analisi di sostenibilità, l'impatto ambientale di un prodotto o di un processo è solo uno dei fattori da analizzare. Infatti, in una visione che considera un sistema nella sua globalità, bisogna prevenire anche il fenomeno dello "spostamento del pericolo" (*risk shift*). Il termine, nato in riferimento a problematiche di sicurezza, indica la possibilità che azioni volte alla diminuzione della pericolosità di un elemento di un sistema complesso, si ripercuotano in un aumento di pericolosità di altri elementi del sistema, così da vanificare o, addirittura,

Tabella 5 - Le 5 parole chiave della sicurezza intrinseca	
-	<b>Intensificazione (o minimizzazione):</b> ridurre l'"inventario" di sostanze pericolose
-	<b>Moderazione:</b> riduzione della severità delle condizioni operative
-	<b>Sostituzione:</b> uso di materiali o processi più sicuri
-	<b>Semplificazione:</b> riduzione delle possibilità di errore e malfunzionamento
-	<b>Limitazione:</b> riduzione degli impatti potenziali di eventi incidentali credibili

rendere controproducenti gli sforzi fatti. Il fenomeno può riguardare vari aspetti di impatto, anche di natura diversa. Ad esempio, la riduzione o l'eliminazione dei solventi nelle reazioni di sintesi, finalizzata alla riduzione dell'impatto e del rischio ambientale del processo, rientra tra i principi della *Green Chemistry*. Tuttavia, se la sintesi avviene con generazione di calore, la riduzione o l'eliminazione del solvente, che si traduce in una riduzione dell'inerzia termica del sistema in reazione, provoca una maggiore criticità del processo dal punto di vista del controllo della temperatura, che, a sua volta, causa un aumento del rischio di *runaway* termico del sistema e quindi una minore sicurezza del processo.

### Analisi del complesso delle caratteristiche intrinseche di un prodotto o di un processo

Un altro degli elementi chiave della sostenibilità, strettamente legato al problema del *risk shift* nell'ambito dell'analisi integrata di processo o di prodotto, è la conside-

razione complessiva dell'insieme di tutte le singole caratteristiche intrinsecamente proprie (*inherency*) di un elemento del sistema. Ogni elemento, infatti, possiede varie caratteristiche e proprietà a causa della sua stessa natura; nell'analisi o progettazione di un sistema bisogna tenere conto di tutte queste caratteristiche, preferendo quelli caratterizzati solamente da proprietà desiderabili e vantaggiose ed evitando o limitando le proprietà in grado di generare inconvenienti. Le iniziative volte, ad esempio, a realizzare un processo che non produca rifiuti (es. *atom economy*) possono essere viste nell'ottica della realizzazione di un processo dalle buone proprietà intrinseche.

Analogamente, la progettazione di un prodotto effettuata tenendo conto di tutte le fasi del processo produttivo e, più in generale, della sua intera vita, nonché orientata a conferire caratteristiche tali da favorirle, presenta interessanti proprietà intrinseche. Per un prodotto manifatturiero questo può essere il caso di una struttura che, oltre a soddisfare le necessità dell'utente, per-

## Process and Product Sustainability: the Need of an Integrated Approach Part I: Principles and Methodological Approach

ABSTRACT 

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 definition and the key issues of sustainability are reviewed.

metta una facile manutenzione o favorisca lo smontaggio per il riciclo alla fine della vita utile. Per un processo chimico caratteristiche intrinseche positive possono essere, ad esempio, identificate come quelle di una data specie chimica che, per sue proprietà peculiari, faciliti i processi di separazione o aumenti la selettività di una reazione.

### Sicurezza intrinseca

Uno dei più importanti aspetti legati alle caratteristiche intrinseche è quello della "sicurezza intrinseca" (*inherent safety*). Un sistema o processo può risultare sicuro, o perché non presenta particolari pericoli (potenzialità di provocare danni), o perché, pur presentandoli, essi sono tenuti sotto stretto controllo in modo tale da risultare in un rischio (probabilità che si realizzi un danno) accettabile. Quest'ultimo è un approccio più tradizionale, che tenta di gestire il pericolo attraverso sistemi di protezione che innalzano una difesa tra di esso e l'ambiente circostante, così da

ridurre la probabilità di un incidente e l'entità del suo impatto, qualora esso si verifichi. Se per un qualche evento (guasto, errore umano, catastrofico evento naturale, ecc.) il sistema di controllo e protezione viene meno, il pericolo ha la possibilità di concretizzarsi in un incidente.

L'approccio della sicurezza intrinseca è di tipo differente: la caratteristica di assenza o ridotto pericolo è proprietà intrinseca del sistema e, in quanto tale, non può venire meno. Adottare la sicurezza intrinseca è un modo d'agire preventivo, in confronto a quello reattivo del controllo a posteriori.

Un esempio significativo di sicurezza intrinseca è il paragone tra uno stoccaggio fuori terra ed uno stoccaggio tumulato di GPL in pressione: mentre nel primo tipo di stoccaggio è necessaria l'adozione di numerosi sistemi di prevenzione e mitigazione per evitare la possibilità di "BLEVE" in caso di incendio esterno, nel secondo tipo di stoccaggio questo evento incidentale catastrofico semplicemen-

te non può verificarsi a causa della diversa progettazione del sistema.

Il perseguimento della sicurezza intrinseca, che, nel settore chimico, riguarda sia il processo produttivo sia le sostanze impiegate, deriva da un'opportuna selezione delle sostanze medesime, delle condizioni di processo e delle operazioni eseguite (Tabella 5), poiché sono proprio questi fattori a poter risultare intrinsecamente pericolosi. A livello molecolare si può, ad esempio, agire sui gruppi funzionali presenti, tentando di eliminare quelli di cui sono noti gli effetti di tossicità o creando sostanze maggiormente biodegradabili. A livello di processo si possono studiare meccanismi che richiedano condizioni operative il più simili possibile a quelle ambientali o che richiedano quantità ridotte di solventi. Bisogna tuttavia sempre rammentare che, nel compiere questi miglioramenti, è necessario considerare il sistema nella sua globalità ed evitare fenomeni di *risk-shift*.

### Bibliografia

- [1] S.K. Sikdar, *Environmental Progress*, 2003, **22**(4), 227.
- [2] J. Venselaar, Introduction on available and new tools for environmental integration in process design and operation of industrial plants, EFCE WP Environmental Protection, Workshop Environmental Integration in Industrial Plants, Rome 24/03/2000.
- [3] <http://www.iso.org>
- [4] <http://www.responsiblecare.org>
- [5] The CERES Principles (<http://www.ceres.org/about/principles.html>)
- [6] S.K. Sikdar, *AIChE Journal*, 2003, **49**(8), 1928.
- [7] <http://www.earthcharter.org>
- [8] <http://www.lgc.org>
- [9] Design for Environment guide, <http://dfe-sce.nrc-cnrc.gc.ca/>
- [10] M.A. Gonzales, R.L. Smith, *Environmental Progress*, 2003, **22**(4), 269.
- [11] <http://venus.unive.it/inca/>
- [12] P.T. Anastas, J.B. Zimmerman, *Environmental science & technology*, 1 Mar 2003, 94.
- [13] M.A. Abraham, N. Nguyen, *Environmental Progress*, 2003, **22**(4), 233.
- [14] <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>
- [15] T.E. Graedel, B.R. Allenby, *Industrial ecology*, AT&T, 2003, 2<sup>nd</sup> Ed.
- [16] D.T. Allen, D.R. Shonnard, *Green Engineering: Environmentally conscious design of chemical processes*, Prentice Hall PTR, 2002
- [17] T.E. Graedel, *Streamlined life-cycle assessment*, Prentice Hall, 1998, 1<sup>st</sup> Ed.
- [18] A. Garner, G.A. Keoleian, *Industrial Ecology: an introduction*, University of Michigan, 1995.
- [19] D.W. Edwards, D. Lawrence, *Trans IchemE*, 1993, **71**, Part B, .