



---

## PIANIFICAZIONE DEL DISASSEMBLAGGIO DI SISTEMI MECCANICI: APPROCCIO MEDIANTE ALGORITMI GENETICI

Giovanna Fargione, Fabio Giudice

DIIM, Università di Catania, [gfargion/fgiudice]@diim.unict.it

### Sommario

Il disassemblaggio si rende necessario ogni qualvolta sia opportuno procedere con la rimozione di componenti appartenenti a un sistema costruttivo. Nell'ambito dei nuovi approcci progettuali orientati alla qualità ambientale dei prodotti (*Green Design*), in particolare, una efficace pianificazione delle operazioni di smontaggio occupa un ruolo strategico, in quanto può incidere sia sulla fase di utilizzo del prodotto, facilitando gli interventi di servizio (manutenzione e riparazione), sia sulla fase di fine vita, favorendo le operazioni di riciclo dei materiali e riutilizzo dei singoli componenti.

Il presente lavoro propone un approccio alla pianificazione del disassemblaggio (*Disassembly Process Planning*) tale da supportare la ricerca della sequenza di smontaggio ottima in relazione ad entrambi gli aspetti, quello manutentivo e quello di recupero delle risorse a fine vita. Con questi obiettivi sono stati sviluppati due prototipi di algoritmi risolutivi per l'ottimizzazione dello smontaggio, in relazione ai due casi distinti. Nonostante le diverse finalità, i due prototipi hanno in comune la tipologia di modellazione, e la struttura secondo la quale sono sviluppati gli algoritmi di ricerca, di tipo genetico. Il secondo strumento, in particolare, affronta il problema del disassemblaggio mediante un approccio completo, affiancando valutazioni economiche e di impatto ambientale, e estendendo tali valutazioni all'intero ciclo di vita. Inoltre esso è in grado di definire sia la profondità di smontaggio da raggiungere, che il piano di recupero ottimo (cioè la destinazione migliore per ogni componente).

*Parole chiave: Green Design, Disassemblaggio, Servizio, Recupero, Algoritmi Genetici*

### 1. Introduzione

Nell'ambito dello sviluppo di prodotti industriali, negli ultimi tempi si è diffuso un approccio alla progettazione orientato alla qualità ambientale dei prodotti, noto come *Green Design (GD)* o *Design for Environment (DFE)* [1]. Secondo questo nuovo approccio le scelte progettuali non devono essere guidate esclusivamente dalle prestazioni funzionali richieste, e da criteri di economicità, ma anche da prestazioni ambientali del prodotto, come l'ammontare delle risorse impiegate per produrlo, e l'impatto ambientale correlato all'intero ciclo di vita.

Tra le varie problematiche trattate nell'ambito del *Green Design*, il disassemblaggio ottimale dei sistemi costruttivi occupa un ruolo strategico. Esso infatti può incidere sia sulla fase di utilizzo del prodotto, facilitando le operazioni di servizio (manutenzione e riparazione), sia sulla fase di fine vita, favorendo le operazioni di riciclo dei materiali e riutilizzo dei singoli componenti. Il disassemblaggio dei prodotti quindi si rende necessario ogni qualvolta sia opportuno procedere con la rimozione di sottoassiemi o di singoli componenti appartenenti

agli stessi prodotti. Le finalità del disassemblaggio ottimo, nell'ottica della salvaguardia ambientale, sono allora riassumibili come segue [2]:

- recupero di parti, componenti e subassemblati riutilizzabili in nuovi prodotti;
- recupero di materiali riciclabili;
- rimozione di componenti o materiali pericolosi o tossici;
- accessibilità a parti o componenti che possono essere soggette ad operazioni di servizio (riparazione, manutenzione, diagnostica).

In linee generali, per migliorare il processo di disassemblaggio di un prodotto si può intervenire a due differenti livelli [3]:

- in fase di progetto, operando le scelte che possono favorire lo smontaggio del sistema costruttivo (in questo caso si parla di *Design For Disassembly - DFD*);
- cercando di pianificarne e ottimizzarne al meglio il processo di smontaggio dell'assemblato (in questo caso si parla di *Disassembly Process Planning - DPP*).

## 2. Pianificazione del disassemblaggio

In linea generale, la pianificazione del disassemblaggio (*Disassembly Planning*) comprende tutte le problematiche relative allo smontaggio degli assemblati [4]: vincoli e direzioni di smontaggio, movimentazione dei componenti, condizioni di collisione, generazione e ottimizzazione delle sequenze di smontaggio (*Disassembly Sequencing*), analisi del livello ottimo di disassemblaggio (*Optimal Disassembly Level*).

In letteratura sono reperibili valutazioni di massima sulle curve di costo e profitto degli interventi di smontaggio finalizzati alla riparazione e al recupero a fine vita [5]. Secondo tali valutazioni i costi di disassemblaggio diventano proibitivi con l'aumentare della profondità di smontaggio. I ricavi invece, a partire da una certa profondità di smontaggio, tendono a stabilizzarsi. Conseguentemente la curva di profitto (data dalla differenza delle due curve precedenti) ha un punto di massimo, dopo il quale tende a decrescere all'aumentare della profondità di smontaggio. Il profitto del recupero può essere fortemente migliorato se l'architettura del prodotto è tale che in corrispondenza dei primi smontaggi vengano liberate le parti più critiche, o di maggior valore [6]. A parità di tipologia dell'architettura di prodotto, la funzione di profitto dello smontaggio è sensibile all'efficienza della sequenza di disassemblaggio, che se ottimizzata può consentire di ridurre tempi e costi.

In definitiva la pianificazione del disassemblaggio si articola nei seguenti punti principali:

- analisi delle caratteristiche dell'assemblato;
- generazione delle possibili sequenze di smontaggio;
- determinazione delle sequenze e della profondità di smontaggio più efficienti.

### 2.1. Panoramica generale sullo stato dell'arte

I primi approcci al problema della pianificazione del disassemblaggio sono stati sviluppati sulla base delle conoscenze maturate in precedenza in relazione ai problemi legati all'assemblaggio. Tali approcci partivano dall'assunto che le sequenze di smontaggio potevano essere assimilate a sequenze di assemblaggio inverse. Successivamente diversi autori hanno messo in evidenza le profonde differenze esistenti tra i due problemi (principalmente la non completa reversibilità dei processi di assemblaggio, e la necessità di

prevedere il più delle volte disassemblaggi selettivi o comunque parziali), delineando la necessità di trattare la pianificazione del disassemblaggio in maniera specifica e più appropriata [4]. In questa nuova ottica nell'ultimo decennio sono stati proposti un tale numero di approcci al problema da rendere necessari anche diversi tentativi di classificazione [4][7]. In particolare sono stati messi in evidenza: le differenze nelle finalità dello smontaggio (manutenzione e servizio, rimozione e recupero a fine vita); le differenze nella modellizzazione del disassemblaggio, nella generazione delle sequenze di smontaggio, nei metodi di ricerca della soluzione ottima.

Come già evidenziato in precedenza, in termini ambientali, e in relazione alle fasi del ciclo di vita di un prodotto, il disassemblaggio è un'operazione di grande importanza, perché funzionale sia alla fase di utilizzo (come supporto alle operazioni di manutenzione e servizio), sia alla fase di fine vita (come supporto alle operazioni di recupero e dismissione).

Per quel che riguarda il primo aspetto, quello legato alle operazioni di servizio, la letteratura presenta diversi approcci [8][9], accomunati da un criterio di ricerca della sequenza di smontaggio ottima che si basa sulla minimizzazione dei costi, ma che si differenziano nelle tipologie di modelli utilizzati per rappresentare gli smontaggi (generalmente modelli grafici).

La successiva introduzione del secondo aspetto, legato alle operazioni di recupero e dismissione a fine vita, ha richiesto un'estensione del problema della pianificazione del disassemblaggio, che deve ricercare sequenze di smontaggio ottime non solo dal punto di vista strettamente economico, ma anche da quello dell'impatto ambientale della fase di fine vita [3]. Ciò ha condotto all'introduzione del concetto di piano di recupero (*Recovery Plan*), basato su una valutazione quantitativa del valore a fine vita di un prodotto, in base alle sue potenzialità di riutilizzo, remanufacturing, riciclo dei materiali [10]. Oltre queste esperienze, che per rappresentare i processi di smontaggio utilizzano tutte modelli grafici, altre tendono ad una modellazione matematica analitica, che pur partendo da grafici componenti-giunzioni, arrivano ad introdurre rappresentazioni matriciali per esprimere le precedenze di smontaggio dei componenti (*Disassembly Precedence Matrices*) [11]. E' possibile allora sviluppare sequenze di smontaggio ottime sulla base di un'analisi molto più dettagliata rispetto a quelle consentite dai modelli grafici, e avere una integrazione diretta con la modellazione CAD.

## 2.2. Applicazione di strumenti dell'intelligenza artificiale

Come evidenziato, estendere il problema della pianificazione del disassemblaggio, contestualizzandolo nell'ambito del ciclo di vita del prodotto, comporta un sensibile incremento delle informazioni da elaborare e della complessità delle prestazioni da ottimizzare. Per fronteggiare la maggiore complessità del problema che ne consegue, si è pensato di ricorrere ad alcuni strumenti dell'intelligenza artificiale [4]: reti neurali, logica fuzzy, algoritmi genetici. In particolare quest'ultima risorsa è stata applicata in virtù della sua caratteristica di lavorare con efficienza su ampi spazi di ricerca, e determinare soluzioni prossime alla ottima. A tale proposito alcune esperienze risultano di particolare interesse [12][13], benché in esse si possano riscontrare approcci al problema di tipo convenzionale, da cui il lavoro proposto si differenzia nei diversi aspetti che saranno evidenziati a seguire.

## 3. Obiettivi e approccio al problema

La grande varietà dei metodi presenti in letteratura è strettamente correlata a problemi specifici che di volta in volta i vari autori si sono prefissati di risolvere, ed è generalmente accomunata da una visione ridotta del problema ambientale, che viene trattato limitandosi a tradurre gli aspetti ambientali in costi economici, e circoscrivendo l'analisi alla sola fase di

fine vita. Con chiaro riferimento a queste considerazioni, il presente lavoro propone un approccio alla pianificazione del disassemblaggio caratterizzato da:

- una modellazione di tipo matriciale, basata sull'analisi delle geometrie dei componenti e delle relazioni di giunzione, in modo da poter facilitare un interfacciamento diretto con la convenzionale modellazione CAD degli assemblati;
- una struttura del codice di calcolo che possa supportare la ricerca della sequenza di smontaggio ottima in relazione ad entrambi gli aspetti ritenuti più significativi (interventi di servizio e pianificazione del recupero a fine vita).

I due diversi aspetti richiedono una distinzione tra due differenti tipologie di disassemblaggio:

- disassemblaggio selettivo, in cui l'obiettivo è lo smontaggio di uno o più componenti prefissati a priori (approccio finalizzato agli interventi di servizio);
- disassemblaggio parziale/completo, in cui i componenti da smontare non sono prefissati, ma definiti dallo stesso algoritmo di ricerca, sulla base di alcune proprietà che caratterizzano i componenti (approccio finalizzato agli interventi di recupero).

Con questi obiettivi sono stati sviluppati due prototipi di algoritmi risolutivi per l'ottimizzazione dello smontaggio, in relazione ai due casi distinti. Nonostante le diverse finalità, i due prototipi hanno in comune la tipologia di modellazione su cui operano, e la struttura secondo la quale sono sviluppati gli algoritmi di ricerca. Si evidenzia però che mentre il primo si limita ad un approccio convenzionale al problema (disassemblaggio selettivo ottimizzato mediante minimizzazione dei tempi di smontaggio), il secondo prototipo affronta il problema ambientale del recupero mediante un approccio innovativo, in quanto:

- si basa su un'analisi completa, che affianca funzioni di costo e di impatto ambientale, e estende le valutazioni all'intero ciclo di vita;
- è caratterizzato da una capacità decisionale autonoma sia sulla profondità di smontaggio da raggiungere, che sulla definizione del piano di recupero ottimo (cioè sulla destinazione migliore dei componenti da smontare, in base alle loro proprietà).

#### 4. Impostazione comune degli strumenti proposti

In linea generale, la soluzione matematica completa del problema della generazione delle sequenze di disassemblaggio richiede una mole di calcoli tale da renderne complessa l'esecuzione [2]. Per questo motivo, per raggiungere gli obiettivi prefissati, il lavoro è stato orientato verso la definizione di sequenze di smontaggio quasi-ottime, utilizzando algoritmi di ricerca di tipo genetico [14]. Partendo da questa scelta di base, i due problemi precedentemente evidenziati sono stati affrontati sviluppando due strumenti distinti, che però sfruttando una impostazione comune del codice di calcolo. Esso inoltre, in entrambi i casi elabora uno stesso modello matematico per la descrizione della geometria e delle relazioni tra i vari componenti (mediante matrici di vincolo), in grado di tener conto dei cambiamenti che avvengono nell'assemblato durante il progressivo smontaggio delle singole parti.

In Figura 1 è riportata una schematizzazione comune ad entrambi gli strumenti sviluppati. Essa prevede una modellazione preliminare, che ha lo scopo di tradurre gli assemblati da analizzare in termini matematici, in modo da rendere possibile la successiva elaborazione di queste informazioni da parte dell'algoritmo risolutivo. Quest'ultimo, attingendo anche a una serie di dati raccolti in una sezione database, ricerca la soluzione ottima mediante tre funzioni:

- identificazione del sistema (formalizzazione della soluzione-tipo e definizione della funzione-obiettivo);
- generazione delle possibili sequenze di smontaggio;
- ricerca della soluzione ottima.

A seguire verranno descritti i principali elementi comuni a entrambi gli strumenti. Nelle sezioni successive ne saranno evidenziate le caratteristiche più specifiche.

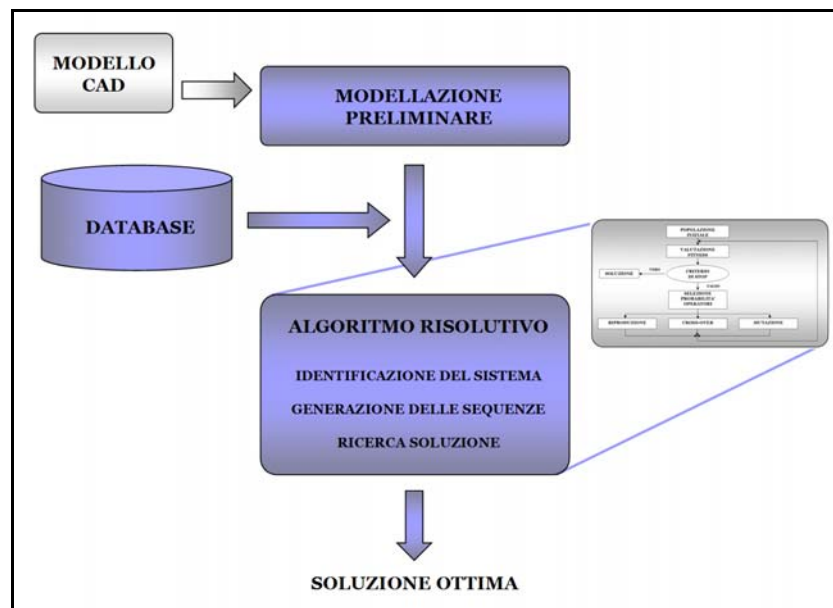


Figura 1. Schematizzazione comune degli strumenti

#### 4.1. Modellazione preliminare comune

Il sistema da smontare viene rappresentato come costituito da un numero finito di elementi indipendenti, rimovibili singolarmente. Si intendono come elementi del sistema:

- i singoli componenti legati al sistema mediante giunzioni reversibili;
- eventuali sottogruppi di componenti legati tra loro mediante giunzioni irreversibili;
- tutte le giunzioni reversibili (viti, snapfit, ecc.).

Questo tipo di impostazione non prevede la possibilità di formare dei sottogruppi di elementi da trattare come unica entità durante la generazione delle sequenze di smontaggio.

Considerando un generico sistema costituito da  $n$  elementi, le proprietà relative ad ogni elemento  $i$ -esimo  $E_i$  sono espresse da un indice che definisce la tipologia dell'elemento. Tale indice consente di distinguere un componente (che per essere rimosso non richiede operazioni particolari se non la semplice traslazione), da una giunzione (che per essere rimossa richiede invece un intervento specifico, e quindi un tempo e un costo maggiore). Indicando con  $n_e$  il numero complessivo di tipologie differenti di elemento, ad ogni indice di tipologia di elemento  $e_j$ , corrispondono dei dati che quantificano la difficoltà di rimozione di ciascun elemento di quel tipo. Per quantificare tale proprietà si è fatto ricorso a valori approssimativi dei tempi di smontaggio, per le categorie più comuni di interventi [15]. E' possibile così associare a ogni tipologia di elemento il tempo medio di smontaggio, e il corrispondente termine normalizzato rispetto all'intervento più semplice (traslazione rettilinea orizzontale).

Sugli elementi così definiti è possibile eseguire operazioni elementari differenti, descritte anch'esse da un indice che esprime la tipologia dell'operazioni di disassemblaggio. Indicando con  $n_o$  il numero complessivo di tipologie di operazione, la distinzione tra le operazioni è semplice, poiché una volta inglobata la diversificazione delle giunzioni nell'analisi degli elementi, le operazioni si riducono esclusivamente a movimenti di traslazione rettilinea (nel caso tridimensionale le traslazioni lungo le direzioni X, -X, Y, -Y, Z, -Z, quindi risulta  $n_o=6$ ). Ad ogni generico indice di tipologia dell'operazione  $o_k$ , corrisponde un tempo di esecuzione dell'operazione, che consiste in definitiva nella traslazione lungo la direzione k-esima. Anche in questo caso i tempi di esecuzione sono normalizzati rispetto alla traslazione orizzontale.

Per quel che riguarda la rappresentazione del sistema costruttivo, la modellazione che si propone è di tipo matriciale, basata sulle caratteristiche geometriche del sistema e sulle conseguenti precedenze di smontaggio tra gli elementi che lo costituiscono. Tale modellazione risulta essere particolarmente semplice, e si riduce alla compilazione di matrici di vincolo binarie, una per ogni possibile direzione di smontaggio. Nel caso di un sistema costituito da n elementi, per la direzione di smontaggio X, tale matrice sarà:

$$V^X = \left[ v_{ij}^X \right]_{\substack{j=1,2,\dots,n \\ i=1,2,\dots,n}} \quad (1)$$

dove il termine  $v_{ij}^X$  è unitario se l'elemento i-esimo ostacola la rimozione dell'elemento j-esimo nella direzione X, altrimenti è nullo. Analogamente è possibile definire le matrici di vincolo spaziale nelle altre direzioni (-X, Y, -Y, Z, -Z).

## 4.2. Sequenza di disassemblaggio e tempo di smontaggio

Utilizzando la modellazione preliminare precedentemente descritta, l'algoritmo risolutivo genererà le possibili sequenze di disassemblaggio in maniera casuale, come sarà spiegato meglio più avanti. Successivamente valuterà la reale fattibilità di ciascuna sequenza basandosi su una semplice regola: per smontare un qualsiasi componente del sistema, occorre iniziare a smontare i componenti più esterni, finché non si arriva all'obiettivo finale. Una sequenza sarà allora costituita da una serie di coppie elemento-operazione, ordinate in modo che siano rispettate tutte le matrici di vincolo del tipo (1). Incominciando a rimuovere gli elementi più esterni, non vincolati, e aggiornando le matrici di vincolo man mano che gli elementi vengono rimossi, si ottengono sequenze di smontaggio correttamente ordinate, cioè realmente fattibili.

Sulla base di questa impostazione della generazione delle sequenze, è possibile definire una funzione che quantifichi la bontà della sequenza. In questa sede se ne propone una che esprime il tempo complessivo necessario al processo di smontaggio, fattore dal quale è strettamente dipendente qualsiasi funzione di costo del disassemblaggio.

Considerando il generico elemento i-esimo  $E_i$ , il suo tempo di smontaggio  $TS_i$  viene definito dalla seguente espressione:

$$TS_i = \sum_{p=1}^{q_i} (tne_p \cdot tno_p + \delta \cdot cd_p) \quad (2)$$

dove la sommatoria è estesa a tutti i  $q_i$  elementi che devono essere rimossi per rimuovere  $E_i$  (il numero complessivo  $q_i$  comprende lo stesso elemento  $E_i$ ). Inoltre:  $tne_p$  è il tempo di smontaggio normalizzato corrispondente alla tipologia dell'elemento p-esimo;  $tno_p$  è il tempo di esecuzione normalizzato corrispondente all'operazione necessaria alla rimozione dell'elemento p-esimo;  $\delta$  è un coefficiente di penalizzazione che tiene conto dell'eventuale cambiamento di direzione di smontaggio passando dalla rimozione dell'elemento  $E_{p-1}$  a quella

dell'elemento  $E_p$  ( $\delta > 1$ );  $cd_p$  è un coefficiente binario che assume valore unitario se tale cambio di direzione avviene, altrimenti assume valore nullo.

### 4.3. Struttura e caratteristiche generali dell'algoritmo risolutivo

Come detto, l'algoritmo risolutivo utilizzato è di tipo genetico, quindi elabora un insieme di punti (individui) del dominio della funzione-obiettivo, detto popolazione. Gli individui sono codificati in strutture che richiamano una configurazione cromosomica [14]. Ad ogni ciclo di esecuzione, o generazione, l'algoritmo applica sugli individui della popolazione gli operatori genetici più comuni: riproduzione, cross-over, mutazione.

Come è noto, dal punto di vista operativo l'algoritmo inizialmente genera una popolazione casuale, valuta la fisicità di ogni individuo (dipendente dal valore assunto dalla funzione-obiettivo), applica gli operatori genetici sugli individui in accordo con la rispettiva fisicità generando una nuova popolazione, e valuta le fisicità della nuova generazione, in base alle quali viene iniziato un nuovo ciclo o viene interrotta l'iterazione dell'algoritmo e individuata la soluzione del problema. Ciò dipende da se si verifica o meno una condizione definita da un criterio di arresto dell'algoritmo. A tale proposito, va evidenziato che in linea generale non sono state provate proprietà formali di convergenza dei genetici verso un valore stabile assunto dalla funzione-obiettivo, e quindi verso l'individuazione della corrispondente soluzione ottima. Per questa ragione si rende necessaria la definizione di un criterio euristico di arresto. Nell'esperienza proposta sono state prese in considerazione due alternative:

- seguendo un approccio convenzionale, sono stati stabiliti a priori un numero massimo di generazioni e un livello di fitness a cui interrompere la ricerca;
- seguendo un approccio basato sul requisito di stabilità delle soluzioni nel corso delle successive generazioni, sono stati introdotti due parametri  $f_1$  e  $f_2$  i cui valori vengono fissati a priori; l'algoritmo si arresta quando la fitness dell'individuo migliore della generazione in esame non si discosta per più una percentuale pari a  $f_1\%$  dalla media dei valori massimi di fitness rilevati nelle ultime  $f_2$  generazioni.

## 5. Sviluppo del primo strumento: Finalità di servizio

Il prototipo è costituito da un algoritmo di tipo genetico implementato per individuare la migliore sequenza di smontaggio per un dato elemento, detto target, di un assemblato. Tale prototipo si limita a individuare una sequenza di operazioni di smontaggio che minimizza una funzione-obiettivo semplice, poiché quantifica i soli tempi delle operazioni di smontaggio.

### 5.1. Modellazione preliminare

Con riferimento alla schematizzazione generale riportata in Figura 1, la modellazione preliminare consiste nella definizione degli  $n$  elementi costituenti il sistema, nella loro numerazione (da 0 a  $n-1$ ), nella loro caratterizzazione in base alla tipologia, e infine nella compilazione delle matrici di vincolo del tipo (1) che descrivono matematicamente il sistema. La caratterizzazione degli elementi avviene mediante la compilazione di un vettore che ne esprime le proprietà:

$$P_{elem} = [p_i]_{i=1,2,\dots,n} \quad (3)$$

Poiché in questo caso l'unica proprietà degli elementi che interessa è la tipologia, risulta essere  $p_i = e_i$ , dove  $e_i$  è l'indice della tipologia corrispondente all'elemento  $i$ -esimo.

Il database del sistema si limita a raccogliere i dati relativi alle tipologie di elementi e di operazioni, cioè in definitiva i valori dei tempi di rimozione e movimentazione relativi rispettivamente alle tipologie degli elementi e delle operazioni di smontaggio.

## 5.2. Identificazione del sistema

Procedendo con l'identificazione del sistema da parte dell'algorithmo risolutivo, la formalizzazione della soluzione-tipo da indagare si riduce a un vettore di numeri interi, costituito da coppie di indici (Figura 2a). Il primo indice corrisponde all'indice  $i$  dell'elemento, secondo la numerazione preliminare. Il secondo corrisponde all'indice di tipologia di operazione  $o_k$ , che deve essere eseguita per rimuovere l'elemento  $i$ -esimo. Per quel che riguarda la funzione-obiettivo, essa coincide con la funzione del tempo di smontaggio espressa dalla (2), calcolata per l'elemento finale della sequenza di smontaggio.

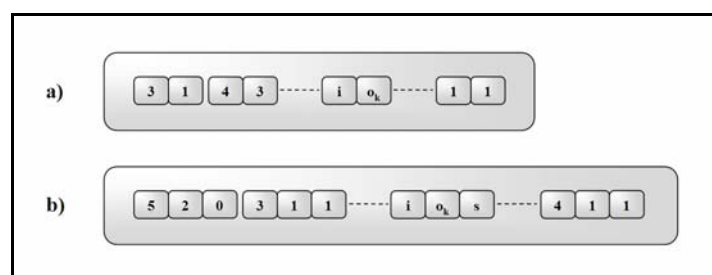


Figura 2. Formalizzazione della soluzione-tipo: a) Disassemblaggio selettivo; b) Disassemblaggio parziale/completo

## 5.3. Generazione delle sequenze di smontaggio e ricerca della soluzione ottima

La generazione delle sequenze di smontaggio è insita nel funzionamento del genetico. Ogni individuo di ciascuna generazione (rappresentato dal vettore-tipo in Figura 2a), anche se generato in maniera del tutto casuale, rappresenta infatti una sequenza di smontaggio potenziale. Se essa rispetta le matrici di vincolo del tipo (1), e quindi risulta essere realmente fattibile, ne viene valutata la fitness, mediante il calcolo del valore assunto dalla funzione-obiettivo. Quando l'algorithmo si arresta, si avrà la soluzione ottima (o quasi-ottima), espressa ancora nella forma di Figura 2a, costituita da una serie di coppie elemento-operazione, opportunamente ordinate. Essa rappresenterà la sequenza di smontaggio fattibile che consente di rimuovere l'elemento target, minimizzando la funzione-obiettivo (tempo di smontaggio).

## 6. Sviluppo del secondo strumento: Finalità di recupero

Verificata l'efficacia del primo prototipo, si è passati allo sviluppo del secondo, affine al primo nello schema generale, nella modellazione di base, e nella procedura di esecuzione. Diversamente dal primo però, questo secondo prototipo, orientato al recupero del prodotto a fine vita, ricerca un disassemblaggio parziale/completo, in cui i componenti da smontare non sono prefissati, ma definiti dallo stesso algorithmo risolutivo. In questo secondo caso quindi il problema viene esteso, poiché oltre la sequenza ottimale di smontaggio si vuole valutare anche quali elementi conviene smontare, e quale destinazione finale assegnargli. A questo scopo occorre introdurre una funzione multiobiettivo che tenga conto non solo dei tempi delle operazioni di smontaggio, ma anche di nuovi fattori:

- le proprietà dei materiali e degli elementi costituenti il sistema;



- la profondità dello smontaggio;
- la destinazione finale dei componenti smontati (che possono essere riutilizzati, riciclati, o smaltiti in discarica).

### 6.1. Modellazione preliminare

La modellazione preliminare è del tutto analoga al primo caso, tranne che per la caratterizzazione degli elementi, che questa volta avviene mediante la compilazione di una matrice, poiché occorre esprimere diverse proprietà per ciascun elemento. Indicando con  $n_p$  il numero di proprietà di cui tener conto, tale matrice si può indicare con:

$$P_{elem} = [p_{ij}]_{\substack{j=1,2,\dots,n_p \\ i=1,2,\dots,n}} \quad (4)$$

dove in linea generale il termine  $p_{ij}$  esprime la proprietà  $j$ -esima dell'elemento  $i$ -esimo.

Nel caso specifico si terrà conto di 6 proprietà differenti ( $n_p=6$ ), così definite:  $p_{i1}$  è l'indice della tipologia corrispondente all'elemento  $i$ -esimo;  $p_{i2}$  è l'indice del materiale costituente l'elemento  $i$ -esimo;  $p_{i3}$  è il peso  $W$  dell'elemento  $i$ -esimo;  $p_{i4}$  è la riutilizzabilità  $\varepsilon$  dell'elemento  $i$ -esimo (assume valore unitario se l'elemento è riutilizzabile, altrimenti nullo);  $p_{i5}$  è il costo di produzione  $C_{prod}$  dell'elemento  $i$ -esimo;  $p_{i6}$  è l'impatto ambientale di produzione  $EI_{prod}$  dell'elemento  $i$ -esimo.

La compilazione della matrice (4) richiede alcune considerazioni. Innanzi tutto occorre valutare il peso di ciascun elemento, il costo di produzione, e l'impatto ambientale associato alla sua produzione (la valutazione di quest'ultimo sarà trattata più avanti). Per quel che riguarda la riutilizzabilità degli elementi, essa dipende dalla durata per cui l'elemento è stato progettato, rapportata alla vita di utilizzo prevista per l'intero prodotto. Una trattazione dettagliata sulla riutilizzabilità dei componenti di un prodotto e sui conseguenti possibili cicli di recupero è stata proposta in precedenza dallo stesso gruppo di ricerca [16].

Infine occorre introdurre un indice che esprima il materiale costituente l'elemento  $i$ -esimo. Scelto un congruo numero di materiali, e associato a ciascuno di essi l'indice che lo individua, è possibile associare ad ogni materiale le seguenti informazioni che lo caratterizzano:

- la frazione riciclabile  $\xi$  (quantifica la riciclabilità del materiale);
- il costo di dismissione  $c_{disp}$ , il costo di riciclo  $c_{rel}$ , il ricavo di riciclo  $r_{rel}$  dell'unità di peso del materiale (termini necessari per le valutazioni di carattere economico);
- l'impatto ambientale di dismissione  $e_{i,disp}$ , l'impatto ambientale di riciclo  $e_{i,rel}$  dell'unità di peso del materiale (termini necessari per le valutazioni di carattere strettamente ambientale).

Conseguentemente, il database del sistema in questo caso deve essere opportunamente esteso. Indicazioni sulle frazioni riciclabili dei più comuni materiali sono reperibili da database già esistenti in commercio. Per quel che riguarda le proprietà di impatto ambientale, invece, espresse dai termini precedentemente introdotti  $e_{i,disp}$  e  $e_{i,rel}$ , esse possono essere valutate utilizzando le tecniche dell'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment – LCA*), metodo di analisi che consente di quantificare gli effetti ambientali associabili a un processo o un prodotto, mediante l'identificazione e quantificazione delle risorse utilizzate, e dei rifiuti generati, e la successiva valutazione dell'impatto dell'uso di queste risorse e delle emissioni prodotte [17]. La quantificazione degli impatti si basa su dati di inventario, successivamente tradotti in ecoindicatori ( $e_i$ ). Gli ecoindicatori utilizzati in questa sede sono valutati secondo il metodo EcoIndicator 99 [18], e calcolati mediante il software SimaPro 5.0.

Con gli stessi strumenti è possibile valutare l'impatto ambientale associato alla produzione di ciascun elemento  $i$ -esimo  $EI_{Prod_i}$ , introdotto nella matrice (4). Esso può essere espresso come

$$EI_{Prod_i} = ei_{mat_i} \cdot W_i + ei_{prss_i} \cdot \mu_i \quad (5)$$

dove:  $ei_{mat_i}$  è l'ecoindicatore per unità di peso del materiale costituente l'elemento  $i$ -esimo (il peso è espresso da  $W_i$ );  $ei_{pcss_i}$  è l'ecoindicatore del processo primario di formatura, per unità di  $\mu_i$ , che può rappresentare il parametro caratteristico di processo.

## 6.2. Funzioni del ciclo di vita

Come già evidenziato in precedenza, lo strumento che si propone affianca alle funzioni di costo delle specifiche funzioni di impatto ambientale, e prevede la possibilità di estendere l'analisi dalla sola fase di fine vita all'intero ciclo di vita del prodotto. Con questa impostazione, pur mantenendo la sua natura di supporto alla pianificazione del disassemblaggio di prodotti preesistenti, esso diventa anche un ottimo strumento di supporto alla progettazione per il disassemblaggio (*Design For Disassembly*) di nuovi prodotti.

Partendo da queste premesse, e rifacendosi ancora agli strumenti di quantificazione degli impatti ambientali introdotti al precedente punto 6.1, dato un sistema costituito da  $n$  elementi, l'impatto ambientale del ciclo di vita dell'elemento  $i$ -esimo  $EI_{LC_i}$  può essere espresso come:

$$EI_{LC_i} = EI_{Prod_i} + EI_{EOL_i} \quad (6)$$

dove il primo termine indica l'impatto ambientale di produzione, espresso dalla (5). Il secondo termine indica l'impatto ambientale di fine vita dell'elemento  $EI_{EOL_i}$ , e può essere a sua volta definito come:

$$EI_{EOL_i} = \alpha_i \cdot (-EI_{Prod_i}) + \beta_i \cdot [ei_{disp_i} \cdot (1 - \xi_i) \cdot W_i + ei_{rel_i} \cdot \xi_i \cdot W_i] + \gamma_i \cdot (ei_{disp_i} \cdot W_i) \quad (7)$$

In questa espressione tutti i termini sono già stati introdotti, tranne i coefficienti binari  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ . Essi dipendono dalla destinazione finale dell'elemento, secondo lo schema riportato in Figura 3. Per ciascun elemento, tali coefficienti sono tutti nulli tranne uno, in modo che a seconda dei casi la (7) quantifichi l'impatto di riutilizzo (primo termine), o di riciclo (secondo termine), o di smaltimento in discarica (terzo termine).

elemento	{	smontato	{	riutilizzo:	$\alpha = 1; \beta = \gamma = 0$
			{	riciclaggio:	$\beta = 1; \alpha = \gamma = 0$
			{	smaltimento:	$\gamma = 1; \alpha = \beta = 0$
		non smontato	{	smaltimento:	$\gamma = 1; \alpha = \beta = 0$

Figura 3. Schema dei coefficienti di pianificazione del recupero

Dal punto di vista analitico i coefficienti  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ , che possiamo chiamare coefficienti di pianificazione del recupero, possono essere espressi in funzione della riutilizzabilità dell'elemento  $\varepsilon_i$ , già introdotta, e di un termine che come si vedrà a seguire costituirà una variabile oggetto dell'ottimizzazione, e che indicherà se è preferibile che l'elemento in esame sia smaltito in discarica o recuperato. Indicando questo termine con l'indice binario  $s_i$ , esso assumerà valore nullo o unitario, a seconda che l'elemento  $i$ -esimo corrispondente venga destinato al recupero o alla dismissione. Si può allora definire:

$$\begin{cases} \alpha_i = \varepsilon_i \cdot (I - s_i) \\ \beta_i = (I - \varepsilon_i) \cdot (I - s_i) \\ \gamma_i = s_i \end{cases} \quad (8)$$

Così espressi, i coefficienti rispettano le condizioni riassunte nello schema di Figura 3. Inoltre se un elemento è da recuperare ( $s_i = 0$ ), tra il riciclo del materiale e il riutilizzo si dà la precedenza a quest'ultimo (il riciclo viene scelto solo quando  $\varepsilon_i$  è nullo).

Per l'intero sistema di  $n$  elementi, è possibile in definitiva esprimere le funzioni di impatto ambientale dell'intero ciclo di vita  $EI_{LC}$ , o della sola fase di fine vita  $EI_{EOL}$ :

$$EI_{LC} = \sum_{i=1}^n EI_{LC_i} \quad EI_{EOL} = \sum_{i=1}^n EI_{EOL_i} \quad (9)$$

Per quel che riguarda le funzioni di costo, analogamente alla (7) è possibile definire il costo di fine vita dell'elemento  $C_{EOL_i}$ :

$$C_{EOL_i} = \alpha_i \cdot (-C_{Prod_i}) + \beta_i \cdot [c_{disp_i} \cdot (I - \xi_i) \cdot W_i + (c_{rcl_i} - r_{rcl_i}) \cdot \xi_i \cdot W_i] + \gamma_i \cdot (c_{disp_i} \cdot W_i) \quad (10)$$

Anche in questo caso valgono le considerazioni qualitative fatte in precedenza per la (7). L'unica differenza formale tra la (10) e la (7) è riscontrabile nel secondo termine. Nella (10) infatti compare il ricavo dovuto al riciclo del materiale, che bilancia il costo di riciclo. Nella (7) non compare alcun termine di recupero di impatto dovuto al riciclo poiché esso è già considerato nel calcolo di  $ei_{rcl}$ .

Per l'intero sistema di  $n$  elementi, è possibile esprimere le funzioni di costo dell'intero ciclo di vita  $C_{LC}$ , o della sola fase di fine vita  $C_{EOL}$ , come:

$$C_{LC} = \sum_{i=1}^n (C_{Prod_i} + C_{EOL_i}) + C_{Dis} \quad C_{EOL} = \sum_{i=1}^n C_{EOL_i} \quad (11)$$

Dalla prima delle (11) si vede che il costo dell'intero ciclo di vita prende in considerazione, oltre ai già definiti costi di fine vita  $C_{EOL_i}$ , anche i costi di produzione di ciascun elemento  $C_{Prod_i}$ , e il costo complessivo dell'intero processo di disassemblaggio  $C_{Dis}$ , che può essere valutato mediante la:

$$C_{Dis} = c_{dis} \cdot (TS_{i^*} \cdot t_{OT}) \quad (12)$$

dove  $c_{dis}$  è il costo di smontaggio per unità di tempo,  $TS_{i^*}$  è il tempo di smontaggio (2) calcolato per l'elemento finale  $i^*$  della sequenza di smontaggio. Poiché questo ultimo termine esprime un tempo normalizzato rispetto all'operazione di traslazione orizzontale, esso deve essere moltiplicato per il tempo reale  $t_{OT}$  di questa operazione di riferimento.

### 6.3. Identificazione del sistema

Per quel che riguarda l'identificazione del sistema, anche in questo secondo caso la formalizzazione della soluzione-tipo da indagare si riduce a un vettore di numeri interi, in questo caso però costituito da terne di indici (Figura 2b). Il primo indice corrisponde ancora all'indice  $i$  dell'elemento, secondo la numerazione preliminare, così come anche questa volta il secondo indice corrisponde all'indice di tipologia di operazione  $o_k$ , che deve essere eseguita per rimuovere l'elemento  $i$ -esimo. Ai primi due indici se ne aggiunge un terzo, l'indice binario  $s$  già introdotto al punto 6.2. A seconda che esso assuma valore nullo o unitario, l'elemento corrispondente viene destinato al recupero o alla dismissione.

Per quel che riguarda la funzione-obiettivo, essa in questo caso è costituita da una funzione multiobiettivo da minimizzare, espressa dalla somma pesata di tre fattori:

- il tempo di smontaggio  $TS$  (2), in cui la sommatoria è estesa a tutti gli elementi disassemblati;
- il costo del ciclo di vita del prodotto  $C_{LC}$ , o il solo costo di fine vita  $C_{EOL}$ , (11);
- l'impatto ambientale del ciclo di vita  $EI_{LC}$ , o il solo impatto di fine vita  $EI_{EOL}$ , (9).

Si avrà in definitiva:

$$\Psi = \varphi_1 \cdot TS + \varphi_2 \cdot C_{LC} + \varphi_3 \cdot EI_{LC} \quad (13)$$

dove  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , sono i coefficienti di peso dei tre fattori ( $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1$ ).

Non essendo tra loro omogenei, i fattori prima di essere introdotti nella (13) devono essere normalizzati. A tal fine, data una soluzione da valutare, basta rapportare il valore assunto da ciascun fattore al valore massimo assunto dallo stesso fattore tra tutte le soluzioni in esame. La soluzione ottima è quella cui corrisponderà il valore minimo della funzione  $\Psi$ .

#### 6.4. Generazione delle sequenze di smontaggio e ricerca della soluzione ottima

Questo secondo strumento sfrutta lo stesso motore evolutivistico del primo. Ogni individuo di ciascuna generazione (rappresentato dal vettore-tipo in Figura 2b), anche se generato in maniera del tutto casuale, rappresenta infatti una sequenza di smontaggio potenziale, tramite i primi due indici di ogni terna, e un piano di recupero potenziale tramite il terzo indice  $s$ . Quando l'algoritmo si arresta, si avrà la soluzione ottima (o quasi-ottima), espressa ancora nella forma di Figura 2b, costituita da una serie di terne elemento-operazione-destinazione, ordinate in modo che siano rispettate le matrici di vincolo.

In questo caso la serie di terne non si fermerà ai soli elementi da smontare, come nel caso precedente, ma li conterrà tutti. Non è detto però che il piano di recupero ottimale preveda lo smontaggio completo del sistema. Infatti come evidenziato più volte lo strumento è stato concepito per definire anche la profondità ottima di smontaggio. Gli elementi che non devono essere smontati saranno quindi individuati dal valore assunto dall'indice di operazione  $o_k$ , che in questo caso indicherà un'operazione aggiuntiva "nulla".

### 7. Simulazioni e analisi dei risultati

Entrambi i prototipi sviluppati sono stati implementati al calcolatore in ambiente Matlab, e testati mediante una campagna di simulazioni su vari assemblati meccanici. Per alleggerire il carico di calcolo, l'indagine è stata condotta in campo bidimensionale, e su assemblati costituiti da un numero complessivo di elementi limitato (10-15). Sulla base dei risultati ottenuti, il primo prototipo si è dimostrato uno strumento efficiente per la ricerca delle sequenze di smontaggio selettivo, giungendo sempre a soluzioni che descrivono sequenze fattibili, e spesso coincidenti con gli ottimi assoluti. Il secondo prototipo fornisce anch'esso soluzioni operativamente fattibili, consentendo inoltre di guidare la pianificazione ottima di smontaggio e recupero, al variare dei pesi che vengono dati all'aspetto economico e ambientale nella definizione della funzione multiobiettivo.

A seguire sono descritti in dettaglio due casi significativi, uno per ciascun prototipo, che riguardano l'analisi di uno stesso assemblato, descritto in Figura 4, costituito da 11 elementi (6 componenti e 5 giunzioni a vite). Poiché il problema è stato ridotto a sole 2 dimensioni, le

possibili tipologie di operazione di smontaggio  $o_k$  in questo caso sono solo le 4 traslazioni lungo X, -X, Y, -Y, più l'operazione nulla. Per ciascuna delle 4 possibili direzioni di traslazione sono state compilate le corrispondenti matrici di vincolo (in figura sono riportate quelle relative alle due direzioni X e Y).

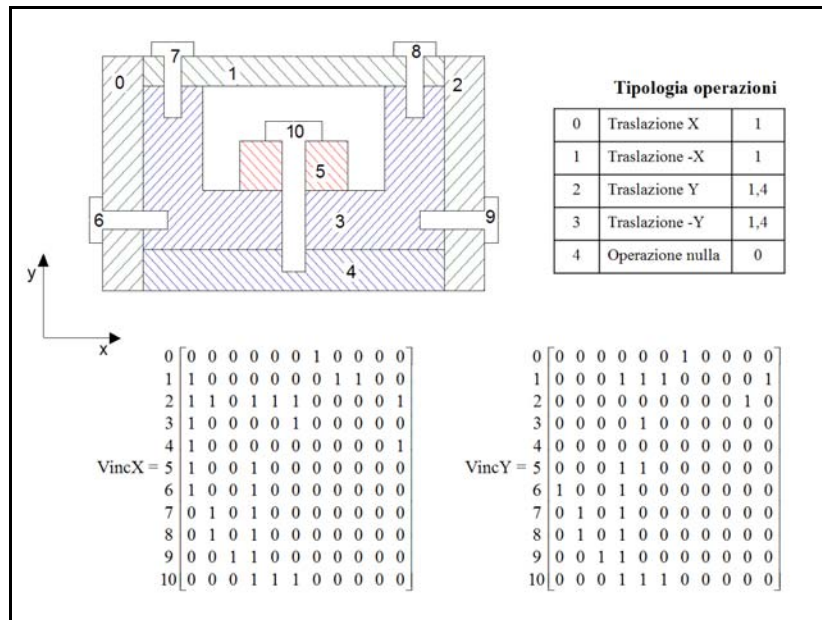


Figura 4. Caso studio: Sistema meccanico

### 7.1. Prototipo 1: Disassemblaggio selettivo

La campagna condotta applicando il primo prototipo su diversi assemblati meccanici ha dato generalmente ottimi risultati. Nel caso in esame, innanzi tutto è stata operata la preliminare caratterizzazione degli elementi, consistente nella compilazione del vettore (3), che associa a ciascun elemento l'indice della corrispondente tipologia. Successivamente sono stati fissati diversi elementi target del disassemblaggio selettivo.

In Figura 5 sono riportati i risultati più significativi, nel caso in cui come target dello smontaggio venga scelto l'elemento 5. Tali risultati riguardano 5 differenti simulazioni condotte su questo assemblato, al variare del numero complessivo di generazioni definite come criterio di arresto dell'algoritmo (rispettivamente 100, 150, 200, 250, 350). Per ogni simulazione sono riportate le soluzioni individuate come ottime, ciascuna costituita da una serie ordinata di coppie elemento-operazione. Come si vede, in tutti i casi le soluzioni descrivono sequenze di smontaggio fattibili. Le simulazioni  $S_2$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ , individuano la soluzione ottima assoluta, che in questo caso è facilmente definibile a priori per la semplicità dell'assemblato. Ad esse corrisponde lo stesso valore della funzione-obiettivo (utilizzata come fitness dell'algoritmo), che coincide con il minimo assoluto (tempo di smontaggio normalizzato  $TS = 29,7$ ). La simulazione  $S_1$  individua una soluzione quasi-ottima, in quanto differisce dalla ottima solo per uno smontaggio non necessario per il target prefissato (prima coppia, evidenziata), che comporta anche un cambiamento di direzione durante la sequenza di smontaggio (indicato dalla freccia arcuata). La simulazione  $S_3$ , infine, individua la soluzione meno efficiente, poiché prevede 2 smontaggi non necessari, e 3 cambiamenti di direzione, con un considerevole incremento del tempo di smontaggio ( $TS = 41,5$ ). Il grafico radar mette a confronto la bontà dei risultati delle simulazioni, evidenziando le 3 simulazioni che hanno individuato l'ottimo assoluto.

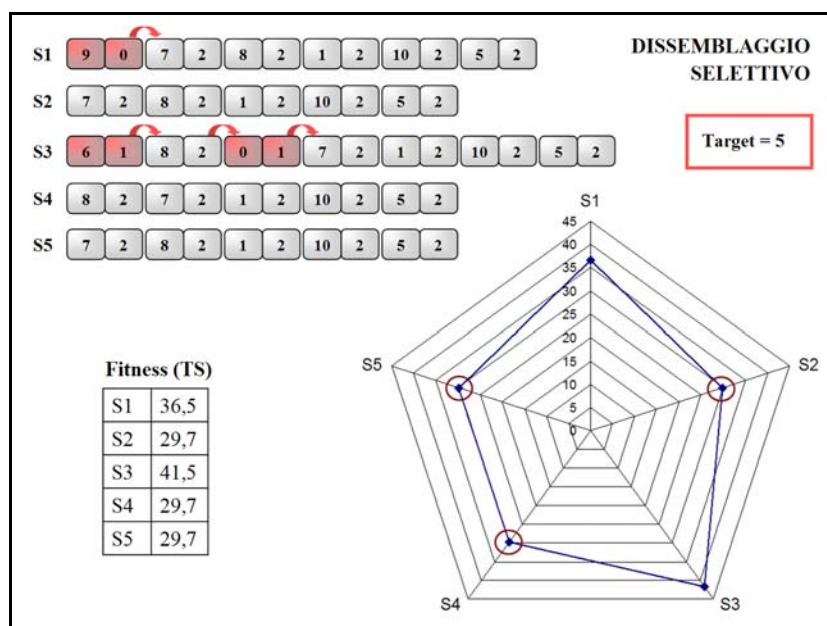


Figura 5. Disassemblaggio selettivo: Risultati della simulazione

## 7.2. Prototipo 2: Disassemblaggio parziale/completo

L'applicazione del secondo prototipo allo stesso assemblato di Figura 4 richiede delle informazioni aggiuntive per la caratterizzazione degli elementi, che consiste nella compilazione della matrice (4). In questo caso come materiali sono stati presi in esame ABS, acciaio, alluminio, e come unici elementi riutilizzabili gli elementi 5 e 10.

In corrispondenza del medesimo assemblato, sono state condotte diverse indagini al variare dei coefficienti di peso della funzione multi-obiettivo  $\Psi$  (13). Poiché però questa volta non era possibile confrontare i risultati con una soluzione ottima assoluta nota a priori, per ciascuna indagine (definita da uno specifico set di coefficienti di peso di  $\Psi$ ), è stata condotta una campagna di simulazioni al variare dei parametri  $f_1$  e  $f_2$ , introdotti al punto 4.3 per parametrizzare il criterio di arresto dell'algoritmo secondo il principio di stabilità delle soluzioni. Unitamente a una verifica sul processo di convergenza delle soluzioni, questa indagine può validare la bontà delle soluzioni individuate dall'algoritmo come ottime.

In Figura 6 sono riportati i risultati più significativi della campagna di simulazione effettuata in corrispondenza di un set di coefficienti di peso uniformi ( $\varphi_1=\varphi_2=\varphi_3$ ), e inserendo nella funzione multiobiettivo costi e impatti dell'intero ciclo di vita. Al variare dei parametri  $f_1$  e  $f_2$ , come soluzioni ottime sono state individuate le due soluzioni riportate in figura.

Ogni soluzione è rappresentata da una serie ordinata di terne elemento-operazione-destinazione, che esprime sia la sequenza di smontaggio, che il piano di recupero. Entrambe le soluzioni suggeriscono di operare uno smontaggio completo (profondità massima), e prevedono per l'intero sistema il medesimo piano di recupero, riassunto nella tabella in figura. E' inoltre interessante evidenziare che:

- le due soluzioni differiscono esclusivamente nell'efficienza della sequenza di smontaggio, poiché la seconda prevede un cambio di direzione in meno, e un conseguente miglioramento sia nel tempo di smontaggio TS (-3,5%), che nel valore finale della funzione  $\Psi$  (-1,5%);

- nonostante gli elementi 0-1-2 siano da destinare alla dismissione (terne evidenziate), conviene comunque smontarli pur di consentire il recupero degli altri elementi.

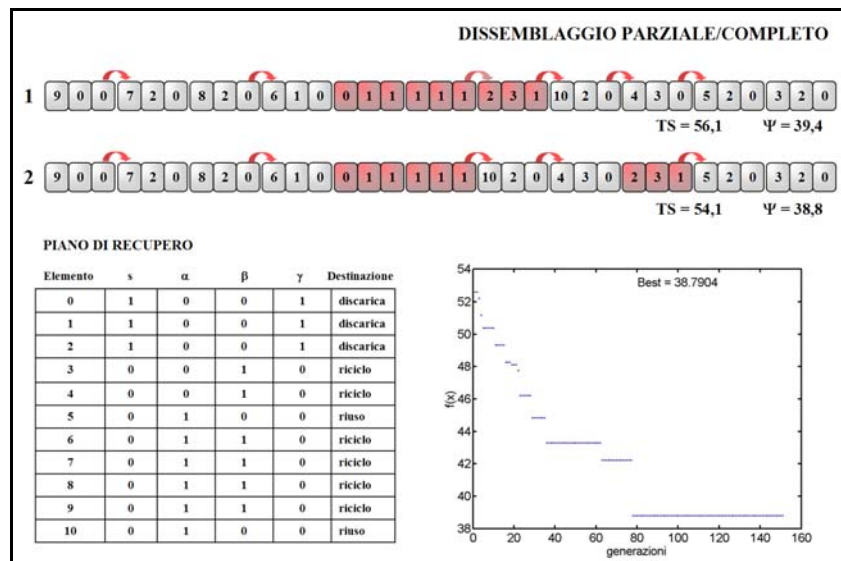


Figura 6. Disassemblaggio parziale/completo: Risultati della simulazione

Infine, ancora in Figura 6 è riportato il grafico di convergenza dell’algoritmo alla soluzione ottima in corrispondenza del secondo caso ( $\Psi_{\text{ottimo}} = 38,8$ ). Tale grafico fa vedere come partendo da una popolazione casuale cui corrispondono valori di  $\Psi$  elevati, con le successive generazioni l’algoritmo genetico evolve verso soluzioni con fitness sempre migliore, fino a convergere al valore ottimo e stabilizzarsi su esso.

## 8. Conclusioni

Sulla base di una campagna di simulazioni operata su alcuni assemblati meccanici, il primo prototipo si è dimostrato un valido strumento di ricerca delle sequenze di smontaggio, definendo sequenze fattibili e il più delle volte coincidenti con la soluzione di ottimo assoluto. Il secondo prototipo ha fornito soluzioni ancora fattibili, consentendo inoltre di guidare la pianificazione ottima di smontaggio e recupero, al variare dei pesi che vengono dati all’aspetto economico e ambientale nella definizione della funzione multiobiettivo.

Oltre che per le finalità caratteristiche della pianificazione del disassemblaggio, entrambi i prototipi si prestano inoltre ad essere impiegati come strumenti di supporto alla progettazione. Il primo può essere impiegato come supporto per un intervento progettuale che mira a ottimizzare il sistema per facilitarne le operazioni di servizio. Il secondo prototipo può essere impiegato nella progettazione orientata al recupero dei prodotti. Esso infatti definisce la profondità di smontaggio ottimale di un assemblato da dismettere, e la destinazione finale più opportuna dei componenti smontati, mettendole in relazione con alcune proprietà dei componenti stessi che ne caratterizzano il comportamento nell’arco dell’intero ciclo di vita.

## Bibliografia

- [1] Billatos S., Basaly N., "Green Technology and Design for the Environment", Taylor & Francis, 1997.

- [2] Lambert A., "Optimal Disassembly of Complex Products", *International Journal of Production Research*, 35(9), 1997, pp. 2509-2523.
- [3] Gungor A., Gupta S., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Survey", *Computers and Industrial Engineering*, 36, 1999, pp. 811-853.
- [4] Lambert A., "Disassembly Sequencing: A Survey", *International Journal of Production Research*, 41(16), 2003, pp. 3721-3759.
- [5] Navin-Chandra D., "The Recovery Problem in Product Design", *Journal of Engineering Design*, 5(1), 1994, pp. 65-86.
- [6] Fargione G., Giudice F., Risitano A., "Progettazione per il Disassemblaggio: Applicazione di Reti Neurali per l'Analisi della Profondità di Smontaggio", in *Proc. of XIII ADM – XV INGEGRAF International Conference on Tools and Methods Evolution in Engineering Design*, Napoli, Italia, June, 2003.
- [7] Tang Y., Zhou M., Zussman E., Caudill R., "Disassembly Modelling, Planning, and Application: A Review", in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, April, 2000.
- [8] Subramani A., Dewhurst P., "Automatic Generation of Product Disassembly Sequences", *CIRP Annals*, 40(1), 1991, pp. 115-118.
- [9] Vujosevic R., Raskar R., Yetecuri N., Jothishankar M., Juang S., "Simulation, Animation, and Analysis of Design Disassembly for Maintainability Analysis", *International Journal of Production Research*, 33(11), 1995, pp. 2999-3022.
- [10] Pnueli Y., Zussman E., "Evaluating the End-Of-Life Value of a Product and Improving It by Redesign", *International Journal of Production Research*, 35(4), 1997, pp. 921-942.
- [11] Zhang H., Kuo T., "A Graph-Based Disassembly Sequence Planning for End Of Life Product Recycling", in *Proc. of IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, Austin, Texas, October, 1997.
- [12] Li J., Khoo L., Tor S., "A Novel Representation Scheme for Disassembly Sequence Planning", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(8), 2002, pp. 621-630.
- [13] Seo K., Park J., Jang D., "Optimal Disassembly Sequence Using Genetic Algorithms Considering Economic and Environmental Aspects", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(5), 2001, pp. 371-380.
- [14] Gen M., Cheng R., "Genetic Algorithms and Engineering Optimisation", John Wiley & Sons, 1999.
- [15] Dowie T., "Estimation of Disassembly Times", Technical report DDR/TR15, Manchester Metropolitan University, UK, 1994.
- [16] Giudice F., La Rosa G., Risitano A., "Product Recovery-Cycles Design: Extension of Useful Life", in: R. Soenen, G. Olling (Eds), *Feature Based Product Life-Cycle Modelling*, Kluwer Academic Publisher, 2003, pp. 165-185.
- [17] SETAC, "Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice", SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Brussels, Belgium, 1993.
- [18] Goedkoop M., Spriensma R., "The Eco-indicator 99: Methodology Report", Pré Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands, 2000.