

XIII ADM - XV INGEGRAF
International Conference on



INGEGRAF

**TOOLS AND METHODS EVOLUTION IN
ENGINEERING DESIGN**



Cassino, June 3rd, 2003
Napoli, June 4th and June 6th, 2003
Salerno, June 5th, 2003

**PROGETTAZIONE PER IL DISASSEMBLAGGIO:
APPLICAZIONE DI RETI NEURALI PER L'ANALISI DELLA
PROFONDITA' DI SMONTAGGIO**

Giovanna Fargione, Fabio Giudice, Antonino Risitano

Università di Catania
Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica
e-mail: [gfargion/fgiudice/arisitan]@diim.unict.it

SOMMARIO

Lo smontaggio dei prodotti è necessario ogni qualvolta sia opportuno procedere con interventi di servizio, o con il recupero di parti e materiali a fine vita. La Progettazione per il Disassemblaggio (Design for Disassembly) risulta quindi avere valenza strategica nell'ambito delle problematiche del progetto orientato ai requisiti ambientali di prodotto (Green Design). Nel presente lavoro si propone uno strumento di analisi delle profondità di smontaggio dei componenti costituenti un sistema costruttivo, basato su una procedura di classificazione mediante reti neurali. Tale strumento elabora dati relativi alle caratteristiche geometriche delle parti costituenti un assemblato, e ai relativi sistemi di giunzione. Sulla base di queste informazioni esso consente non solo di analizzare la distribuzione delle profondità di smontaggio dei componenti, ma anche di supportare la riprogettazione dell'architettura di prodotto finalizzata ad un miglioramento della sua smontabilità. Lo strumento sviluppato infatti, se opportunamente integrato nel processo progettuale, consente di ottimizzare le scelte di progetto (layout, geometrie, giunzioni) per migliorare la facilità di disassemblaggio, in accordo con le più comuni linee guida del Design for Disassembly. Tale ottimizzazione viene guidata dalle proprietà stesse dei componenti, in modo da migliorare la smontabilità di quelle parti dell'assemblato che potrebbero necessitare frequenti interventi di servizio, o che presentano elevate opportunità di recupero.

Parole chiave: Green Design, Progettazione per il Disassemblaggio, Estensione della Vita, Recupero, Reti Neurali.

ABSTRACT

Disassembly of products is necessary when operations of service, or recovery of parts and materials at the end of life are requested. Therefore Design for Disassembly is

strategic within a design process oriented to environmental requirements of products (Green Design). In this paper an instrument for disassembly depth analysis of components constituting a constructive system is proposed. The instrument is based on a procedure of classification supported by neural networks, and elaborates data on geometric parameters of assembled components, and on joint systems. On the base of these information it allows to analyse the distribution of disassembly depths of components, and to aim the redesign of product architecture oriented to disassemblability improvement. The developed instrument, if opportunely integrated in the design process, allows to optimise the product design choices (layout, geometric parameters, shapes, joints) in order to improve ease of disassembly, according to the most common guidelines of Design for Disassembly. This optimisation process is guided by components properties, in order to improve the disassemblability of those ones could need frequently service operations, or that are characterised by high recovery opportunity.

Key words: Green Design, Design for Disassembly, Extension of Life, Recovery, Neural Networks.

1. Introduzione

La crescente sensibilità nei confronti delle problematiche ambientali ha determinato negli ultimi anni la diffusione di nuovi approcci alla progettazione del prodotto che tengano conto di tutte le fasi del suo ciclo di vita. In questo contesto è nato il Green Design o Design for Environment, che evidenzia l'importanza delle prime fasi dello sviluppo del prodotto, per garantire un adeguato livello di eco-compatibilità del prodotto [OTA 1992; Billatos e Basaly 1997; Graedel e Allenby 1998].

Il Green Design include una ampia gamma di problematiche del progetto, tra cui il Design For Disassembly [Boothroyd e Alting 1992], di valenza strategica per il recupero di parti e materiali a fine vita di un prodotto. Il disassemblaggio dei prodotti è necessario ogni qualvolta sia opportuno procedere con il recupero di sottoassiemi o di singoli componenti appartenenti agli stessi prodotti. Esso può essere definito come la sistematica rimozione delle parti desiderate da un assemblato, con la condizione che non si verifichi alcun danneggiamento delle parti dovuto al processo di smontaggio [Brennan et al. 1994].

L'operazione di disassemblaggio è essenziale nel contesto delle strategie di recupero delle risorse a fine vita di utilizzo, ed ha grande importanza anche per le strategie di estensione della vita di utilizzo, poiché può favorire le proprietà di serviceability del prodotto (cioè di facilità ad intervenire con operazioni di servizio) [Ishii 1995].

Le finalità del disassemblaggio selettivo, cioè mirato allo smontaggio di specifici componenti, nell'ottica della salvaguardia ambientale, sono allora riassumibili come segue [Lambert 1997]:

- 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).

2. Problema del recupero e profondità di smontaggio

In linea generale il problema del recupero di un prodotto a fine vita può essere formulato come segue: dato un prodotto, determinare il piano di recupero che possa bilanciare in maniera efficace gli oneri dei processi di smontaggio e recupero, e i conseguenti profitti, da intendersi in termini di risorse impiegate e recuperate.

In letteratura sono reperibili valutazioni di massima sulle curve di profitto degli interventi di smontaggio e recupero [Navin-Chandra 1994]. Secondo tali valutazioni i costi di recupero (disassemblaggio, riparazione) 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.

L'ottimizzazione dell'architettura di prodotto funzionale al disassemblaggio consiste quindi nel progettarela in modo da:

- spostare il punto di massimo della curva di profitto verso una maggiore profondità di smontaggio;
- incrementare il valore del profitto nel punto di massimo.

3. Approccio e obiettivi

La funzione di profitto del recupero è sensibile all'efficienza della sequenza di disassemblaggio, che se ottimizzata può consentire di ridurre costi e tempi [Tang et al. 2000]. Questo quindi risulta essere il primo fattore di intervento per ottenere un disassemblaggio conveniente, ed è indirettamente condizionato dall'architettura del prodotto, che può favorire l'efficienza delle sequenze di smontaggio.

A parità di efficienza della sequenza di disassemblaggio, 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 di maggior valore [Simon e Dowie 1993]. Questa seconda considerazione evidenzia la dipendenza diretta dell'efficienza del disassemblaggio dall'architettura del prodotto, e in particolare dalla profondità di smontaggio dei singoli componenti in relazione alle loro caratteristiche di durata, affidabilità, impatto ambientale, valore economico.

In questo contesto il lavoro proposto si pone come obiettivo quello di definire uno strumento di analisi delle profondità di smontaggio dei componenti costituenti un sistema costruttivo.

Tale strumento deve elaborare dati relativi alle caratteristiche geometriche delle parti costituenti un assemblato, e ai relativi sistemi di giunzione, e sulla base di queste informazioni deve classificare i componenti in base alla corrispondente difficoltà di smontaggio. Il fine ultimo è quello di poter utilizzare tale strumento per:

- analizzare la distribuzione della difficoltà di smontaggio selettivo di componenti o sottoassemblati costituenti un complesso costruttivo;
- supportare la riprogettazione dell'architettura di prodotto finalizzata ad un miglioramento della sua smontabilità, mettendo in relazione la profondità di smontaggio con alcune caratteristiche dei singoli componenti (affidabilità, impatto ambientale, valore economico).

4. Sviluppo dello strumento di analisi

Il Design for Disassembly inteso come strumento progettuale deve allora mirare all'armonizzazione tra layout del prodotto, geometrie dei componenti, materiali, sistemi di giunzioni, in funzione della disassemblabilità dell'architettura. Con questo obiettivo,

il DfD suggerisce differenti livelli di intervento progettuale [Yamagiwa et al. 1999], cui è possibile associare dei corrispondenti requisiti progettuali, per un'impostazione di massima del problema di DfD di un prodotto:

- *Frame Design* - Studio del layout del prodotto, della distribuzione spaziale e funzionale dei componenti.
- *Parts Design* - Studio delle geometrie e dei materiali delle parti.
- *Joint Design* - Studio dei sistemi di giunzione.

Di conseguenza, per raggiungere le finalità prefissate, lo strumento di analisi è stato strutturato secondo una procedura che mette in relazione:

- le caratteristiche che definiscono ogni soluzione progettuale da analizzare (layout, geometrie, materiali, giunzioni);
- le proprietà obiettivo dei componenti, cioè le proprietà che ne determinano la necessità o opportunità di smontaggio (durata e affidabilità, impatto ambientale, valore economico);
- le profondità di smontaggio dei componenti (quantificate dal numero di altri componenti e di giunzioni da rimuovere per smontare ogni componente).

La procedura di analisi nel suo insieme è schematizzata in Figura 1.



Figura 1. Procedura di analisi

Fissate le caratteristiche della soluzione progettuale da analizzare è possibile calcolare le proprietà obiettivo e le profondità di smontaggio di ciascun componente. Da queste si ottiene la distribuzione dei valori assunti da opportune funzioni obiettivo in grado di quantificare l'efficienza della soluzione progettuale in relazione alle necessità di smontaggio. La procedura di analisi così definita consente:

- di confrontare diverse alternative progettuali, e valutare quella ottima;
- di supportare il miglioramento di una soluzione progettuale.

4.1. Calcolo della profondità di smontaggio

Il calcolo della distribuzione della profondità di smontaggio dei componenti viene eseguito mediante la procedura riportata in Figura 2.

Dato un assemblato qualunque (caratterizzato da layout, geometrie delle parti, giunzioni), tradotto in un corrispondente modello matematico tramite matrici che descrivono vincoli spaziali e di giunzione (eventualmente derivante da modello CAD), lo strumento di calcolo riesce in maniera automatica a classificare componenti o subassemblati costituenti il complesso costruttivo in base alla difficoltà di disassemblaggio, al variare della direzione di smontaggio.

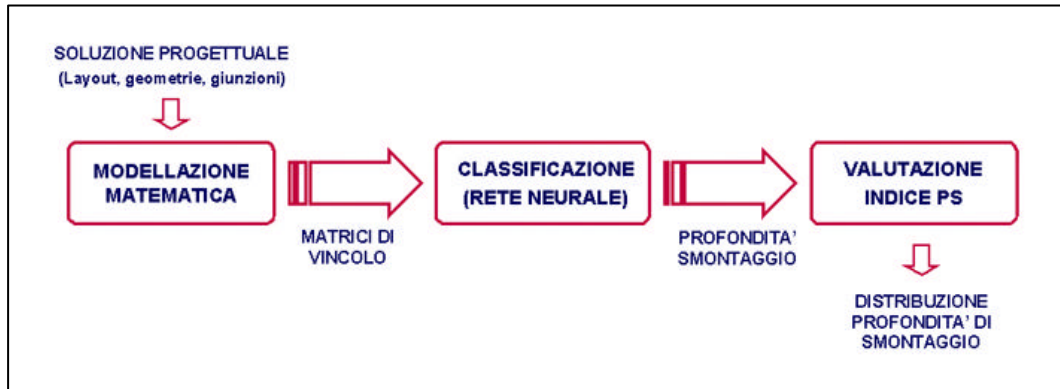


Figura 2. Calcolo della profondità di smontaggio

Dato un assemblato costituito da n componenti G_i e da f giunzioni g_v , la matrice dei vincoli spaziali nella direzione X è così definita:

$$A_X = [a_{ij}]_{i=1,2,\dots,n}^{j=1,2,\dots,n} \quad (1)$$

dove il termine a_{ij} è unitario se lo smontaggio del componente j -esimo nella direzione X richiede la rimozione del componente i -esimo, altrimenti è nullo. Analogamente è possibile definire le matrici di vincolo spaziale nelle altre direzioni.

La matrice dei vincoli di giunzione è così definita:

$$B = [b_{ij}]_{i=1,2,\dots,n}^{j=1,2,\dots,n} \quad (2)$$

dove il termine b_{ij} è unitario se il componente j -esimo è legato al componente i -esimo, altrimenti è nullo. Una matrice del tipo (2) può essere compilata per ogni tipologia di giunzione presente nel sistema costruttivo.

Tradotto l'assemblato in modello matematico, la classificazione viene operata da una rete neurale di tipo competitivo (*Competitive Learning*) [Fu 1994] e una legge di apprendimento del tipo *Kohonen Learning Rule* [Kohonen 1987]. Il prototipo realizzato elabora le informazioni procedendo secondo i seguenti passi:

- le matrici relative ai soli vincoli spaziali (come vincoli intendiamo le ostruzioni che nascono tra i componenti all'interno dell'assemblato per una data direzione e per un componente stabilito), vengono analizzate dalla rete neurale precedentemente addestrata che riesce a valutare la profondità del disassemblaggio (numero di componenti che è necessario togliere per estrarre il componente obiettivo);

- successivamente questo risultato viene rielaborato dalla stessa rete insieme alle matrici delle giunzioni (queste identificano l'esistenza o meno delle giunzione tra i componenti, per tipologia di giunzione), fornendo in definitiva una valutazione della reale difficoltà del disassemblaggio (numero di componenti da togliere e relativi vincoli di giunzione).

Al termine della classificazione si ottiene la distribuzione delle profondità di smontaggio dei componenti, inizialmente quantificate dal numero di altri componenti da rimuovere per smontare ogni componente (n_s), e dal numero di giunzioni (f_{sk}) da rimuovere, per tipologia di giunzione.

Questa prima informazione viene ulteriormente elaborata in modo da ottenere per ogni componente un unico indice di profondità di smontaggio ps , che tenga conto sia degli altri componenti da rimuovere per vincoli spaziali (mediante un termine ps_{VS}) che delle giunzioni, e della differente difficoltà di smontaggio delle giunzioni (mediante un termine ps_{VG}):

$$ps = ps_{VS} + \beta \cdot ps_{VG} = \frac{n_s}{n} + \beta \cdot \frac{\sum_{k=1}^l \alpha_k \cdot f_{sk}}{f} \quad (3)$$

dove n_s è il numero di altri componenti da rimuovere, n è il numero complessivo di componenti, f_{sk} è il numero di giunzioni del tipo k -esimo da rimuovere, f è il numero complessivo di giunzioni presenti nell'assemblato, α_k è la difficoltà di smontaggio delle giunzioni di tipo k -esimo, l è il numero dei tipi di giunzione, β è un coefficiente che tiene conto del maggior peso di ps_{VG} rispetto a ps_{VS} ($\beta > 1$). Prevedendo valori di α_k appartenenti all'intervallo di valori $[0,1]$ (con $\alpha_k = 1$ si intenderà la massima difficoltà di smontaggio), l'indice ps può assumere valori appartenenti all'intervallo $[0,1+\beta]$.

Così definito, l'indice ps può essere rapportato al valore massimo presente nell'assemblato in analisi, ottenendo per ogni componente il valore normalizzato:

$$PS_i = \frac{ps_i}{ps_{MAX}} \quad (4)$$

4.2. Calcolo della proprietà obiettivo dei componenti

Partendo dalle caratteristiche principali di ogni componente (geometrie, forme, materiali) è possibile valutarne quelle che possono essere le proprietà obiettivo dello smontaggio, cioè le proprietà che ne determinano la necessità o opportunità di smontaggio. Indicando questa generica proprietà con ϕ_i , essa deve essere definita in maniera tale che maggiore è il suo valore, maggiore è la necessità o opportunità di smontaggio. Così definita, può essere rapportata al valore massimo presente nell'assemblato in analisi, ottenendone la forma normalizzata:

$$F_i = \frac{f_i}{f_{MAX}} \quad (5)$$

A seguire si riportano alcuni suggerimenti su come definire la proprietà obiettivo.

Affidabilità – Componenti a bassa affidabilità, e quindi elevata frequenza di guasto, necessitano minori profondità di smontaggio. Come proprietà obiettivo di bassa affidabilità si suggerisce l'utilizzo di una funzione del MTTF (Mean Time To Failure).

Impatto ambientale - Componenti ad elevato impatto ambientale richiedono minori profondità di smontaggio, per favorirne il recupero. Come proprietà obiettivo di elevato impatto ambientale si suggerisce l'utilizzo di una funzione che esprime l'impatto ambientale associato alla produzione del componente, valutabile mediante la metodologia nota come Life Cycle Assessment [SETAC 1991; EPA 1993], e gli strumenti che la supportano, ormai di ampia diffusione [Goedkoop e Spriensma 2000].

Valore economico - Componenti di elevato valore economico richiedono minori profondità di smontaggio, per favorirne il recupero. Come proprietà obiettivo di elevato valore economico si suggerisce l'utilizzo del costo di produzione del componente.

4.3. Calcolo delle funzioni obiettivo

Valutate le proprietà obiettivo e le profondità di smontaggio di ciascun componente, occorre definire delle opportune funzioni obiettivo in grado di quantificare l'efficienza della soluzione progettuale in relazione alle necessità di smontaggio.

A tal fine si definisce un indice di bontà della profondità di smontaggio Ψ_i , che per ogni componente i -esimo è espresso in funzione delle (4) e (5):

$$\Psi_i = |F_i - (1 - PS_i)| \quad (6)$$

Minimizzare gli indici Ψ_i corrisponde a ricercare una configurazione caratterizzata da minori profondità di smontaggio per i componenti con elevata necessità di manutenzione o recupero, e viceversa. I singoli termini Ψ_i possono assumere valori appartenenti all'intervallo [0,1].

Per avere un'unica funzione obiettivo, in grado di quantificare l'efficienza complessiva della soluzione progettuale, si può introdurre la seguente:

$$O = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \Psi_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot |F_i - (1 - PS_i)| \quad (7)$$

dove γ_i sono dei coefficienti da introdurre per variare il peso dei singoli termini Ψ_i , in funzione della importanza di ciascun componente. A tal fine è possibile utilizzare come coefficienti di peso le proprietà obiettivo normalizzate Φ_i espresse dalla (5). Così definita la funzione obiettivo O , la sua minimizzazione comporta la ricerca della distribuzione delle profondità di smontaggio ottimali, dando maggiore importanza ai componenti caratterizzati da maggiore necessità o opportunità di smontaggio.

5. Caso studio: Assemblato di componenti elettromeccanici

Come esperienza applicativa si riporta un caso studio sviluppato su un assemblato elettromeccanico, nel quale sono stati individuati 6 componenti principali. In Figura 3, oltre l'assemblato in esame, è riportata anche l'astrazione che ne rappresenta una prima soluzione costruttiva, con ingombri di massima dei componenti e distribuzione delle giunzioni. Data la tipologia del layout, l'analisi della profondità di smontaggio è stata eseguita per la sola direzione Y. Per quel che riguarda la valutazione della proprietà obiettivo dello smontaggio, è stato preso in esame il valore economico dei componenti. Quindi per il calcolo delle Φ_i è stato utilizzato il costo di produzione.

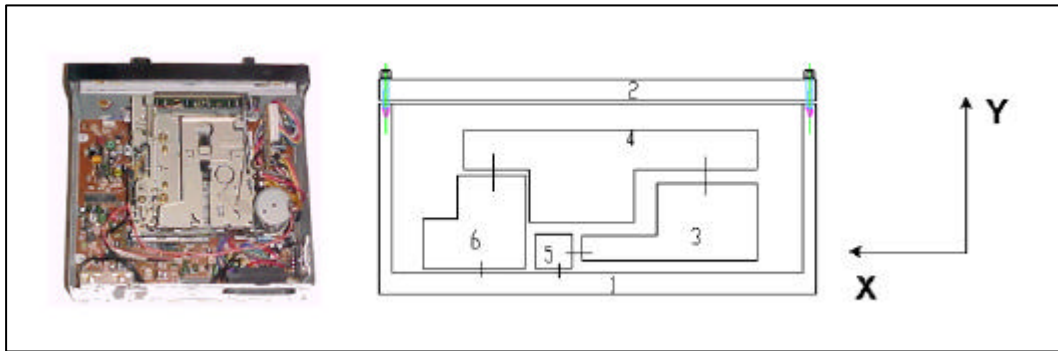


Figura 3. Caso studio: Assemblato e astrazione per l'analisi

5.1. Implementazione della rete neurale

La rete neurale creata al fine di classificare opportunamente i componenti in base alla profondità di smontaggio è una rete del tipo *Self Organizing Networks* [Bharath e Drosen 1994]. Una rete di questo tipo permette di individuare la correlazione e la regolarità negli ingressi (pattern) forniti nella fase di addestramento e associa, in accordo con quanto appreso, i futuri input alla classe di appartenenza.

Per l'implementazione dello strumento è stato necessario seguire una sequenza di passi in cui è stato suddiviso il lavoro svolto: generazione dei *pattern*; generazione della rete; fase di addestramento.

I pattern di addestramento sono stati generati dal Matlab (matrici di ingresso binarie casuali [6 x 200] in cui 200 sono il numero di assemblati casualmente generati e 6 sono il numero di componenti per assemblato). Quindi è stata creata una rete di tipo competitivo $NETC = newc(PR, S, KLR, CLR)$ in cui:

- PR : è una matrice [R x 2] di valori min e max del vettore di input R
- S : è il numero dei neuroni
- KLR (Kohonen Learning Rate) = 0,01
- CLR (Conscience Learning Rate) = 0,001

Il numero degli elementi del vettore di ingresso (R) è 6, sette è il numero dei neuroni nel livello intermedio (S) e altrettante sono le classi disponibili. La legge di apprendimento è del tipo *Kohonen Learning Rate*. Il paradigma di apprendimento utilizzato è del tipo non supervisionato proprio per la casualità dei pattern di ingresso per valutare la capacità della rete di auto-organizzarsi.

Nella fase di *Validation Set* è stato considerato un numero di assemblati pari a 6. Tutti i componenti sono stati classificati in modo esatto, tenendo conto che il numero dei neuroni pari a 7, identifica una risposta aggiuntiva a quella reale (possiamo avere da 0 a max 5 componenti da cui dipende il componente obiettivo nella realtà). Quest'ulteriore risposta identifica che il componente non è disassemblabile da solo in quella direzione, ma necessita di essere estratto con almeno un altro componente simultaneamente.

La classificazione avviene in due fasi. La prima classificazione utilizza la rete precedentemente addestrata, e elabora le matrici di vincolo spaziale lungo la direzione scelta per il disassemblaggio. Questa prima fase fornisce la classificazione rispetto ai soli vincoli spaziali: *classe 0* identifica un componente immediatamente disassemblabile; *classe 1* indica che l'estrazione del componente obiettivo necessita la rimozione di un solo componente; e così via per le classi successive.

A partire da questa prima classificazione, la rete successivamente analizza i dati forniti dalle matrici delle giunzioni e associa a ogni componente anche le giunzioni da rimuovere per il suo smontaggio. In Figura 4 sono riportati sulla sinistra i risultati della prima classificazione (vincoli spaziali), e della seconda classificazione (vincoli spaziali e di giunzione) eseguita in un primo tempo considerando tutte le giunzioni di uguale tipologia. Sulla destra sono riportati i risultati dell'elaborazione finale considerando 3 diverse tipologie di giunzione (caratterizzate da differenti difficoltà di smontaggio).

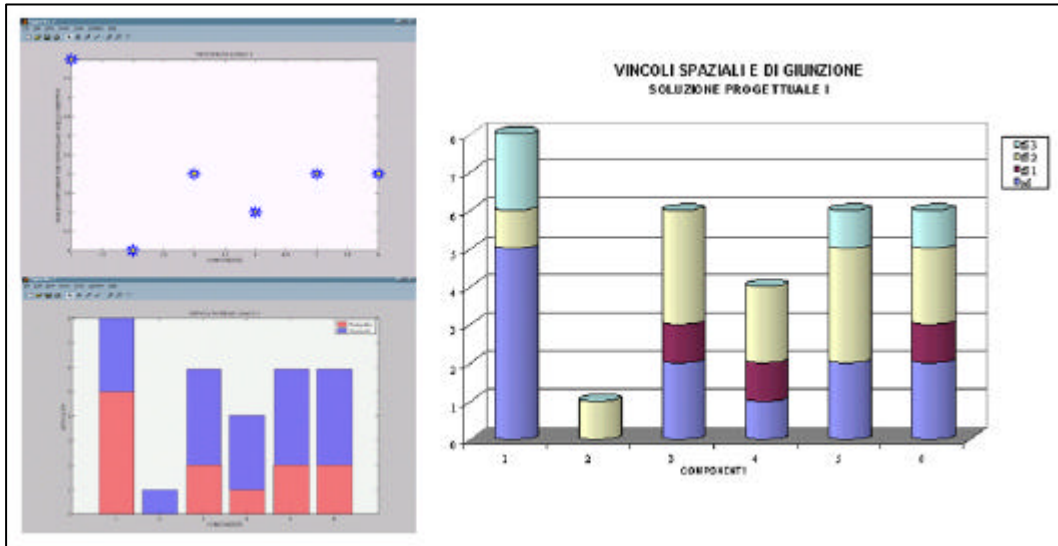


Figura 4. Risultati della classificazione

5.2. Analisi della soluzione progettuale e ottimizzazione

Nella Figura 5 sono riportate le distribuzioni della profondità di smontaggio PS, della proprietà obiettivo Φ , e del conseguente indice di bontà della profondità di smontaggio Ψ , per i componenti della prima soluzione progettuale.

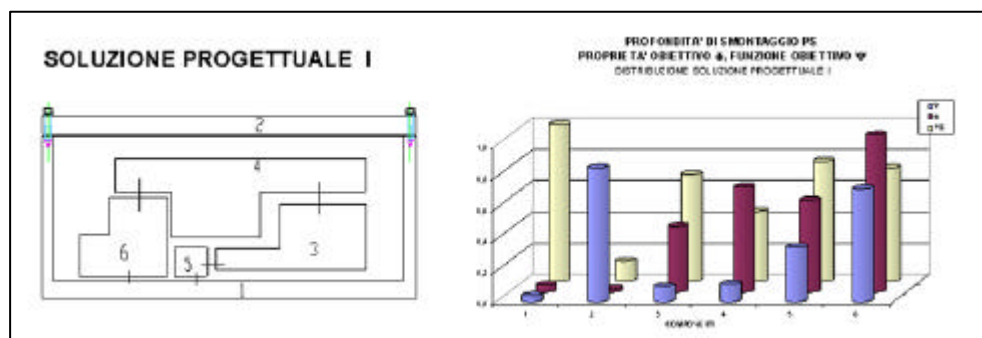


Figura 5. Analisi soluzione progettuale I

In particolare quest'ultimo indice Ψ fornisce indicazioni sulle criticità della soluzione in esame, che possono supportare il miglioramento della smontabilità dell'architettura. A tal fine si propongono le analisi di altre 3 alternative progettuali, riportate nella Figura 6, che mantengono sostanzialmente il layout, ma si differenziano per la geometria dei componenti e i sistemi di giunzione. Tali modifiche inducono variazioni nelle profondità di smontaggio, e nei costi di produzione dei componenti (e quindi nelle Φ).

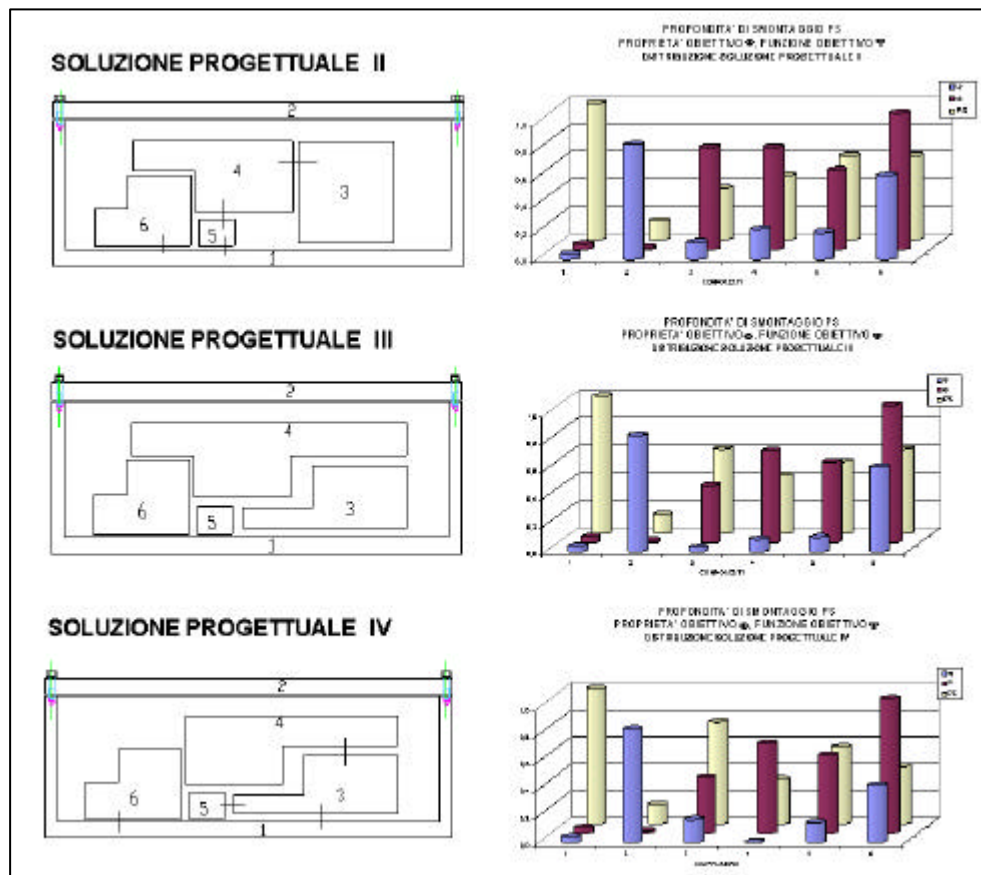


Figura 6. Analisi soluzioni progettuali alternative

Dal confronto tra le distribuzioni delle funzioni obiettivo Ψ (da minimizzare) per le 4 soluzioni progettuali (Figura 7), si nota come il processo di riprogettazione tenda a armonizzare sempre meglio le profondità di smontaggio con i valori economici dei componenti potenzialmente recuperabili a fine vita dell'assemblato. Questa conclusione è evidenziata dal grafico di Figura 8, dove sono riportate le valutazioni della funzione obiettivo Ω , il cui valore è inversamente proporzionale all'efficienza dell'intero assemblato in relazione allo smontaggio e alle proprietà dei componenti.

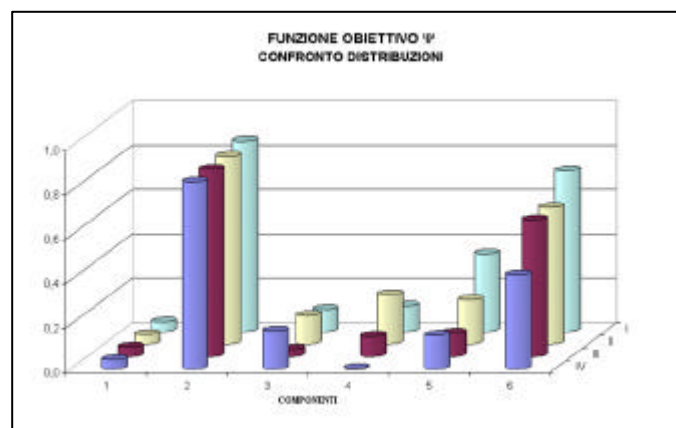


Figura 7. Distribuzione delle funzioni obiettivo Ψ (confronto tra le soluzioni in esame)

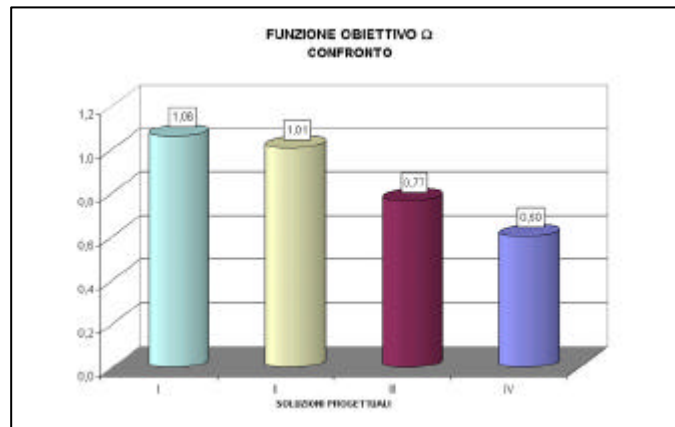


Figura 8. Confronto di Ω tra le soluzioni in esame

6. Conclusioni

Lo strumento sviluppato è stato applicato all'analisi di una ampia tipologia di assemblati, benché nel presente lavoro sia riportata solo un'esperienza applicativa nel campo della componentistica elettromeccanica. Come si voleva esso consente non solo di analizzare la distribuzione delle profondità di smontaggio in un assemblato, ma anche di supportare la riprogettazione dell'architettura di prodotto finalizzata ad un miglioramento della sua smontabilità.

Quest'ultimo punto merita di essere particolarmente evidenziato. Lo strumento proposto dagli autori infatti, se opportunamente integrato nel processo progettuale, consente di ottimizzare le scelte di progetto (layout, geometrie, giunzioni) per migliorare la facilità di disassemblaggio, in accordo con le più comuni linee guida del Design for Disassembly. Inoltre tale ottimizzazione viene guidata dalle proprietà stesse dei componenti, in modo da migliorare la smontabilità di quelle parti dell'assemblato che potrebbero necessitare frequenti interventi di servizio, o che presentano elevate opportunità di recupero.

A partire da questi risultati, è possibile prevedere l'introduzione di funzioni costo che consentano di valutare la fattibilità di uno smontaggio in termini di costo e reddito aggiuntivo proveniente dall'estrazione del componente obiettivo, aspetto quest'ultimo che può influenzare in maniera determinante la praticabilità di un piano di servizio o di recupero.

Bibliografia

- Bharath R., Drosen J., *Neural Network Computing*, McGraw-Hill, 1994.
 Billatos S., Basaly N., *Green Technology and Design for the Environment*, Taylor & Francis, 1997.
 Boothroyd G., Alting L., *Design for Assembly and Disassembly*, CIRP Annals, vol. 2, no. 41, 1992.
 Brennan L., Gupta S., Taleb K., *Operations Planning Issues in a Assembly/Disassembly Environment*, International Journal of Operations and Production Management, vol. 14, no. 9, 1994.
 EPA, *Life-Cycle Assessment Inventory Guidelines and Principles*, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C., 1993.

Fu L., *Neural Networks in Computer Intelligence*, McGraw-Hill, 1994.

Goedkoop M., Spriensma R., *The Eco-indicator 99: Methodology Report*, Pré Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands, 2000.

Graedel T., Allenby B., *Design for Environment*, Prentice Hall, 1998.

Ishii K., *Life-Cycle Engineering Design*, Journal of Mechanical Design, Vol. 117, 1995.

Kohonen T., *Self-Organizing and Associative Memory*, Springer-Verlag, 1987.

Lambert A., *Optimal disassembly of complex products*, International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 9, 1997.

Navin-Chandra D., *The Recovery Problem in Product Design*, Journal of Engineering Design, vol. 5, no. 1, 1994.

OTA, *Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment*, Office of the Technology Assessment, Congress of the United States, 1992.

SETAC, *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Washington, D.C., 1991.

Simon M., Dowie T., *Quantitative Assessment of Design Recyclability*, Manchester Metropolitan University, 1993.

Tang Y., Zhou M., Zussman E., Caudill R., *Disassembly Modelling, Planning, and Application: A Review*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 2000.

Yamagiwa Y., Negishi T., Takeda K., *Life Cycle Design Achieving a Balance between Economic Considerations and Environmental Impact with Assembly-Disassembly Evaluation Design*, EcoDesign'99 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, February 1999.