



UNIVERSITÀ della CALABRIA
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Meccanica

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XXV Ciclo (2009-2012)

Scuola di Dottorato “Pitagora” in Scienze Ingegneristiche

SSD: ING-IND/15 – Disegno e Metodi dell’Ingegneria Industriale

Dissertazione finale sottomessa per il conseguimento il titolo di Dottore di Ricerca
in Ingegneria Meccanica

Una metodologia integrata per la valutazione di
sostenibilità dei prodotti industriali nelle prime fasi
della progettazione

Coordinatore

Prof. Sergio Rizzuti

Supervisore

Ing. Luigi De Napoli

Candidato

Ing. Claudio Rocco

Anno Accademico 2011/2012

A Teresa
A Francesco

Indice

Introduzione	1
CAPITOLO 1: La sfida della sostenibilità industriale	3
1.1 Problematiche connesse al concetto di sostenibilità	3
1.2 Interventi politico – normativi	5
1.3 Sostenibilità come questione culturale	8
1.4 La sostenibilità come visione ed impegno aziendale	9
1.4.1 PSS: Product Service System	10
1.5 Sostenibilità nella progettazione	12
1.5.1 Le responsabilità dei progettisti	12
1.5.2 Principi di sostenibilità nel design	13
1.5.3 Progettare il ciclo di vita di un prodotto	17
1.5.4 Sostenibilità nell’early design	21
CAPITOLO 2: Analisi dei principali approcci per l’eco-design	25
2.1 Introduzione	25
2.2 Una panoramica sui principali approcci di eco-design	25
2.3 Nuove metodologie per la progettazione sostenibile nell’early design	31
2.3.1 Metodo della Function-Impact Matrix	31
2.3.2 Integrazione dell’LCA nell’early design tramite repository	33
2.3.3 Approccio basato sull’exergia	35
2.3.4 Metodo Eco-PaS	36
2.3.5 Metodo delle Green Guidelines	38
2.3.6 Metodo MPDS	41
2.4 Spunti per un nuovo tool di supporto	43
CAPITOLO 3: Metodi e strumenti di analisi	46
3.1 Introduzione	46
3.2 DSM	46
3.3 LCA ed approcci semplificati	52

3.4 Indicatori	55
3.4.1 Indicatori di performance ambientale	56
3.5 MCDM	58
3.5.1 Weighted Sum Model (WSM)	59
3.5.2 Weighted Product Method (WPM)	60
3.5.3 Analytic Hierarchy Process	62
3.5.4 Metodo ELECTRE	63
3.5.5 Metodo TOPSIS	63
3.6 Pareto-Efficienza	64
3.7 Conceptual Design	65
3.7.1 Approccio funzionale	66
CAPITOLO 4: Una metodologia integrata per l'early design	70
4.1 Una proposta di metodologica	70
4.2 Metodologia A-DSM: generalità	71
4.2.1 Struttura di una A-DSM	73
4.2.2 Procedure di valutazione	78
4.2.3 Valutazione degli archetipi	79
4.2.4 Eccezioni del metodo WPM	82
4.3 Analisi e scelta dei concept	83
4.4 Caso di studio: applicazione ad un elettrodomestico	86
4.5 Caso di studio: applicazione ad un semplice dispositivo meccanico	103
4.5.1 Commenti ai casi di studio	108
Conclusioni	109
Bibliografia	112

Introduzione

Lo studio propone un metodo integrato per la valutazione delle caratteristiche ambientali di prodotti industriali nelle prime fasi della loro progettazione, cioè in fase concettuale.

Il metodo utilizza un approccio basato sulla Design Structure Matrix, dove i modelli funzionali sviluppati dal team di progetto sono valutati in maniera quantitativa su diversi aspetti. La valutazione è effettuata sulla base di parametri che sono connessi ad ipotesi di funzionamento dei dispositivi ed alle caratteristiche fisiche che i progettisti ipotizzano di dare loro (col supporto della loro esperienza) durante lo sviluppo. Dalle valutazioni si otterranno i parametri attraverso cui effettuare la selezione ed, eventualmente, il miglioramento delle soluzioni concettuali più soddisfacenti dal punto di vista ambientale.

Il presente lavoro di ricerca è strutturato in quattro capitoli. Nel primo viene trattato il tema della sostenibilità in ambito industriale, partendo dalle problematiche più generali legate all'argomento fino alle considerazioni più specifiche che riguardano gli aspetti relativi alla progettazione. Tale scelta è legata al fatto che il problema della progettazione dei prodotti in chiave ecologica è un modo per dare un contributo alla problematica più generale della sostenibilità (nel senso ampio del termine) e non può prescindere da alcune considerazioni su aspetti affini come i fattori produttivi, sociali e normativi, che inevitabilmente influenzano l'efficacia e l'adozione delle soluzioni di progetto. Ciò, quindi, serve a descrivere il contesto di riferimento in cui una metodologia di supporto ai progettisti può essere utilizzata insieme a tutta una serie di iniziative e strategie legate al concetto di sostenibilità (di cui il progettista deve essere consapevole). Inoltre, viene discusso il ruolo della progettazione e l'estrema importanza che essa assume se si vogliono ottenere prodotti più eco-compatibili.

Nel secondo capitolo viene presentata una panoramica dei metodi utilizzati per l'eco-design. Nella prima parte sono descritti gli approcci su cui si basano i metodi classici, in particolare: le liste di controllo, il Quality Function Deployment e l'LCA (Life Cycle Assessment). Nella seconda parte viene focalizzata l'attenzione su un gruppo di metodologie che sono di supporto ai progettisti già nelle prime fasi della progettazione, ognuna con un differente approccio di base. Ciò serve ad introdurre la categoria di strumenti a cui questo studio offre il suo contributo.

La sezione successiva (capitolo 3) è dedicata all'analisi di quelle tecniche e quegli approcci che vanno a comporre l'intera metodologia descritta nella ricerca. Poiché quest'ultima si configura come un approccio integrato che combina insieme tecniche appartenenti ad ambiti considerati differenti tra loro, può essere utile descrivere come queste vengono trattate in letteratura,

affinché il lettore abbia gli strumenti concettuali necessari a comprendere tutti i passaggi, dalla progettazione dei modelli funzionali alla valutazione ed alla scelta del concept di prodotto con le migliori caratteristiche di sostenibilità.

Nell'ultimo capitolo si discute in dettaglio la metodologia sviluppata durante lo studio. Dopo una sintetica descrizione dei passi principali che il progettista deve seguire per implementare il metodo, vengono descritte le proprietà delle strutture dati da impiegare, i tipi di dati e le loro modalità di inserimento, nonché le procedure di calcolo per eseguire le valutazioni ambientali dei modelli funzionali. Una sezione del capitolo è dedicata due casi di studio, dove sono discussi i risultati ed anche gli eventuali aspetti critici.

CAPITOLO 1

La sfida della sostenibilità industriale

1.1 Problematiche connesse al concetto di sostenibilità

Il problema della sostenibilità industriale è sicuramente tra i temi più discussi degli ultimi decenni. L'aggettivo "sostenibile" può essere riferito a molti contesti (da quello economico e sociale a quello più spiccatamente ambientale), e rappresenta un concetto che accomuna tutte le discipline a cooperare insieme per un effettivo cambiamento nel nostro modo di concepire l'ambiente, la tecnologia e l'economia. La definizione che spesso viene data al termine "sostenibilità" è: "Soddisfare i bisogni della generazione presente, senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri" [Brundtland et al., 1987]. Questo grande obiettivo ha dato il via alla generazione di idee e teorie che dessero una guida ad un nuovo modello di società ecologica (si pensi agli studi degli anni ottanta condotti da Lester Brown), che includessero nuovi termini strettamente connessi con il concetto di sostenibilità.

Il concetto di "sufficienza", ad esempio, mette in discussione il motivo fondamentale del consumo di un prodotto. Il termine si focalizza su che cosa gli utenti stanno cercando di raggiungere attraverso il consumo di un bene, come le proprie esigenze possono essere soddisfatte eventualmente con altri mezzi e com'è possibile garantire il soddisfacimento dei bisogni in modo differente, evitando così un consumo dei prodotti inappropriato e compulsivo (si veda la sezione 1.2). Con il termine "scala" s'intende il giusto modo di operare in relazione a fattori esterni, considerando che gli impatti ambientali (legati alle attività industriali) sono connessi ad una scala geografica. Un altro concetto importante è descritto dal termine "appropriatezza", il quale si riferisce allo scopo per cui un prodotto è pensato. Ciò significa soddisfare determinati bisogni con delle soluzioni progettuali di cui si comprendono gli effetti sull'ambiente o nei contesti in cui verranno utilizzate.

Non meno importanti sono i concetti di "efficienza" e di "equità". Il primo prescrive di utilizzare meno risorse materiali ed energetiche, che è uno degli obiettivi fondamentali della ricerca recente e, soprattutto, di quegli ambiti della progettazione che si stanno concentrando principalmente sul modo di progettare e costruire prodotti e servizi di qualità a basso consumo. Il secondo introduce alcuni punti chiave per i progettisti (e per l'uomo in generale) affinché si tenda verso un futuro più giusto e più sostenibile anche dal punto di vista sociale, abbattendo con

nuovi modelli di sviluppo molte diseguglianze, in termini di diritti, che sussistono a causa di fattori come corruzione, ricchezza maldistribuita e disposizione geografica delle risorse.

L'attenzione alle problematiche della sostenibilità dei sistemi tecnico-economici è notevolmente cresciuta grazie soprattutto all'aver rilevato una serie di problematiche ambientali che sono tutt'ora all'ordine del giorno per le conseguenze che hanno sul pianeta. Tra i principali danni ecologici possiamo citare i seguenti [Vezzoli et al., 2009]:

- Effetto serra. Esso è tra le principali cause del cambiamento climatico e consiste nell'aumento di gas in grado di bloccare le radiazioni solari. I gas serra (tra cui il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il biossido di azoto, i cloro fluoro carburi, etc.) servono, entro certi valori, a mantenere la temperatura della Terra, ma l'aumento delle concentrazioni può portare a gravi conseguenze per l'ecosistema. Per citarne alcune, si pensi allo scioglimento dei ghiacci, all'innalzamento delle acque ed alla desertificazione.
- Assottigliamento della fascia d'ozono. Le attività umane generano una serie di gas che vanno a distruggere la fascia di ozono stratosferico che protegge la Terra, trasformandolo in ossigeno. Il ritmo di distruzione è superiore a quello di formazione naturale, per cui si sta registrando negli anni un progressivo assottigliamento. Gli effetti derivano da un'eccessiva penetrazione dei raggi UV che è causa di tumori della pelle;
- Acidificazione. La produzione di sostanze particolarmente basiche a contatto con l'acqua piovana determina la formazione di acidi che vanno a modificare il PH del terreno, provocano la mancata crescita della vegetazione e la contaminazione delle acque cittadine. Gli effetti sull'uomo sono un'immediata conseguenza (infezioni alle vie respiratorie, bronchiti, asma, ecc.) della produzione di anidride solforosa e ossido di azoto provenienti dalla combustione degli idrocarburi, dai veicoli a motore, da differenti attività industriali, raffinerie, centrali termoelettriche, solventi e agenti chimici usati anche in agricoltura;
- Eutrofizzazione. Questo fenomeno è dovuto alla sovrapproduzione di determinate sostanze negli ambienti acquatici da parte di scarichi industriali e dall'uso di fertilizzanti, i quali danno luogo ad una crescita eccessiva di biomasse marine tale da intorbidire le acque ed ostacolare il passaggio di luce. Ciò contribuisce al deterioramento della flora e della fauna acquatica;
- Smog fotochimico. Anche in questo caso le emissioni di alcune attività umane reagiscono con la luce solare e danno luogo alla formazione di monossido di carbonio. Esso va ad incidere sulla flora terrestre e sull'attività respiratoria dell'uomo, soprattutto in

combinazione con il cosiddetto smog invernale (polveri fini, gas esausti di automobili, particelle di inceneritori e ciminiere);

- Problema delle risorse. Tale problema è centrale per il tema che si sta trattando, proprio perché i combustibili fossili e le risorse materiali che vengono estratte hanno processi di riformazione molto lunghi, tanto da potersi considerare non rinnovabili, ovvero non facilmente disponibili per le future generazioni. Questo fatto dà modo di ripensare al consumo delle risorse propendendo per quelle rinnovabili (da usare nelle minore quantità possibili ed in maniera efficiente) a scapito di quelle che stanno per esaurirsi.

Si aggiunga la questione dei rifiuti ai già noti problemi elencati precedentemente. Il modello della discarica è ancora tristemente utilizzato, malgrado distrugga territori grazie ai volumi di rifiuti conferiti, agli inquinanti ed ai percolati, non valorizzando una quantità enorme di potenziali risorse. Tendere verso l'eliminazione del rifiuto come concetto, infatti, significherebbe ripensare ad una gestione delle risorse materiali focalizzata sul riciclo e sulla fase di recupero.

Gli "attori" che contribuiscono al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità sono diversi e, in qualche modo, interagiscono tra di loro. La sostenibilità di un prodotto o, più in generale, di un sistema può migliorare (e raggiungere risultati più efficaci) intervenendo su tutti i diversi contesti: quello normativo, quello culturale dei soggetti che acquistano beni e servizi, quello delle aziende produttrici e quello dei progettisti. Poiché è necessario agire sui comportamenti dei soggetti coinvolti, è utile individuare le aree di interesse su cui concentrare gli interventi:

- il quadro normativo e interventi politico-amministrativi;
- il modello di consumo (utenti);
- il modello logistico-produttivo;
- i modelli e gli approcci di progettazione.

Di conseguenza, anche le scienze ingegneristiche nel loro complesso non sono esenti dall'offrire un apporto consistente all'obiettivo di migliorare in modo significativo l'eco-compatibilità dei prodotti e dei progetti.

1.2 Interventi politico-normativi

Benché clienti ed imprese debbano svolgere le loro attività nel modo meno inquinante possibile e senza che vi siano costrizioni di alcun tipo, l'impatto ambientale (e della sostenibilità più in generale) non è solo una questione importante su cui le aziende devono sviluppare una consapevolezza, ma è anche un fattore da considerare in base alle normative vigenti. Un esempio è quello delle norme europee per i rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) [Direttiva 2002/96/CE, 2003] e delle restrizioni sulle sostanze pericolose [Direttiva RoHS

2002/95/CE, 2003]. Tali norme, infatti, introducono nuove prescrizioni per produttori e fornitori di servizi, definendo, inoltre, la responsabilità delle aziende nella fase di dismissione. I produttori che hanno immesso un prodotto sul mercato devono ritirare gratuitamente l'apparecchiatura esausta e provvedere al suo smaltimento, il che rappresenta un aspetto di rilievo per il contesto ambientale, per quello aziendale e dal punto di vista dei progettisti. La direttiva, inoltre, mira a prevenire la produzione di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche, favorendo il re-impiego, il riciclo ed altre forme di recupero dei materiali, in modo tale da ridurre il volume dei rifiuti da gestire. Le categorie più comuni dei dispositivi sono:

- grandi e piccoli elettrodomestici;
- apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni;
- apparecchiature di consumo;
- apparecchiature di illuminazione;
- strumenti elettrici ed elettronici;
- giocattoli e apparecchiature per lo sport e per il tempo libero;
- dispositivi medicali;
- strumenti di monitoraggio e di controllo;
- distributori automatici.

Dalla norma europea si apprende che: “Gli Stati membri incoraggiano la progettazione e la produzione di apparecchiature elettriche ed elettroniche che tengano in considerazione e facilitino la soppressione e il recupero, in particolare il re-impiego e il riciclaggio dei RAEE, dei loro componenti e materiali. In tale contesto, gli Stati membri adottano misure adeguate affinché i produttori non impediscano, mediante caratteristiche specifiche della progettazione o processi di fabbricazione, il re-impiego, a meno che tali caratteristiche specifiche della progettazione o processi di fabbricazione presentino vantaggi di primaria importanza, ad esempio in relazione alla protezione dell'ambiente e/o ai requisiti di sicurezza.” Inoltre si considera che: “Gli Stati membri provvedono affinché i produttori o terzi, che agiscono a nome loro, istituiscano sistemi di trattamento dei RAEE ricorrendo alle migliori tecniche di trattamento, recupero e riciclaggio disponibili. I produttori possono istituire tali sistemi a titolo individuale e/o collettivo.”

La norma avrebbe come effetto il fatto che le apparecchiature debbano essere progettate e costruite in modo tale da garantire elevati tassi di recupero per singolo apparecchio. Evidenziando il ruolo del produttore e le implicazioni future sui prodotti, vengono presentate le possibili strategie di intervento al fine di progettare le apparecchiature elettriche ed elettroniche in modo da facilitarne le attività di dismissione.

Come strumento aggiuntivo, negli ultimi anni l'Unione Europea ha fissato gli obiettivi di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni dannose, sviluppando degli strumenti politico-normativi fra cui le Politiche Integrate di Prodotto (IPP - Integrated Product Policy) al fine di agevolare l'espansione di un mercato di dispositivi a basso impatto ambientale. Questo approccio mira alla creazione di un sistema economico sostenibile, ovvero capace di offrire maggiore coesione sociale, migliori posti di lavoro e soprattutto un ambiente migliore, attraverso la ricerca e la conoscenza da un lato e il cambiamento dei modelli di consumo e produzione dall'altro. L'obiettivo principale è la riduzione degli impatti ambientali lungo il ciclo di vita di un prodotto, tramite l'integrazione delle questioni ambientali nelle politiche industriali, lo sviluppo di un mercato virtuoso, l'introduzione dal lato dell'offerta di una serie di incentivi per incoraggiare l'innovazione in chiave energetico-ambientale e, sul lato della domanda, l'offerta ai consumatori di adeguati strumenti informativi che li spingano verso l'acquisto di prodotti eco-compatibili. I principi generali dell'IPP sono riassunti nei punti sottostanti:

- considerazione del ciclo di vita (life cycle thinking) dei prodotti;
- collaborazione con il mercato (introduzione di incentivi per orientare il mercato verso soluzioni più sostenibili, premiando le aziende più innovative);
- promozione della sinergia tra le industrie, i consumatori e le autorità pubbliche;
- miglioramento continuo (ciascuna impresa può stabilire i miglioramenti in base al proprio rapporto costo/efficacia)
- molteplicità degli strumenti di azione, i quali possono essere di tipo:
 - o Volontario (ad esempio la progettazione ecologica);
 - o Informativo (schemi di etichettatura, certificazione ambientale);
 - o Economico (fiscalità, gestione degli acquisti pubblici);
 - o Normativo (responsabilità estesa del produttore).

Per rendere più efficace l'IPP sono state sviluppate strategie e metodologie che integrano gli strumenti volontari disponibili, fra cui:

- il Green Public Procurement (GPP). Tale pratica si propone di integrare le considerazioni ambientali nelle procedure di acquisto della pubblica amministrazione preferendo merci e servizi dotati di certificazione;
- le etichettature ambientali (EPD - Environmental Product Declaration) e le etichette energetiche (figura 1.1). Essi sono strumenti pensati per migliorare da un lato la comunicazione fra produttori (business to business) e dall'altro quella tra distributori e consumatori (business to consumers), fornendo un tipo di informazione più adeguata in

merito alla scelta dei prodotti e per una giusta consapevolezza da parte dei clienti. Il loro utilizzo è descritto dalle norme ISO 14020;

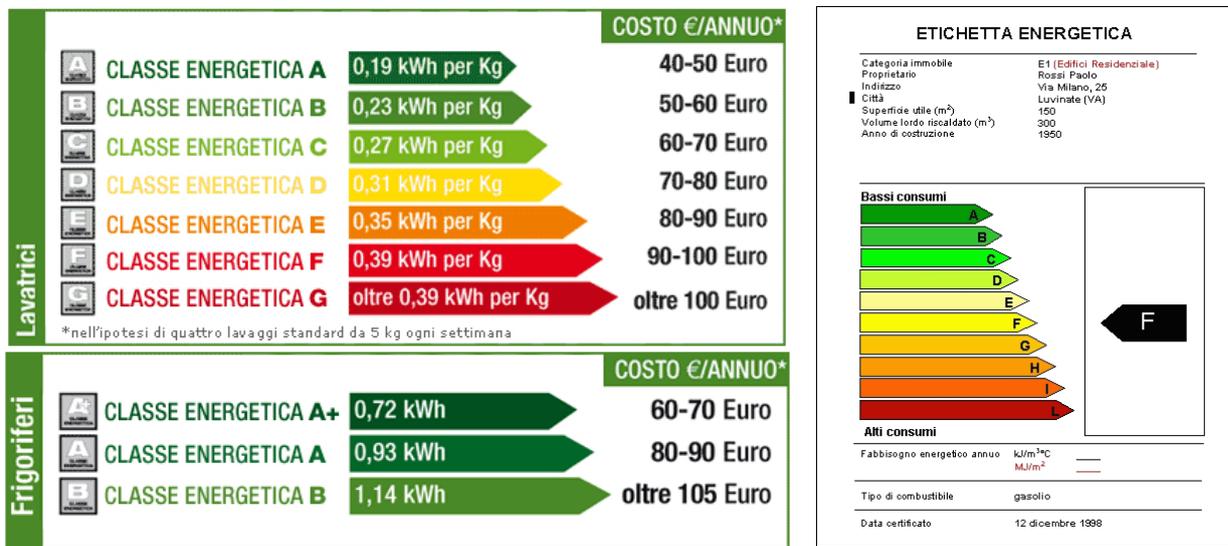


Fig. 1.1 Etichette energetiche e classi di appartenenza

- l'adozione del Life Cycle Assessment (LCA), come base sistematica per conoscere l'impatto ambientale di prodotti e servizi nel loro intero ciclo di vita. Tale approccio si fonda sulla normativa ISO serie 1404X [ISO 14001, 1999] (tabella 1.1).

Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita	
Normativa	Contenuti
UNI EN ISO 14040	Principi e quadro di riferimento
UNI EN ISO 14041	Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione e analisi dell'inventario
UNI EN ISO 14042	Valutazione dell'impatto del ciclo di vita
UNI EN ISO 14043	Interpretazione del ciclo di vita
ISO/TR 14047	Esempi di applicazione dell'ISO 14042
ISO/TS 14048	Formato della documentazione dei dati
ISO/TR 14049	Esempi di applicazione della ISO 14041

Tabella 1.1 Quadro di riferimento per la normativa ISO 1404X

1.3 Sostenibilità come questione culturale

Per ottenere dei risultati efficaci in termini di sostenibilità non si può non considerare il comportamento delle persone. Le popolazioni, infatti, consumano risorse naturali, modificano l'ambiente esterno attraverso le proprie attività e, dunque, producono un impatto.

ambientale è dato dalle scelte di natura sociale ma anche da quelle di natura economica che le persone effettuano come clienti (o consumatori), alimentando i cicli di produzione-fruizione di beni e servizi e generandone la domanda.

Se da un lato risulta fondamentale che le funzioni di un determinato prodotto debbano essere soddisfatte, è anche necessario che le specifiche di progetto siano compatibili con gli obiettivi di sostenibilità, i quali devono essere espressi alla luce di una cultura adeguata sull'argomento. I temi come quelli del riuso, del riciclo, della rigenerazione delle risorse, nonché di un livello corretto di informazione su prodotti, tecnologie e le loro conseguenze sull'ambiente, costituirebbero un approccio più consapevole all'acquisto ed alla fruizione dei beni. Ciò potrebbe essere un grande passo avanti verso una coscienza collettiva, che eviterebbe fenomeni come l'acquisto compulsivo o l'accettazione passiva di modelli di gestione dei rifiuti disastrosi come le discariche. Alcune linee guida di esempio possono essere citate:

- acquisto consapevole degli impatti tramite campagne di sensibilizzazione;
- predilezione per l'accesso ai beni ed ai servizi, piuttosto che per l'acquisto;
- acquisto di beni durevoli, su cui è semplice effettuare la manutenzione;
- propensione per gli "smart products" aggiornabili, configurabili e collegati in reti;
- adozione di beni ad alta efficienza in fase d'uso e basso impatto (lungo il loro ciclo di vita), certificato da label ambientali univoche e condivise.

Queste linee guida, sebbene richiedano una particolare sensibilità per il tema della sostenibilità, si configurano come comportamenti collettivi che, nonostante siano di carattere generale, creerebbero mercati ricettivi di prodotti, componenti complementari e servizi a basso impatto.

1.4 La sostenibilità come visione ed impegno aziendale

Un altro aspetto che bisogna considerare è che vi è una certa difficoltà per alcune aziende ed esponenti del mondo economico-produttivo ad adottare interventi di natura culturale, normativa e scientifica in termini di sostenibilità. E' facile immaginare che, nel momento in cui vengono fatti grandi investimenti su una tecnologia e questi hanno un orizzonte temporale molto ampio per il loro recupero, si tenda a "subire" i processi di cambiamento, in quanto gli effetti sarebbero a completo carico dell'azienda e vi sarebbe un certo timore nel perdere delle quote di business.

A tal proposito, comunque, McAloone sostiene che, affinché le aziende raggiungano gli obiettivi ecologici legati allo sviluppo di prodotto, si debbano attraversare tre fasi per l'integrazione efficace di politiche ambientali in azienda [Simon et al., 1998]:

- motivazione iniziale/sostenuta;
- flusso di comunicazione/informazione;

- progettazione orientata all'intero ciclo di vita del prodotto.

Inoltre, le azioni politico-normative portano l'azienda a rispondere dei costi dovuti alla fase di post-consumo dei beni (es. RAEE) da essa costruiti ed immessi sul mercato. Se l'incarico di dismettere il prodotto è demandato all'impresa si hanno costi aggiuntivi (e che in molti casi andrebbero ad incidere sul prezzo finale) ed una serie di cambiamenti di tipo organizzativo da attuare, nonché la necessità di ottimizzare dei processi (dalla diminuzione degli sprechi di materiale, all'approvvigionamento e la logistica).

L'adozione di soluzioni di prodotto e di servizio più eco-compatibili spesso non è immediata, ma, come accennato in precedenza, un mercato ricettivo e culturalmente cosciente sul tema genererebbe una domanda di beni più sostenibili che incentiva, a sua volta, l'offerta. I produttori in questo modo potrebbero acquisire queste nuove quote di mercato, abbandonando quelle relative a beni obsoleti (la cui domanda sarebbe, almeno teoricamente, in calo).

Si ritiene auspicabile che la domanda e l'offerta di prodotti sostenibili generi dei cicli virtuosi, tali che le problematiche industriali connesse possano trasformarsi nel lungo periodo in opportunità di business, sfruttando gli indotti generati da nuovi prodotti e servizi a basso impatto ambientale. Dal punto di vista strettamente industriale è necessario:

- produrre beni che si basano su tecnologie pulite, preferendo prodotti progettati per funzionare a basso consumo di risorse, sia in fase di produzione che in fase d'uso;
- considerare il ciclo di vita di un prodotto-servizio e promuovere l'impresa che gestirebbe con servizi associati (o appositi) le fasi di "Middle of life" ed "End of life";
- cambiare il modello di business, puntando su altri servizi e non esclusivamente sulla vendita dei prodotti come unica fonte di profitto;
- attuare cambiamenti organizzativi dell'impresa a livello strategico, tattico ed operativo a fronte dei nuovi modelli di business sostenibili.

Un esempio di opportunità d'impresa che si unisce ad un approccio eco-compatibile è il PSS.

1.4.1 PSS: Product Service System

Con PSS (acronimo di Product Service System) si intende quel modello di business che si basa sulla progettazione, lo sviluppo e la fruizione di un prodotto-servizio integrato. Una delle definizioni formali di PSS è la seguente [Van Halen et al., 2005]: "Un insieme commerciale di prodotti e servizi in grado di soddisfare le comuni esigenze di un utente".

In una fase iniziale, quest'approccio è nato sostanzialmente per esigenze di business. Le aziende di tipo strettamente manifatturiero avevano la necessità di adeguarsi alla domanda del mercato proponendo tutta una serie di servizi associati ai prodotti ed ottenere così nuovi profitti ed

opportunità di accrescere le quote di mercato. L'aumento dei servizi associati al prodotto ha avuto come primo effetto il ripensamento dei prodotti stessi a livello di sistema ed una conseguente creazione del valore attraverso un'offerta molto più "immateriale" ma efficace e funzionale per gli utenti.

Un altro effetto della de-materializzazione è stato l'aumento della sostenibilità nell'offerta delle aziende, tanto che il PSS è diventato uno dei modelli di business di riferimento per qualsiasi soggetto voglia fare impresa in maniera eco-compatibile. Ciò è vero, in quanto il PSS ha contribuito alla nascita e alla diffusione degli "smart products", prodotti aggiornabili, configurabili, interconnessi e multifunzionali, i cui servizi associati allungano la loro vita in maniera considerevole rispetto ai prodotti basati su un modello di business tradizionale.

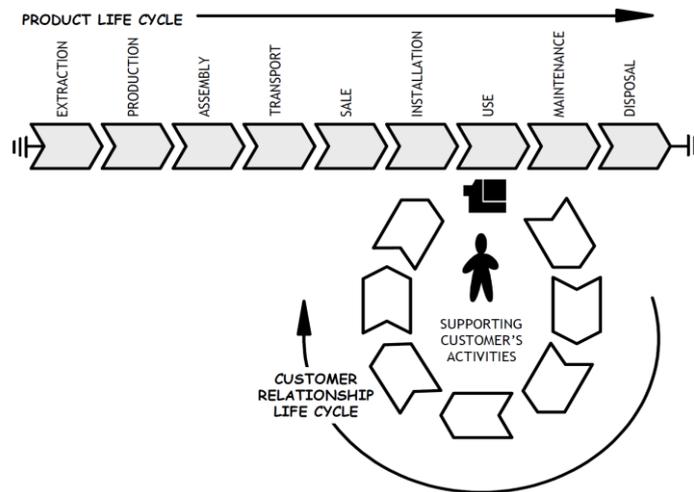


Fig. 1.2 Sottociclo della fase d'uso [Tan et al, 2006]

Ovviamente il modello PSS può essere molto più orientato ai servizi, invertendo addirittura la sua struttura tradizionale, cioè considerando il prodotto come puro mezzo di erogazione di un servizio complesso e strutturato (il modello, quindi, è molto più orientato al servicing) e aumentando, almeno in teoria, la potenziale sostenibilità del sistema (figure 1.3-1.4).

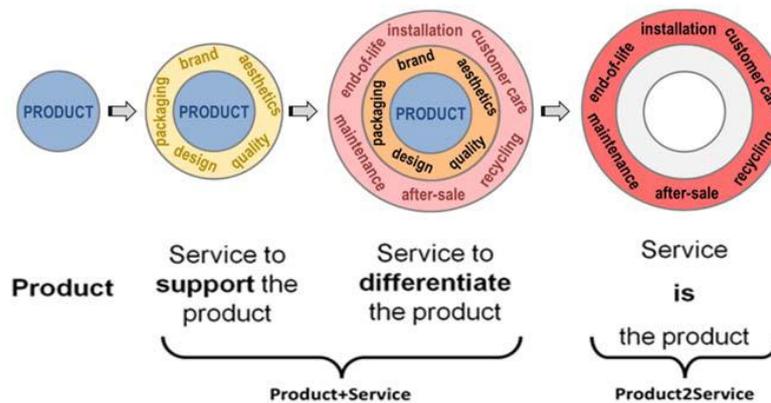


Fig. 1.3 Il concetto dei prodotti estesi: "Prodotto+Servizio" e "Product2Service" [Thoben et al., 2001]

Benchè il PSS sia considerato nella letteratura un ottimo esempio di de-materializzazione, bisogna considerare che il modello necessita, in alcuni casi, di reti telematiche ad hoc, di infrastrutture di supporto e di prodotti materiali affinché i servizi vengano erogati correttamente.

Le tipologie di PSS sono state identificate in tre classi:

- 1) PSS orientati al prodotto. E' il classico di PSS in cui il prodotto è venduto al cliente insieme ad un set di servizi associati (si pensi ad un smartphone con applicativi software aggiornabili e funzioni aggiuntive acquistabili);
- 2) PSS orientati all'uso. La proprietà del prodotto è mantenuta dal fornitore del servizio, il quale ne vende le funzioni (ad esempio il car-sharing, il noleggio, ecc.);
- 3) PSS orientati al risultato. Il prodotto, in questo caso, è completamente sostituito dal servizio. Il cliente, infatti, compra esclusivamente la prestazione offerta, come nel caso delle lavanderie a gettoni o i servizi di stampa digitale.

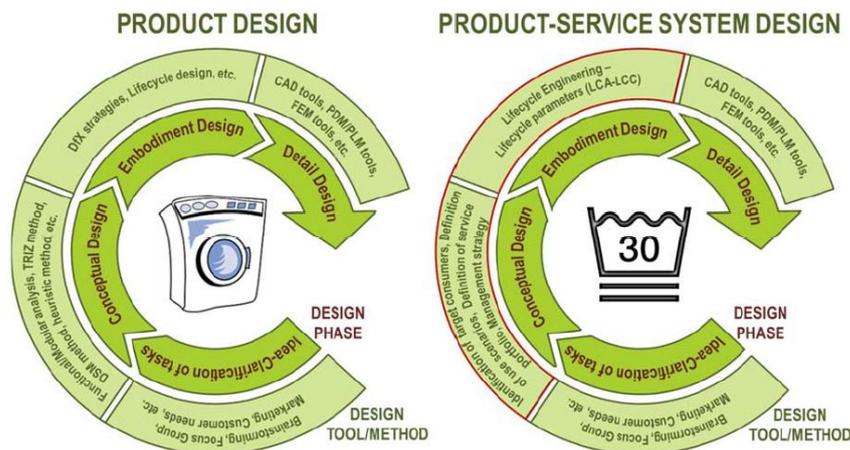


Fig. 1.4 Dalla progettazione del prodotto a quella del prodotto-servizio [Favi et al., 2012]

Diversi autori affermano che i PSS migliorano l'eco-efficienza di un "fattore 4" [Cook, 2004], permettendo modelli di produzione/consumo sostenibili e dando alle aziende possibilità di crescita di business, innovazione e diversificazione [Van Halen et al., 2005].

1.5 Sostenibilità nella progettazione

1.5.1 Le responsabilità dei progettisti

La fase progettuale di un prodotto (o di un servizio complesso) è sicuramente determinante per gli impatti che esso genera nel momento in cui viene creato e successivamente utilizzato. A partire da ciò che viene delineato nei progetti, infatti, saranno scelte le geometrie, i materiali, i cicli di produzione, gli impianti per eseguire le lavorazioni e gli strumenti di supporto, le caratteristiche tecniche dei prodotti ed il loro modo di funzionare, che, insieme a tanti altri fattori, inciderà sull'ambiente esterno. Progettare, infatti, è innanzitutto pianificare (seppure con

dei cambiamenti in corso d'opera) ciò che sarà il prodotto e come l'intero sistema funzionerà a regime. Quest'ultimo aspetto è di notevole interesse, poiché lo sviluppatore sarà tenuto a progettare anche il "modello d'uso" di un determinato dispositivo.

Come ha affermato Nathan Stegall [Stegall, 2006]: "In una società sostenibile il ruolo del designer non è semplicemente quello di creare prodotti sostenibili, ma anche immaginare prodotti, processi e servizi che incoraggiano un ambiente sostenibile diffuso". Sulla stessa linea è Wimmer [Wimmer e Zust, 2003], il quale discute sull'estensione della responsabilità dei progettisti e del ruolo che essi hanno tra industria e mercati (figura 1.5).



Fig. 1.5: Il nuovo ruolo del progettista

Nell'ottica di una progettazione più consapevole da un punto di vista ambientale e della sostenibilità, la figura del progettista evolve con l'introduzione di un nuovo modo di pensare le soluzioni di progetto, sviluppandole e valutandole rispetto a tutte le fasi del loro ciclo di vita. Questo nuovo approccio mette in risalto la responsabilità del progettista, il quale dovrà soddisfare i requisiti del mercato compatibilmente con scelte di prodotto sostenibili e, cioè, introducendo i requisiti ambientali nella normale attività di progetto.

La progettazione, in definitiva, può (e in questo caso deve) influenzare il mercato, poiché la creatività del designer, nonché la sua capacità di innovare e proporre soluzioni diverse, può essere un valido contributo allo sviluppo di prodotti e sistemi che siano compatibili con uno sviluppo sostenibile globale. Per fare questo bisogna integrare i requisiti ambientali nell'attività di progetto, cercando, comunque, di creare un'offerta di prodotti attrattiva per i clienti.

1.5.2 Principi di sostenibilità nel design

L'introduzione dei requisiti di natura ambientale e che tenessero conto della sostenibilità di un sistema si è affermata in modo progressivo passando da un'attività considerata "opzionale" ad una pratica realmente indispensabile, soprattutto alla luce dei dati circa il consumo delle risorse e

sul cambiamento climatico degli ultimi anni. Nell'ambito del design il tema della sostenibilità dei prodotti e dei servizi è stato affrontato tramite filosofie di progettazione ed approcci che inglobassero (e sviscerassero) la problematica ambientale. Tra i principali esempi si riportano:

- il Design for Sustainability (o Sustainable Design);
- il Design for Environment;
- l'Eco-design;
- il Life Cycle Design.

Questi approcci cercano di favorire una progettazione di beni secondo i principi di sostenibilità ambientale, sociale ed economica. Essi si propongono di sviluppare prodotti a basso impatto ambientale, preferendo progetti innovativi che possano conciliare il rispetto nonché la rigenerazione delle risorse naturali, il benessere e le differenze tra individui, congiuntamente agli obiettivi di business degli attori economici. Inoltre, i nuovi criteri di progettazione devono tener conto di alcuni problemi che sono, in qualche modo, un punto di partenza per questi nuovi approcci: la legge dei ritorni decrescenti per quanto riguarda le risorse naturali e la non sostenibilità degli investimenti se questi si basano su risorse scarse.

Insieme a questi nuove filosofie di progettazione sono stati proposti dei modelli relativamente recenti che evidenziassero il miglioramento ambientale dei prodotti in relazione al grado di innovazione. Nel modello di Brezet, ad esempio, vengono definiti quattro momenti determinanti per le attività di sviluppo di un prodotto, a cui corrispondono livelli crescenti di miglioramento ambientale [Brezet et al., 1999][McAloon, 2005] (figura 1.6):

- 1) Improvement. In tale fase il prodotto esistente viene migliorato attraverso interventi di efficienza energetica e qualità nella costruzione;
- 2) Re-design. Il prodotto è riprogettato senza tuttavia cambiare la sua architettura, può essere diminuita, ad esempio, la quantità di materiale impiegata e alcuni componenti vengono sostituiti da altri a più basso impatto;
- 3) Function Innovation. Il prodotto è innovato nelle sue caratteristiche, mantenendo alcuni dei requisiti di base e attraverso lo sviluppo di nuove funzionalità sostitutive e/o aggiuntive (si pensi alle nuove lavatrici che offrono la possibilità di avere programmi controllati da remoto o agli smartphone dotati di diverse applicazioni di supporto in aggiunta alla comunicazione vocale mobile);
- 4) System Innovation. Si ha un'innovazione a livello di sistema. I prodotti sono concepiti rivoluzionando i paradigmi e ciò può tradursi nella sostituzione del prodotto tramite un servizio o nella necessità di ulteriori infrastrutture per supportare nuove funzionalità. In

questo modo viene modificato il contesto, si incide sulle modalità di fruizione di un prodotto e sul modello di business da un punto di vista aziendale.

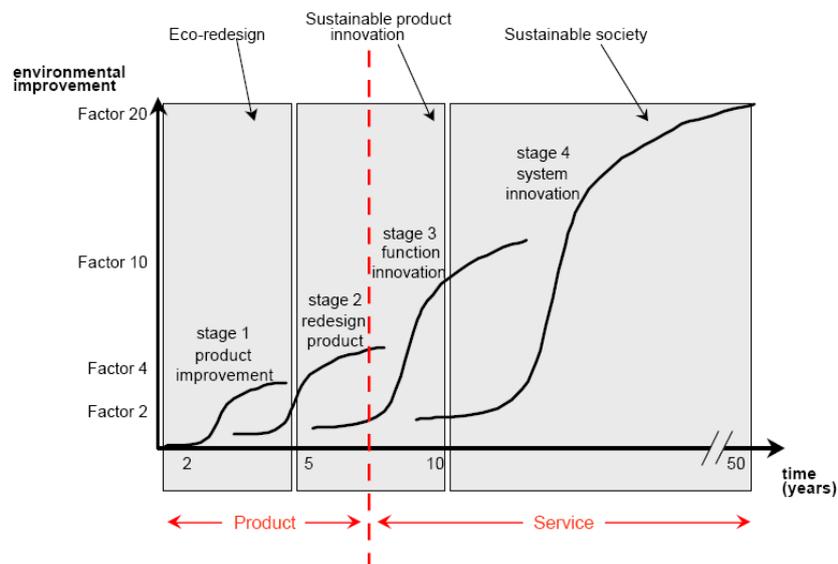


Fig. 1.6 Il modello di Brezet: fasi di innovazione e miglioramento ambientale

Il modello suggerisce un altro aspetto molto interessante. Con il susseguirsi delle varie fasi i cambiamenti diventano sempre più radicali ed arrivano fino alla ridefinizione del contesto in cui un dispositivo viene utilizzato. Da una semplice cura più spiccata per la qualità dei componenti, ad esempio, si arriva alla ridefinizione dell'intero scenario di utilizzo di un prodotto.

Per attuare il cambiamento nel modo di progettare, produrre e fruire di prodotti e servizi è stato necessario dotarsi di un set di strategie che dessero almeno un orientamento. Con particolare riferimento al design, le linee guida a livello strategico cercano di indirizzare l'attività di progetto verso soluzioni più sostenibili. Tra le più generali ed importanti si riportano le seguenti [Vezzoli, 2009][McAloone, 2009]:

- Minimizzare il consumo di materiale. Minimizzare le quantità di materiali impiegati è una strategia di progettazione che cerca di operare sulle risorse e che si estende per tutto il ciclo di vita del prodotto. Il benefici di questa scelta si hanno nel fatto che non solo si limita l'estrazione delle materie prime e la loro lavorazione, ma diminuiscono anche tutte le operazioni logistiche connesse (comprese trasporti e dismissioni) con un beneficio sull'ambiente che, in larga scala, è davvero considerevole. Progettare in questa direzione, ovviamente, ha come risolto una pluralità di sforzi in termini di creatività e di capacità tecniche, poichè bisogna garantire la qualità con minore quantità di materiali;
- Minimizzare il consumo di energia. Utilizzare questa strategia coinvolge più aspetti, infatti, gli obiettivi di efficienza sono legati alla progettazione a livello di sistema, di

- architettura di un prodotto, di componentistica e tecnologia. Da un punto di vista decisionale, ad esempio, orientarsi all'ottimizzazione delle risorse e cercare, contestualmente, di optare per fonti e tecnologie di produzione energetica a basso impatto diminuisce la spesa energetica per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime;
- Scegliere risorse rinnovabili. Significa propendere per quelle risorse il cui ritmo antropico di consumo non supera quello di ricrescita e preferire le risorse che risultano di minore esauribilità sia dal punto di vista energetico che dei materiali;
 - Scegliere risorse non tossiche. Ciò significa selezionare i materiali in base alla loro composizione, considerando le trasformazioni, i trattamenti ed evitando additivi che potrebbero essere tossici;
 - Ottimizzare la vita dei prodotti. Questa linea guida prescrive sostanzialmente di progettare i beni in modo tale che siano durevoli il più possibile. A parità di facilità di smaltimento, un prodotto più longevo risulta meno impattante rispetto ad un altro equivalente da punto di vista funzionale, poiché la frequenza di sostituzione a causa di malfunzionamenti, obsolescenza ed usura diminuisce notevolmente e ciò permette di evitare molte operazioni logistiche (estrazione materie prime, approvvigionamenti, smaltimento, ecc.) dovute alla sostituzione del prodotto stesso sul mercato. Queste considerazioni offrono uno spunto per ripensare i prodotti ed i servizi, tenendo conto che la loro facile manutenzione, l'aggiornamento, la semplicità di smontaggio, ecc., sono misure che ne ottimizzano la vita utile;
 - Estendere la vita utile dei materiali. Tale pratica si focalizza inevitabilmente sul concetto di recupero dei materiali come scarti produttivi o da prodotti esausti la cui funzionalità è fortemente compromessa. Essa ha come beneficio il mancato conferimento in discarica di materiali ancora utili che, quindi, possono essere reimpiegati (ovviamente a valle di trasformazioni che li rendano riutilizzabili). Per agevolare l'aumento della quantità di materiali riciclati e riciclabili di un prodotto bisogna, anche in questo caso, partire dalla progettazione, prevedendo, ad esempio, l'utilizzo di parti facilmente separabili e componenti standard che hanno forte richiesta sui mercati;
 - Incorporare le caratteristiche ambientali nel prodotto. Con tale linea guida, invece, s'intende l'inserimento di requisiti che vanno ad influire in modo decisivo anche sulle prestazioni. Alcuni esempi possono essere i prodotti multi-funzione, l'uso di materiali riciclati, o l'inserimento di componenti che permettano all'utente di regolare i livelli di potenza per ottimizzare i consumi (funzionamento a basso regime ed efficienza);

- Propendere per architetture modulari. Il prodotto deve essere progettato utilizzando un'architettura che prevede la distinzione netta delle varie aree funzionali (ad esempio un blocco di alimentazione, oppure un'area dedicata ad un sistema di raffreddamento). Ciò offre la possibilità di smontare facilmente le parti e di sostituire i componenti esausti. Sono da evitare, quindi, parti di natura diversa fuse tra loro ed è utile propendere per un numero ottimizzato di collegamenti meccanici ed incastri che rendano separabili le parti in fase di manutenzione e smontaggio;
- Mostrare le caratteristiche ambientali del prodotto attraverso la progettazione fisica. Accanto alle linee guida classiche può essere utile anche promuovere il miglioramento ambientale di un dispositivo attraverso delle caratteristiche che siano facilmente visibili. Si pensi ad una scocca molto essenziale, oppure ad un pannello montato su un dispositivo che rende agevole la regolazione del regime di funzionamento, i quali sono esempi di innovazione che uniscono l'eco-design ad obiettivi commerciali e di comunicazione;
- Progettare il ciclo di vita e poi il prodotto. L'ultima linea guida è interessante, poiché rappresenta un fattore chiave per il problema della sostenibilità, offre un "modus operandi" valido per qualsiasi sistema ed è uno dei punti di partenza per la presente ricerca. Progettare prima il ciclo di vita e poi il prodotto dà la possibilità di riflettere su tutti i potenziali problemi che potrebbero presentarsi durante un iter progettuale di un qualsiasi dispositivo. C'è bisogno, infatti, di generare concept di prodotto tali che tutte le fasi siano state sviscerate (per quanto possibile), piuttosto che risolvere i problemi ambientali successivamente, cioè quando il prodotto è ormai sul mercato ed i rimedi potrebbero avere impatti di notevole entità.

1.5.3 Progettare il ciclo di vita di un prodotto

Il Life Cycle Thinking è quell'approccio di progettazione dei prodotti che considera il loro intero ciclo di vita. La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) ne dà una definizione in termini pratici: "La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento di materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale." [SETAC, 1999]. Questo approccio, quindi, prende in considerazione una serie di impatti connessi all'intero ciclo di vita di un prodotto (o sistema), malgrado la definizione dei limiti dello studio a volte sia piuttosto complessa e richieda molto tempo.

Gli obiettivi principali possono essere sintetizzati come segue: porre l'attenzione sul fatto che un

sistema troppo complesso ha ricadute negative sull'ambiente; rendere coscienti gli individui delle conseguenze dirette tra le attività umane e gli impatti ed, inoltre, fornire suggerimenti adeguati per scelte future meno inquinanti; rendere più consapevoli le aziende dell'impatto ambientale legato alle loro attività, proponendo modelli di business meno nocivi; essere di supporto all'individuazione ed alla riduzione dei costi; creare una cultura della sostenibilità. Sebbene qualsiasi attività preveda un carico ambientale associato di piccola o grande entità, il "Life Cycle Thinking" cerca di rendere più consapevoli clienti, produttori e progettisti, suggerendo una riduzione dell'impatto ambientale in ogni fase della vita utile di un bene (gate) sia attraverso l'innovazione tecnologica, sia attraverso un set di approcci fra cui il Design for Environment, la Life Cycle Assessment, il Life Cycle Costing e le Integrated Product Policies.

La letteratura scientifica distingue cinque grandi fasi per un "life cycle". La fase di "Raw Material" indica il periodo in cui le materie prime dovranno essere reperite. In tale fase bisogna considerare molti fattori ambientali e un numero notevole di attività. Bisogna verificare la disponibilità della materia prima (se essa è rinnovabile o ad esaurimento) ed il luogo di ubicazione. Il set di risorse che è stato selezionato dovrà ovviamente essere estratto, è ciò genera una serie di attività di approvvigionamento, trasporto, movimentazioni e distruzione di aree di territorio (le operazioni possono diventare addirittura energivore). Le materie prime, naturali e non, inoltre, saranno sottoposte ad operazioni di affinamento e, in molti casi, di sintesi o stabilizzazione. Quest'ultime operazioni generano carichi ambientali aggiuntivi.

Altra fase cruciale è la produzione dove i contributi al carico ambientale sono dovuti agli impianti di trasformazione delle materie prime, dei semilavorati e dei prodotti finiti, ma anche agli impianti necessari per il funzionamento delle attività (elettrico, termico, condizionamento, ecc.) e quelli accessori. Si aggiungono, inoltre, le fasi di assemblaggio delle parti, la logistica interna ed il testing dei dispositivi prima dell'immagazzinamento. Segue la fase di distribuzione, in cui gli impatti ambientali sono legati, per la maggior parte, a tutta la logistica esterna, dai consumi dei carburanti della flotta per il trasporto ai vari passaggi della supply chain (che ne determinano l'aumento dei viaggi), dalla rete di vendita fino ai clienti.

Gli impatti nella fase d'uso, invece, sono prevalentemente legati alle funzioni, alle caratteristiche ambientali intrinseche del prodotto e all'efficienza delle sue prestazioni (anche di natura ambientale). E' in tale fase, infatti, che si hanno le perdite di energia per il funzionamento di un dispositivo, ma anche quelle legate a componenti puramente passivi (dissipatori), nonché gli impatti ambientali per l'impiego di sostanze aggiuntive durante la manutenzione. Altri due aspetti giocano un ruolo importante: l'affidabilità del prodotto e l'attività di servicing. Come

discusso in precedenza, la possibilità di aggiornare, mantenere, personalizzare un prodotto allungano (in termini di tempo) la sua vita utile, mentre l'affidabilità è legata alla sua struttura fisica. Se un dispositivo subisce un guasto e la sua capacità di funzionare correttamente non può essere ripristinata attraverso la semplice sostituzione di uno o più componenti (oppure con un intervento di manutenzione), con buona probabilità verrà generata un'ulteriore serie attività legata alla produzione di un nuovo dispositivo sostitutivo, che andrà ad aggiungersi agli impatti ambientali relativi alla dismissione del prodotto malfunzionante. Questi impatti potrebbero essere anche ingenti nel caso in cui non sia stata creata un'intera filiera per il recupero ed il riciclo dei materiali utili. Ciò, infatti, alimenterebbe le pratiche poco sostenibili delle discariche e dell'incenerimento. La fase di dismissione è legata a tutte le precedenti ed alle problematiche che sono già state accennate. Se correttamente analizzata con la giusta consapevolezza, essa apre scenari determinanti per i dispositivi giunti a fine vita, in quanto è possibile articolare una serie di attività logistiche importanti e quantomai necessarie:

- il sistema di raccolta;
- la separazione in categorie merceologiche dei prodotti esausti;
- la gestione (il disassemblaggio, la separazione dei materiali, la pulitura e lo stoccaggio);
- il ripristino dei materiali e dei componenti riusabili;
- le operazioni di riciclo e la valorizzazione dei materiali recuperati;
- il trattamento dei rifiuti sanitari e speciali.

Focalizzandosi sulla fine della vita di un prodotto, i progettisti possono formulare delle ipotesi sia sulla scelta dei materiali che sulla loro lavorazione, nonché sull'intera produzione. Si comprende facilmente, quindi, come la fase critica dell'“End of Life” debba essere considerata nella progettazione. Per quanto concerne l'ultima fase di vita dei prodotti, l'esperienza ha dettato vari tipi di strategia [Simon et al., 1998]:

- a) Estensione/Ritardo. L'azienda produttrice può garantire all'utente finale che il prodotto, una volta perse alcune sue caratteristiche qualitative e dopo essere stato sottoposto a determinate operazioni, può essere ulteriormente utilizzato;
- b) Riuso. In questo caso è la stessa azienda produttrice a farsi carico del ricondizionamento di un prodotto usato e/o di sue componenti;
- c) Rifabbricazione. In questo caso l'azienda produttrice s'impegna, oltre che a rivendere il prodotto usato, a ripristinare le sue caratteristiche fisiche e qualitative;
- d) Riciclo. Questa opzione porta il produttore a farsi carico del riciclo dei componenti dei prodotti ormai dismessi all'interno della catena produttiva;

e) Discarica. Com'è facile comprendere, tale scelta è la meno sostenibile e, quindi, dovrebbe essere evitata il più possibile.

L'approccio progettuale basato sul ciclo di vita del prodotto/servizio si è ulteriormente evoluto, sostituendo al classico ciclo ad anello aperto (Cradle to Grave) il più auspicabile modello ad anello chiuso (modello Cradle to Cradle), dove gli output della fase di dismissione di un prodotto possono diventare, in larga parte, le materie prime in input per un nuovo ciclo (figura 1.7), andando a ridurre la frazione di materiali che, attualmente, non viene recuperata.

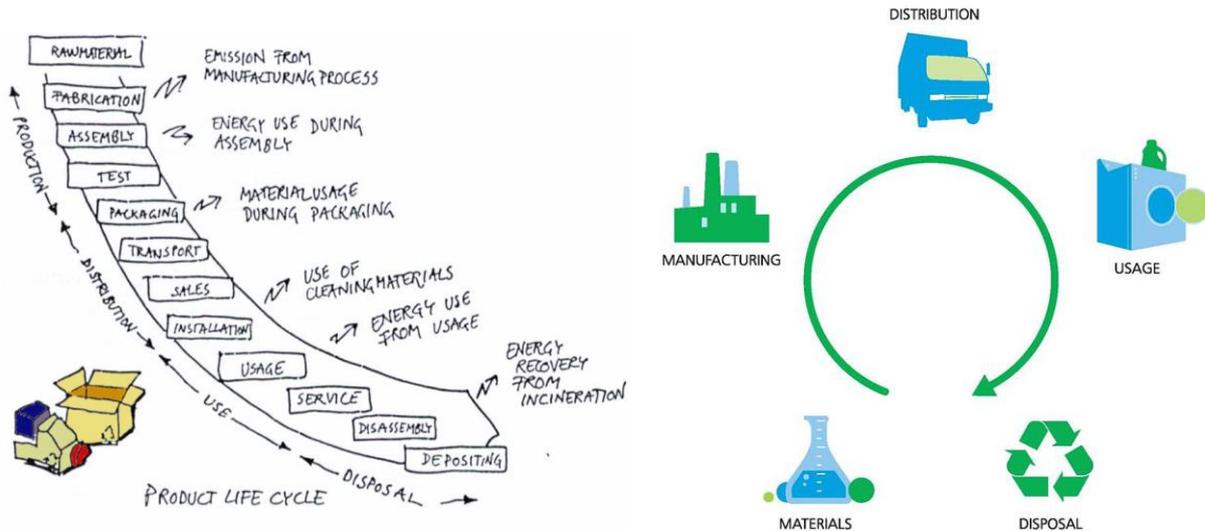


Fig. 1.7 Ciclo di vita ad anello aperto e ad anello chiuso

In definitiva, un approccio che punta a progettare prodotti più eco-sostenibili deve, in qualche modo, definire ed estendere le sottofasi del loro ciclo di vita (ed estendere il più possibile la loro vita utile), assumendo come linea guida principale la prevenzione degli impatti ambientali in sede progettuale piuttosto che la gestione a posteriori delle problematiche connesse ad un dispositivo (figura 1.8).

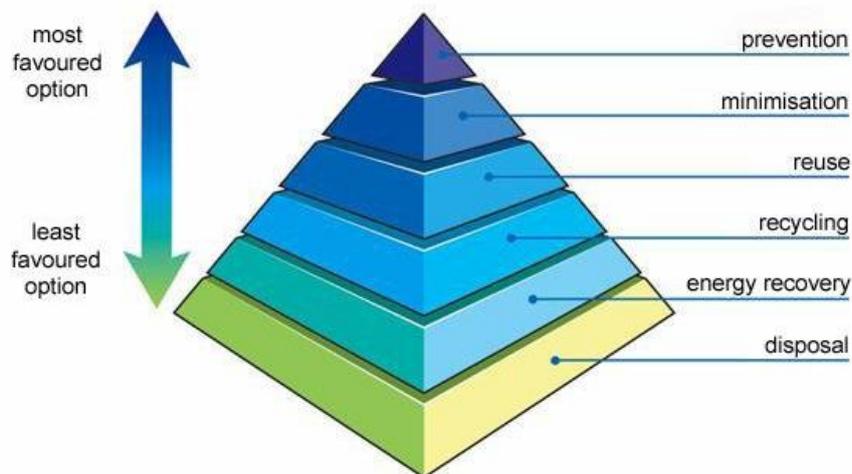


Fig. 1.8 Gerarchia delle opzioni strategiche

1.5.4 Sostenibilità nell'early design

La questione della sostenibilità dei prodotti industriali è oggetto di ricerca scientifica da diversi anni. Questo tema è molto importante a causa degli impatti che le scelte progettuali (ma anche normative e commerciali) hanno sull'ambiente e sulla società nel momento in cui i prodotti vengono messi in vendita sul mercato e vengono utilizzati. Ogni dispositivo industriale, infatti, genera un impatto ambientale che, in ogni caso, necessita di essere quantificato al più presto. Da un punto di vista strettamente progettuale, un approccio innovativo in grado di soddisfare quest'esigenza potrebbe consistere in uno strumento che consenta orientare il progettista verso soluzioni di prodotto con un livello accettabile di sostenibilità (in termini di materiale impiegato, risorse energetiche spese, riciclabilità, ecc.) e che, allo stesso tempo, siano in grado di eseguire correttamente la funzione per la quale sono state progettate.

Benchè i prodotti possano essere valutati attraverso metodologie come il Life Cycle Assessment (LCA) e relativi software, negli ultimi tempi si sta sviluppando un vivo interesse per la valutazione ambientale dei dispositivi già in fase di progettazione concettuale. Il problema della valutazione dei concept nelle fasi iniziali di progetto è stato affrontato dalla metà degli anni novanta oltre che in alcuni lavori della letteratura recente [Devanthan et al., 2010] [Bohm et al., 2010]. Queste ricerche offrono l'opportunità di indagare su nuovi aspetti, in particolare su come i progettisti possono essere supportati in una valutazione ambientale di massima.

Già in fase concettuale, dove le idee e le soluzioni cominciano ad essere analizzate, i progettisti dovrebbero focalizzare la loro attenzione su aspetti che incidono sulla sostenibilità e riprogettare (talvolta "ripensare") un dispositivo anche in termini di ciclo di vita. Ciò offrirebbe l'opportunità di influenzare in modo efficace la performance ambientale (figura 1.9), in quanto una valutazione preliminare di un primo layout di prodotto potrebbe consentire di determinare soluzioni più sostenibili relativamente presto ed evitare quelle potenzialmente dannose.

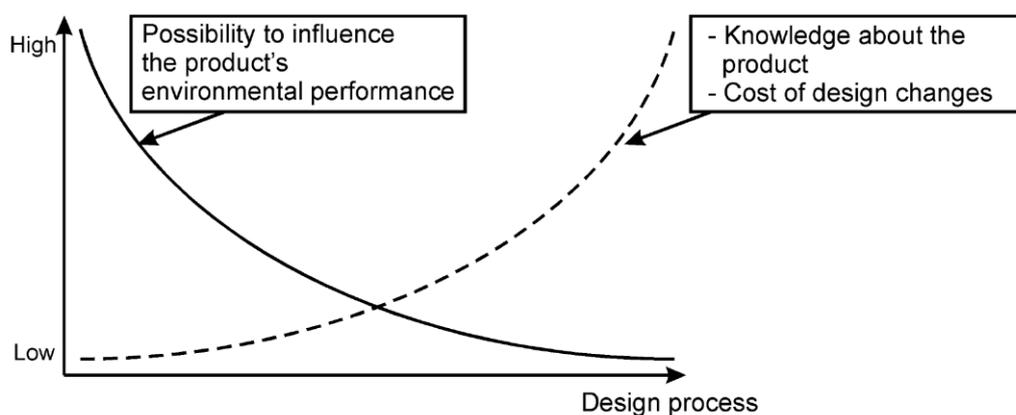


Fig. 1.9 Performance ambientale e di costo delle modifiche in base al livello di dettaglio del progetto

Dal momento che i progettisti devono concentrare i loro sforzi in fase concettuale, sono necessari strumenti e metodi adeguati per supportare la selezione dei concetti in base alle caratteristiche ambientali e ciò offre sicuramente un spunto di riflessione per lo studio e lo sviluppo una metodologia strutturata che vada ad integrare ciò che offre la ricerca recente. La metodologia proposta nel presente lavoro sfrutta, come vedremo, diversi approcci:

- a) l'approccio funzionale nella fase concettuale del design;
- b) la Design Structure Matrix (DSM);
- c) un approccio basato su indicatori (Environmental Performance Indicators);
- d) il Weighted Product Method (WPM), appartenente alle tecniche di Multi-Criteria Decision Making (MCDM);
- e) il concetto di Pareto-efficienza.

Tali approcci, descritti in dettaglio nel terzo capitolo, saranno utilizzati in maniera congiunta per analizzare e valutare i concept dei prodotti, che saranno creati tramite un approccio funzionale. Inoltre, considerando che l'utilizzo della DSM è piuttosto comune in diverse aree scientifiche per la gestione delle architetture di dispositivi e sistemi, viene suggerita la possibilità di un suo impiego nella fase di sviluppo di un prodotto, tenendo conto anche delle sue performance ambientali. In questo lavoro, infatti, si cerca di indagare su ulteriori applicazioni della DSM, con l'obiettivo di supportare i progettisti in una valutazione ambientale di massima delle soluzioni di progetto già in fase di early design. In particolare, la metodologia proposta è basata su una matrice estesa (per dimensioni e caratteristiche) che gestisce non solo le connessioni tra i vari componenti di un concept, ma anche i legami con l'ambiente esterno, supportando in modo quantitativo i progettisti nel loro lavoro.

L'approccio basato su indicatori, invece, offre l'opportunità di valutare i concept di prodotto secondo alcuni fattori importanti che li caratterizzano. In questo modo, un eventuale processo di assessment può essere condotto riducendo gli sforzi legati ad una valutazione completa del ciclo di vita (analisi LCA), che deve essere fatta necessariamente su prodotti reali.

Le tecniche di Multi-Criteria Decision Making (MCDM) possono essere usate allo scopo di ottenere una classifica delle soluzioni di progetto. La nuova metodologia si propone di utilizzare, tra le numerose tecniche, il Weighted Product Method (WPM) per misurare l'impatto ambientale delle diverse soluzioni (equivalenti dal punto di vista funzionale) tramite un confronto a coppie, sulla base degli indicatori di prestazione ambientale (EPI) introdotti precedentemente. I risultati ottenuti sono poi utilizzati congiuntamente ad altri parametri di valutazione, in un successivo processo di selezione che sfrutta un approccio paretiano.

Si precisa che questo lavoro è focalizzato sullo sviluppo di un prodotto con particolare attenzione per la fase strategica della progettazione concettuale, dove viene affrontato il problema della sostenibilità attraverso l'introduzione di una nuova metodologia che va ad integrare gli strumenti per l'eco-design attualmente esistenti.

La metodologia proposta, infatti, cerca di essere di supporto ai progettisti sia nella fase creativa (conceptual design), cioè quando si deve ripensare una soluzione e si cercano di definire i componenti di una possibile soluzione costruttiva, sia dal punto di vista ambientale, poichè essa permette una valutazione di queste stesse soluzioni. Questo è un elemento fondamentale dell'approccio proposto nel presente lavoro, infatti, se tale valutazione venisse eseguita quando ormai i componenti del prodotto sono stati progettati in maniera dettagliata, si avrebbero delle limitazioni su scelte di progetto più radicali e di più ampio respiro rispetto alla sostenibilità, poichè diventerebbe difficile essere incisivi sulle prestazioni ambientali a livello di prodotto e, ancora meno, a livello concettuale e strategico.

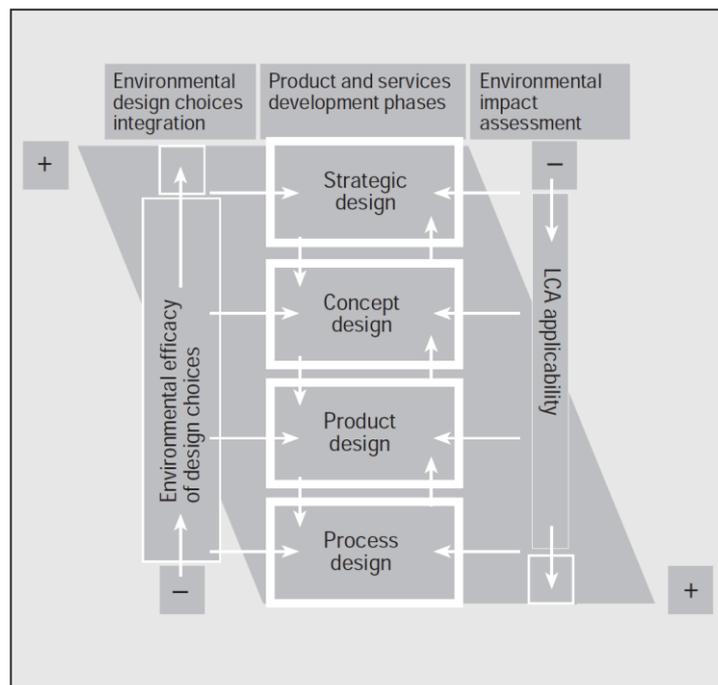


Fig. 1.10 Legame tra processo di sviluppo ed efficacia ambientale secondo il modello di Vezzoli

Per questa ragione, è necessario che la valutazione ambientale degli elementi che compongono un dispositivo sia svolta durante la sua progettazione concettuale (early design), cioè nel momento in cui i componenti sono costituiti da elementi grossolani, definiti nel prosieguo “archetipi funzionali”. Diventa possibile, così, tornare indietro e ripensare l'architettura del prodotto e, in alcuni casi, anche riformulare soluzioni concettuali più radicali.

Il miglioramento della performance ambientale nell'early design costituisce un tema su cui la ricerca ha iniziato ad interrogarsi. Vezzoli, per citare un esempio, ha fornito uno schema

semplice ma molto esaustivo per la problematica in questione [Vezzoli et al., 2009], affermando che l'introduzione dei fattori che determinano la sostenibilità di un prodotto deve attuarsi il prima possibile (livello strategico e concettuale), affinché gli strumenti di supporto al design, che cercano di ridurre gli impatti ambientali, siano realmente efficaci (figura 1.10).

CAPITOLO 2

Analisi dei principali approcci per l'eco-design

2.1 Introduzione

E' opinione diffusa in letteratura tecnica che solo una piccola parte delle risorse in termini di tempo e di spesa sia dedicata alla fase concettuale lungo tutto processo di progettazione, sebbene le decisioni prese in questa fase determinino il 70-80% del costo totale del prodotto [Ulmann, 1997][Bohm et al. 2010] e, probabilmente, anche parte degli impatti ambientali [Ramani et al., 2010], decretando, in sostanza, se il dispositivo sarà compatibile con i requisiti di sostenibilità o meno. Benché sia opportuno affermare che la fase concettuale è sempre affetta da una certa limitatezza dei dati di cui si è in possesso, nonché da un'impresione degli elementi decisionali che il progettista ha a sua disposizione, risulta comunque utile quantificare, in qualche modo, il grado di sostenibilità di un determinato prodotto [Sousa e Wallace, 2006] tramite metodi e strumenti di analisi adeguati già nelle prime fasi di sviluppo.

Tante sono state le metodologie ed i tools di supporto alle attività di eco-design fino ad oggi. Nel momento in cui i progettisti hanno iniziato ad affrontare il tema della progettazione eco-compatibile, cominciando così ad introdurre i requisiti di carattere ambientale nei prodotti, sono stati sviluppati degli strumenti concettuali che li hanno guidati in quest'attività. Essi hanno avuto una rapida evoluzione specialmente negli ultimi vent'anni e sono stati spesso raggruppati in famiglie (e tassonomie) al fine di guidare i progettisti in un loro utilizzo più appropriato. In passato tali strumenti sono stati organizzati in tre grandi tipologie: quelli che hanno alla base le liste di controllo (checklists), gli strumenti di Quality Function Deployment (QFD) ed i metodi basati sul Life Cycle Assessment [Fagnoli e Kimura, 2006].

Questi tre grandi gruppi vengono descritti nei prossimi paragrafi in maniera generale. Nel capitolo, inoltre, viene descritto con maggiore enfasi uno specifico gruppo di metodi, che ha la particolare caratteristica di supportare, anche se con approcci diversi, l'attività progettuale nelle prime fasi del design. Questi metodi sono abbastanza recenti e servono come base teorica per il contributo metodologico del presente lavoro di ricerca.

2.2 Una panoramica sui principali approcci di eco-design

Le checklists applicate all'eco-design vengono utilizzate per guidare un team in modo strategico nel miglioramento di una soluzione progettuale, dotandola il più possibile di determinate

caratteristiche di sostenibilità. Le liste possono essere strutturate in molti modi, ma, in generale, consistono in una serie di domande specifiche ed organizzate in sezioni. Di seguito viene riportato un esempio di checklist molto semplice ed organizzata secondo le fasi del ciclo di vita di un prodotto (figura 2.1).

Lifecycle phase:	Considered...	Y/N, N/A	Comments / evidence of compliance / reasons for non-compliance
System Design	Simplicity		
	Source reduction		
Procurement	Avoided hazardous substances ?		
Manufacturing & Distribution	Designed for manufacture ?		
	Designed for minimum energy use?		
	Designed for pollution minimisation ?		
	Packaging: designed for re-use ?		
	Designed for waste minimisation ?		
	Designed for minimum use of hazardous substances ?		
Use	Designed for minimum energy use?		
	Designed for minimum consumables use?		
	Designed for pollution minimisation ?		
	Designed for waste minimisation ?		
	Designed for minimum use of hazardous substances ?		
	Designed for upgrade ?		
End-of-life	Designed for material recovery ?		
	Designed for component recovery ?		
	Designed for disassembly ?		
	Designed for recovery ?		
	Designed for seperability ?		
	Designed for waste recovery and re-use ?		

Fig. 2.1 Esempio di checklist basata sul ciclo di vita del prodotto

Questo strumento, che richiede una certa esperienza nell'ambito dello sviluppo prodotto e conoscenze consistenti in materia di sostenibilità, utilizza un approccio strategico/orientativo di alto livello, non fornendo, talvolta, un significativo contributo alla risoluzione di problematiche più operative, come ad esempio quelle funzionali o quelle legate alla geometria dei contatti meccanici. Inoltre, le domande formulate nelle liste sono di tipo qualitativo e si basano sulla soggettività dei progettisti [Ramani et al., 2010], ciò nonostante possono costituire una base per tool di supporto all'eco-design, fra cui Eco-Design Pilot [Wimmer e Zust, 2003].

Questo semplice software consente di associare il prodotto ad una determinata classe di appartenenza, a seconda che la rilevanza degli impatti del dispositivo sia legata ad una fase specifica del ciclo di vita (estrazione delle risorse, produzione, uso, trasporto e dismissal). Il tool pone una serie di quesiti (checklist statica) attraverso dei collegamenti ipertestuali e, in base al valore della priorità ottenuta da ciascuna scheda di valutazione, si cerca di attuare quegli interventi (alcuni suggeriti da PILOT) che possano migliorare il prodotto dal punto di vista ambientale, assumendo come requisiti prioritari quelli con un valore di priorità più alto (figura 2.2). Di contro PILOT non esegue una valutazione quantitativa e non redige un bilancio ecologico (ad esempio per mezzo di indicatori), inoltre questo strumento andrebbe utilizzato solo

quando non è chiara la modalità di integrazione delle scelte di eco-design durante lo sviluppo e le azioni di intervento necessitano di essere implementate al più presto possibile.

The image shows two screenshots of the Ecodesign Pilot software. The top screenshot displays a menu of product improvement types: Tipo A (Intensive Raw Materials), Tipo B (Intensive Production), Tipo C (Intensive Transport), Tipo D (Intensive Use), and Tipo E (Intensive Disposal). Tipo B is highlighted. The bottom screenshot shows a QFD matrix for the goal 'Ridurre il consumo di energia nel processo di produzione'. The matrix includes a 'Valore Priorità' section and a table of measures with associated 'Perché', 'Responsabilità', and 'Deadline' fields.

Usare tecnologie di produzione efficienti dal punto di vista dell'energia

guideline measure = Usare tecnologie di produzione efficienti dal punto di vista dell'energia
 assessment question = Le tecnologie di produzione usate nella fabbricazione del prodotto sono efficienti dal punto di vista energetico?
 weighting = 10 (Molto importante)
 assessment = 2 (quasi)
 priority = 20
 id = 2.01.01

Ridurre il consumo d'energia ottimizzando la progettazione del processo

guideline measure = Ridurre il consumo d'energia ottimizzando la progettazione del processo
 assessment question = Il consumo d'energia nella fabbricazione del prodotto è stato minimizzato attraverso un'ottima progettazione del processo?
 weighting = 5 (Poco importante)
 assessment = 4 (no)
 priority = 20
 id = 2.02.01

Preferibilmente usare risorse di energia rinnovabili

guideline measure = Preferibilmente usare risorse di energia rinnovabili
 assessment question = Nella fabbricazione del prodotto e dei suoi componenti sono usate sorgenti d'energia rinnovabili?
 weighting = 10 (Molto importante)
 assessment = 3 (poco)
 priority = 30

Fig. 2.2 Funzionamento di Ecodesign Pilot

A differenza delle liste di controllo gli strumenti QFD mirano ad incorporare le questioni ambientali nell'attività di progetto sottoforma di requisiti e trasformarli in parametri ingegneristici che cercano di soddisfarli. L'applicazione di questi strumenti inizia dalla raccolta delle esigenze dei clienti (Voice of Customers) e dei requisiti ambientali (Voice of Environment), per poi supportare, successivamente, lo sviluppo delle correlazioni tra tali esigenze ed i parametri progettuali.

Come accade nel QFD classico, si esegue una prima analisi (partendo dai bisogni del cliente) al fine di ottenere i requisiti funzionali e si identificano i parametri di design (DP) che traducono tali requisiti in delle metriche misurabili e valutabili. Successivamente, i requisiti funzionali e ed

i parametri di design vengono messi a confronto nella matrice delle correlazioni. L'elemento innovativo consiste nell'integrazione dei bisogni legati alla sostenibilità. Essa avviene, per esempio, modificando la struttura del QFD attraverso un ampliamento di layout [Sakao, 2009], oppure dedicando un'intera struttura dati allo sviluppo di prodotto in chiave ambientale (come nel caso della Green House [Zhang, 1999]).

Nel primo caso si ha un'espansione dello schema QFD con l'inserimento dei requisiti aggiuntivi (Voice of Environment) in una sezione adiacente ai classici requisiti del cliente e con la costruzione di un'altra matrice per valutare le loro correlazioni (figura 2.3). Il metodo si compone di sei step successivi così sintetizzati (si faccia riferimento alla figura 2.4):

- 1) Identificazione dei requisiti del cliente e di quelli ambientali;
- 2) Identificazione delle specifiche di prodotto;
- 3) Generazione dei concetti;
- 4) Valutazione dei concetti e scelta della soluzione;
- 5) Progettazione in dettaglio (e valutazione dei miglioramenti ambientali);
- 6) Verifica sul mercato (valutazione dei miglioramenti per i clienti).

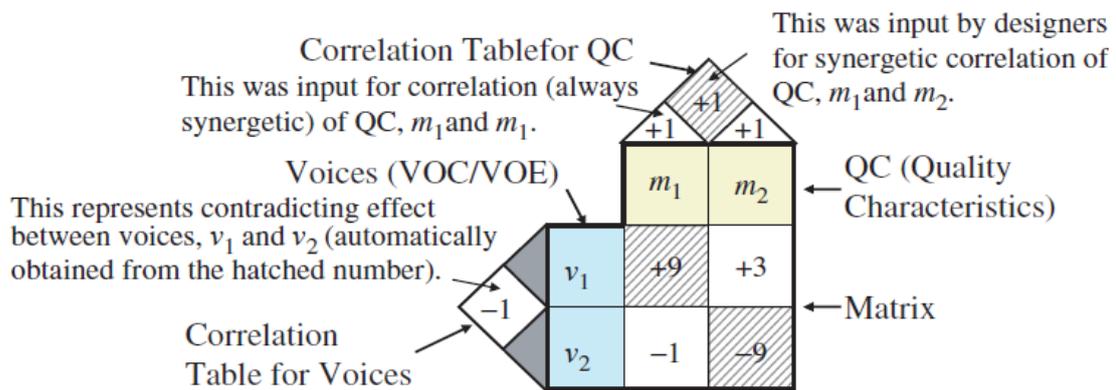
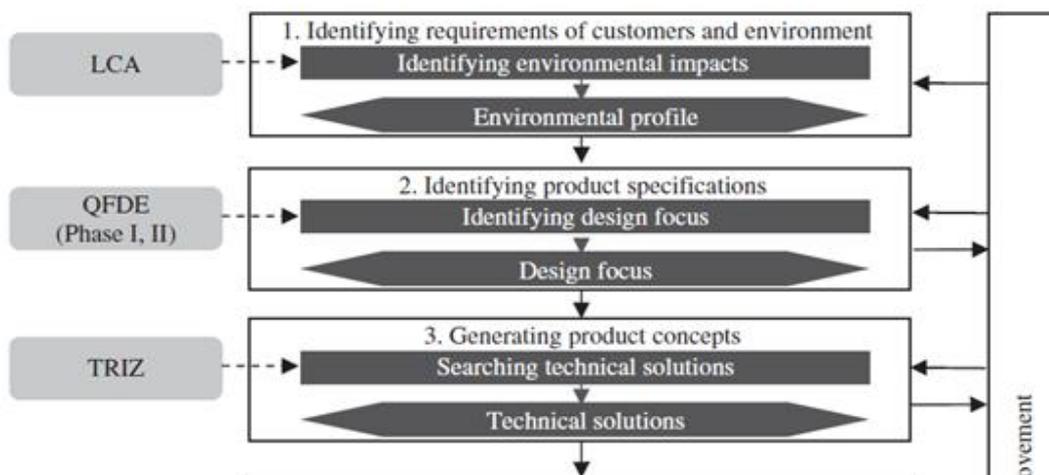


Fig. 2.3 Matrice del metodo QFDE [Sakao, 2009]



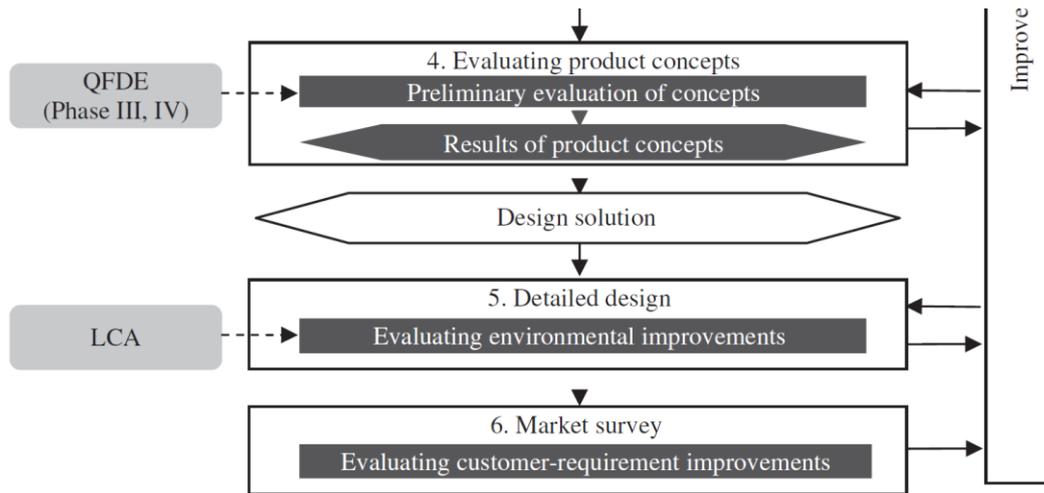


Fig. 2.4 Workflow del metodo QFDE

Nel secondo caso, la Green House è una struttura completamente dedicata allo sviluppo ed al benchmarking ambientale di soluzioni di progetto (figura 2.5), benché le informazioni ottenute devono andare ad integrare altre due schemi: la Cost House e la Quality House (che è una HoQ classica), che servono all'identificazione dei requisiti di costo e del cliente. L'approccio è strutturato in tre grandi fasi principali:

- 1) identificazione dei requisiti ed elaborazione delle matrici Quality House, Cost House e Green House, da cui si ottengono le metriche per lo sviluppo del prodotto;
- 2) dai requisiti elaborati al punto 1) vengono sviluppate le alternative concettuali che vengono successivamente confrontate nella Comparison Concept House, al fine di scegliere la migliore soluzione secondo la qualità, il costo e l'impatto ambientale;
- 3) il concept viene sviluppato ulteriormente tramite schemi QFD, ognuno dei quali è caratterizzato da una diversa fase: design, processo, produzione, manutenzione e ritiro.

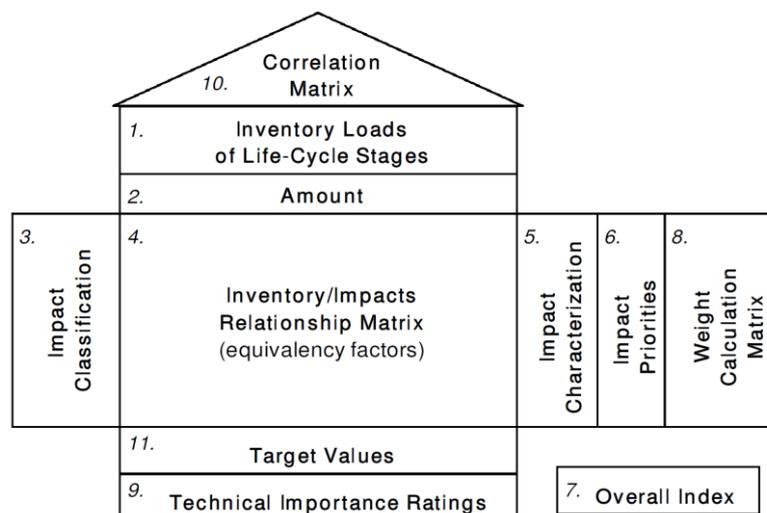


Fig. 2.5 Green Matrix [Zhang, 1999]

Gli strumenti basati sul LCA, invece, offrono un'analisi più approfondita e, rispetto agli strumenti menzionati in precedenza, forniscono una stima più precisa dell'impatto ambientale di un sistema. Sebbene questi metodi siano molto utilizzati e siano di notevole supporto alle attività di progetto, essi presentano alcuni svantaggi su differenti aspetti.

Negli approcci basati sull' LCA si suppone che un qualunque prodotto (o sistema) interagisca con l'esterno attraverso i flussi di energia e materiali in ogni fase del suo ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime (Raw Material) allo smaltimento e la gestione dei rifiuti (EoL). L'LCA è uno strumento molto obiettivo e quantitativo per valutare il profilo ambientale di un prodotto o di un processo [Curran, 2006], malgrado la sua complessità lo renda poco adatto alle prime fasi del design, dove i dati sui componenti del prodotto sono parzialmente disponibili. Inoltre, l'LCA potrebbe risultare un'attività costosa e ad appannaggio solo di grandi imprese, che possiedono le risorse per redigere inventari accurati (figura 2.6) [Ramani, 2010].

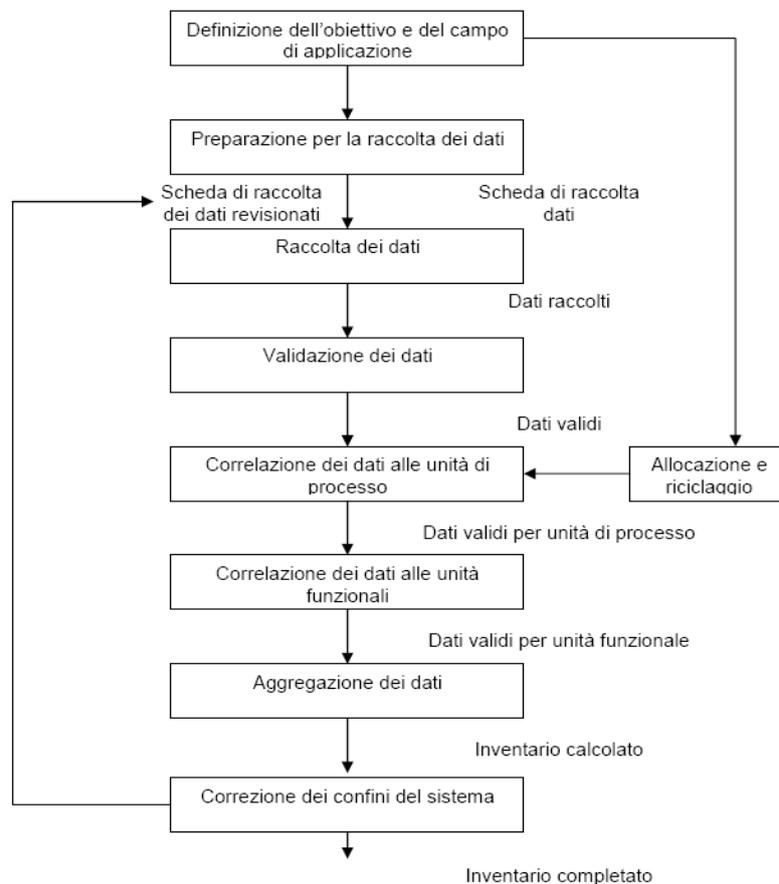


Fig. 2.6 Flusso di lavoro per la creazione di un Life Cycle Inventory

Un altro serio ostacolo associato all'applicazione di strumenti basati sull'LCA in fase di progettazione è la loro scarsa propensione ad essere orientati al design. Ciò vuol dire che il metodo, così come oggi lo conosciamo, non si presta bene alla valutazione ambientale di un

dispositivo in termini di funzioni. Quest'ultime, infatti, sono entità sempre in divenire che incorporano i bisogni dei clienti e vengono sviluppate progressivamente per poter essere integrate, in seguito, in soluzioni progettuali concrete. Un miglioramento in questo senso è stato apportato da alcuni approcci semplificati, i quali necessitano di una minor quantità di dati, nonostante, a volte, tendano ad ignorare gli impatti ambientali di alcune fasi del ciclo di vita ed alcune tipologie di flussi [Todd e Curran, 1999] [Koffler, 2008].

Insieme ai metodi classificati secondo la precedente tassonomia, sono stati proposti degli strumenti concettuali misti che hanno preso in considerazione più aspetti rilevanti nel processo di progettazione, dai temi ambientali a quelli di costo e di supply chain. Inoltre, come ulteriori elementi di analisi sono stati considerati sia il momento in cui una valutazione di tipo ambientale può essere svolta e sia la quantità di informazione necessaria (e comunque almeno sufficiente) per supportare l'attività di progetto.

2.3 Nuove metodologie per la progettazione sostenibile nell' "early design"

A differenza dei metodi di eco-design basati sugli approcci classici, il problema della valutazione ambientale di un prodotto già nelle prime fasi di sviluppo (early design) è stato affrontato solo nella letteratura recente. Alcuni lavori hanno proposto dei metodi di assessment da applicare ai concetti piuttosto che al prodotto finito [Devanathan et al, 2010] [Bohm et al., 2010], tentando di anticipare questa attività il più presto possibile ed aumentare, così, il grado di sostenibilità di un dispositivo seppur in maniera grossolana. Questi tentativi offrono l'opportunità di indagare su ulteriori aspetti relativi al tema dei prodotti eco-compatibili e di dare un contributo quanto più efficace per la creazione di un tool di supporto.

2.3.1 Metodo della Function-Impact Matrix

La metodologia descritta da Devanathan introduce un nuovo strumento visuale chiamato Function-Impact Matrix [Devanathan et al., 2010], che viene utilizzato per attribuire una serie di impatti ambientali alle funzioni del prodotto già nelle prime fasi del processo di progettazione. Secondo un'opinione condivisa anche dagli stessi autori, i metodi attuali sono troppo qualitativi per i progettisti che possiedono un'esperienza limitata, mentre gli altri metodi quantitativi risultano costosi, poichè richiedono molto tempo per la loro applicazione. La metodologia è una combinazione di più approcci: l'LCA, il Quality Function Deployment, il Pugh Chart e la nuova Function-Impact Matrix (FIM), appunto, che ha lo scopo di identificare l'impatto ambientale di ogni funzione rispetto alle prestazioni complessive del sistema ed, eventualmente, rilevare potenziali aree da ri-progettare.

Per sviluppare un dispositivo tenendo conto delle sue performance ambientali, si considera un prodotto già presente sul mercato e lo si scompone nelle sue parti, ottenendo una distinta base. Su ogni elemento si esegue un LCA e se ne calcolano gli impatti (per esempio tramite software). A partire dalla sua distinta base si esegue un'analisi funzionale del dispositivo, effettuando in sostanza un "reverse engineering" del prodotto. Nella fase successiva le funzioni relative al concept del prodotto originario vengono valutate dal punto vista ambientale tramite la Function-Impact Matrix. I risultati delle performance ambientali ed i requisiti funzionali sono i dati di input ("functional" ed "environmental" requirements) ad un QFD, che viene utilizzato come tool di sviluppo per riprogettare il prodotto in chiave eco-compatibile (figura 2.7).

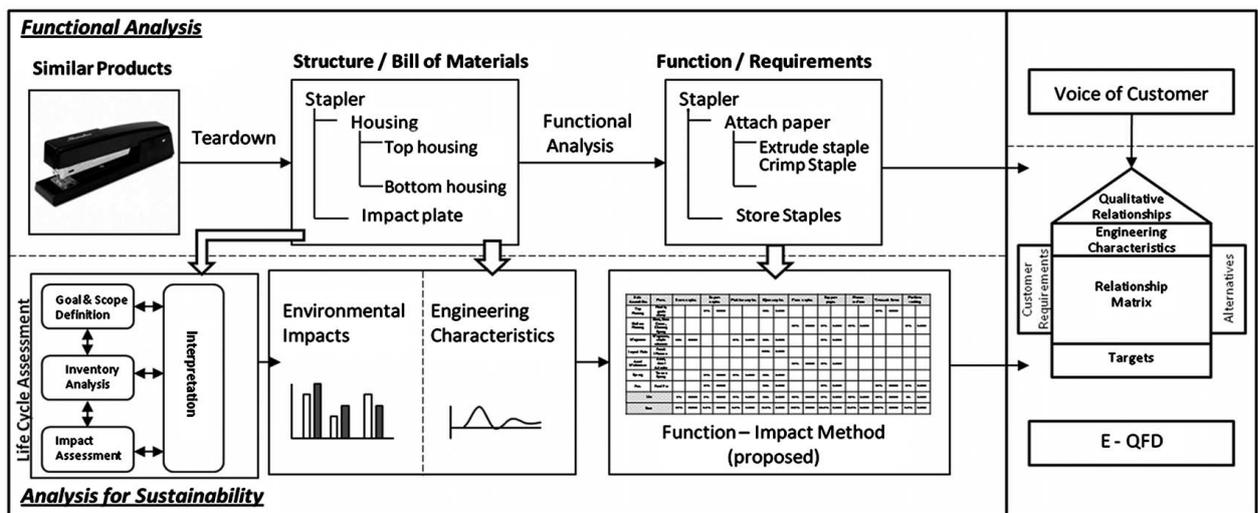


Fig. 2.7 Framework del metodo della Function-Impact Matrix

In figura 2.8 è stata riportata una generica istanza della FIM che ne descrive la struttura, mentre in figura 2.9 è rappresentato un esempio numerico. Sulle colonne vengono inserite le funzioni scaturite dall'analisi, mentre sulle righe vengono disposti i componenti del prodotto analizzato che ne costituiscono la struttura (talvolta possono essere presenti anche gli assemblati).

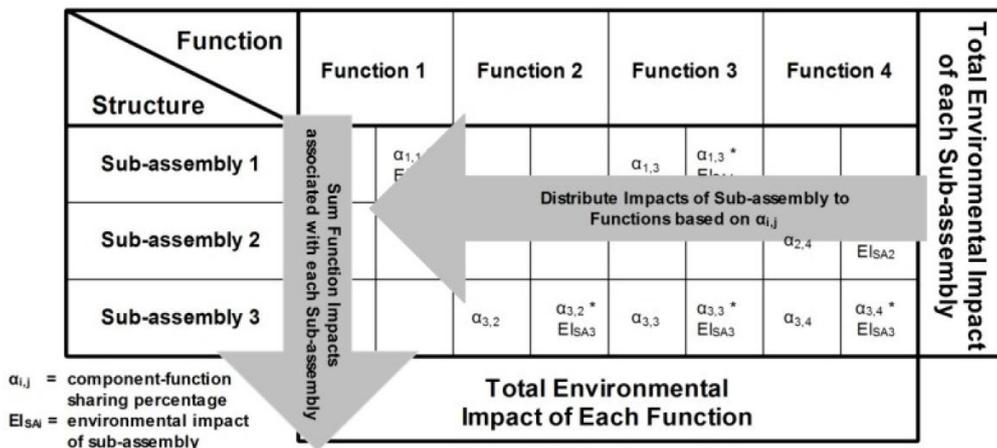


Fig. 2.8: Layout di una Function-Impact Matrix

Per ciascuna funzione, viene preso in considerazione l'impatto legato al materiale utilizzato, alla sua produzione ed alla fase d'uso. La FIM, inoltre, permette di valutare al meglio le funzioni primarie e secondarie di ciascun componente del prodotto.

Function Component	Extrude Staple		Crimp Staple		Store Staples		Position Staples		Load Staples		Hold Papers		Transmit Force		Environmental Impact (Global Warming)
	Percent	Impact	Percent	Impact	Percent	Impact	Percent	Impact	Percent	Impact	Percent	Impact	Percent	Impact	
Top Housing					30	0.223			20	0.1486			50	0.3716	0.7432
Bottom Housing											30	0.1372	50	0.2287	0.4574
Magazine	5	0.011			65	0.1435	10	0.0221	10	0.0221	10	0.0221			0.2207
Impact Plate			100												0.0531
Extruder	70	0.019	30	0.0081											0.0271
Pins													100	0.0561	0.0561
Total		0.03		0.0081		0.3664		0.0221		0.1707		0.1593		0.6564	1.5576

Fig. 2.9 Function-Impact Matrix di una spillatrice

2.3.2 Integrazione dell' LCA nell'early design tramite repository

Nella metodologia di Bohm [Bohm et al., 2010] la valutazione dei prodotti nelle fase concettuale è supportata da un design repository, cioè da un database contenente artefatti. Ciò che si intende valutare è l'utilizzo dell' LCA nell' early design applicato ai concept di prodotto per stimare in modo preventivo l'impatto ambientale delle alternative di progetto. Gli elementi su cui la metodologia si fonda sono i seguenti:

- Il repository. L'obiettivo del repository è quello di archiviare la conoscenza (artefatti) prodotta dai progettisti. In particolare, ciò che supporta il metodo è un database (condiviso da differenti centri di ricerca), in cui sono presenti forme, modelli, regole, assemblati, ecc. Le informazioni contenute sono organizzate in sette tipologie: artefatti, funzioni, failures, caratteristiche fisiche, sensoriali, di performance e multimediali;
- La rappresentazione funzionale. Essa cerca di descrivere le funzioni elementari di un prodotto. Un dispositivo è rappresentato dalle varie sotto-funzioni che, a loro volta, sono legate tra loro da una serie di flussi. La rappresentazione, quindi, è caratterizzata dai verbi che individuano i blocchi funzionali e da nomi che indicano i vari flussi;
- Tecniche di generazione automatica dei concetti. Queste tecniche partono dallo studio e dalla decomposizione dei problemi di design, fino ad astrarre gli schemi di prodotto in termini di funzioni. Successivamente generano soluzioni concettuali sulla base delle funzioni che un prodotto deve esprimere. Insieme alle tecniche classiche [Pahl e Beitz, 1996] [Ulrich e Eppinger, 2008] [Otto e Wood, 1996] [Hubka e Eder, 1984] [Pimpler e

Eppinger, 1994] [Shimomura et al., 1996], alcune più recenti utilizzano una formulazione matriciale del problema in combinazione con strutture di allocazione di dati, come ad esempio i repository. Queste basi di dati possono essere utilizzate per contenere le regole di composizione degli schemi funzionali [Kurtoglu e Campbell, 2009] [Kurtoglu e Campbell, 2009] oppure per catalogare archetipi e componenti reali, mentre la formulazione matriciale spesso traduce lo schema funzionale in una struttura più manipolabile. Fra i metodi di generazione automatica che utilizzano i design repository è possibile citare MEMIC (Morphological Evaluation Machine and Interactive Conceptualizer);

- Il clustering dei concetti. Tale pratica serve a raggruppare insieme i concept secondo le funzioni e le caratteristiche ad essi associate;
- Il “product lifecycle” e l’LCA. Essi sono altri due concetti basilari del metodo proposto. Il primo è l’approccio con cui ripensare un prodotto tenendo conto di tutte le fasi dalla sua vita utile, mentre il secondo è la tecnica attraverso cui quantificare gli impatti secondo determinate categorie (GWP, Acidificazione, Eutrofizzazione, ecc.).

Il metodo inizia nel momento in cui i bisogni dei clienti ed i requisiti funzionali sono stati determinati. Un algoritmo di generazione automatica dei concetti (es. MEMIC) viene fatto girare sul design repository al fine di sviluppare nuovi concept di prodotto. Un’attività di clustering viene eseguita per raggruppare i concetti in cluster di oggetti simili. I componenti contenuti in ogni cluster di concetti vengono analizzati per cercare una somiglianza a qualche classe di prodotto reale. Trovata una correlazione tra prodotti virtuali e reali si procede al confronto tra le rispettive distinte basi. La prima, relativa alla soluzione concettuale, è creata a partire dagli archetipi del repository, mentre la seconda è ottenuta dal disassemblaggio del prodotto reale.

Benchè le informazioni siano contenute nel repository, sussiste comunque una certa carenza di dati per i concept (si pensi alla massa che deve essere calcolata utilizzando il volume e la densità di ogni componente virtuale). In ogni caso, le distinte dei due prodotti vengono utilizzate per calcolare gli impatti ambientali tramite LCA. I due prodotti (reale e virtuale), equivalenti dal punto di vista funzionale, saranno messi a confronto con i risultati dell’assessment per avere una misura d’errore tra l’analisi dei concetti e quella precisa sui prodotti reali.

La metodologia è stata ripresa ed è stata ulteriormente aggiornata prestando attenzione all’analisi delle soluzioni scartate, ma comunque archiviate, nel repository, al fine di avere una procedura più predittiva degli impatti ambientali. Anche in questo caso, l’intero metodo può essere sintetizzato in una serie di passi [Haapala et al. 2011]:

- Fase 1. Modellazione funzionale;
- Fase 2. Generazione automatica dei concetti;
- Fase 3. Stima degli impatti del ciclo di vita;
- Fase 4. Previsioni di modelli di fallimento;
- Fase 5. Analisi dei risultati e presentazione al progettista.

2.3.3 Approccio basato sull'exergia

Eric Coatanea presenta un approccio abbastanza diverso dai precedenti [Coatanea et al., 2009], poichè fondato sul concetto di exergia come metrica ambientale. In termodinamica l'exergia è il massimo lavoro meccanico che può essere prodotto da un sistema quando raggiunge lo stato di equilibrio con l'ambiente di riferimento ed è generalmente considerata una misura termodinamica piuttosto che una metrica ambientale.

La ricerca parte da alcune considerazioni sull'LCA, che, oltre al classico problema della grande mole di dati necessari all'analisi, presenta altri inconvenienti aggiuntivi:

- manca una metrica uniforme che consenta un corretto confronto di impatti e requisiti;
- si basa spesso su database che contengono dati a volte non verificabili o incompleti;
- non offre supporto durante le prime fasi del design;
- nella maggior parte dei casi non si integra con i software CAD [Millet et al. 2007];
- viene visto come attività esterna alla progettazione;
- può presentare incongruenze su alcuni indicatori.

L'idea di combinare LCA ed exergia è stata suggerita inizialmente da Cornelissen [Cornelissen, 1997], il quale ha proposto di estendere l'LCA con un'analisi exergetica del ciclo di vita (ELCA). Inoltre, vi sono stati altri esempi che hanno rappresentato un tentativo di integrazione del concetto di exergia nei software dedicati, tra cui SimaPro, attraverso un indicatore di "domanda cumulata" (CExD). Per calcolare l'efficienza del consumo di risorse e l'impatto ambientale, il metodo utilizza i cosiddetti numeri adimensionali (Π), i quali trasformano lo spazio di design nello spazio delle metriche tramite rapporti di quantità exergetiche. Il sistema (o il processo) riceve in input "l'exergia dei materiali" e "l'exergia di alimentazione", mentre in output il sistema rilascia l'exergia desiderata dal prodotto ($Exergy_{Product}$ e $Exergy_{byProducts}$), l'exergia rilasciata nell'ambiente derivante da formule standard ($Exergy_{Environment\ Standard}$) e da formule miste ($Exergy_{environment\ mix}$), il flusso di exergia di rifiuti non direttamente respinto nell'ambiente ($Exergy_{recycled\ standard}$) e la perdita di exergia (δEx) a causa delle trasformazioni irreversibili.

A partire da queste quantità vengono calcolati i numeri adimensionali Π , che rappresentano,

quindi, le metriche termodinamiche già nelle prime fasi di progetto: i termini Π_{PECE} e Π_{MRCE} , che sono rispettivamente l'exergia primaria di conversione e l'efficienza di consumo di risorse e materiali, mentre un terzo termine, indicato con Π_{EIE} , identifica l'efficienza di impatto ambientale.

La metodologia viene applicata nella fase di progettazione dei concept del prodotto, mettendo a confronto i risultati di un'analisi LCA basata sui dati dei modelli funzionali (che hanno raggiunto un buon grado di dettaglio) e l'assessment basato sui gli indici di efficienza rappresentati dai numeri Π_{PECE} e Π_{MRCE} e Π_{EIE} (figg 2.10a - 2.10b). Il metodo è strutturato nei seguenti step:

- nelle prime fasi di progetto vengono generati i modelli funzionali equivalenti tra loro (due o più soluzioni concettuali), i quali vanno a modellare lo stesso prodotto fino all'embodiment del modello 3D;
- si stabiliscono i materiali e i processi relativi ad ogni concept, ipotizzando i consumi teorici dei processi produttivi scelti;
- si esegue un LCA su ogni concept (producendone gli inventory sempre da ipotesi);
- viene calcolato e diagrammato l'indicatore CExD per il confronto tra i concept;
- si reperiscono i dati per il calcolo delle exergie, principalmente le masse molecolari delle sostanze (dei materiali) e le loro exergie chimiche;
- vengono calcolate le exergie e diagrammati i valori Π sia tramite un "resource assessment" (che fornisce Π_{PECE} e Π_{MRCE}) sia tramite una valutazione ambientale (Π_{EIE});
- si mettono a confronto i risultati ottenuti tramite CExD con quelli ottenuti dai valori Π .

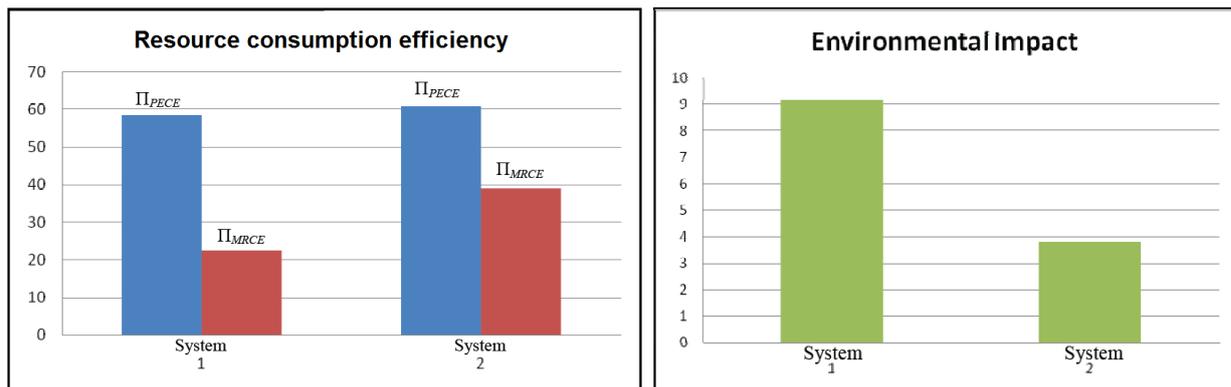


Fig. 2.10-a Confronto di due concept sulle risorse

Fig. 2.10-b Confronto di due concept sull'impatto ambientale

2.3.4 Metodo Eco-PaS

Eco-PaS è l'acronimo di Eco-Efficiency Parametric Screening. Secondo gli autori Eco-PaS si basa sui seguenti principi [Dewulf, 2003]:

- la progettazione di un dispositivo elettromeccanico è di solito concepita come una combinazione innovativa di soluzioni standard create per soddisfare funzioni elementari;
- il sistema richiede che gli elementi in input siano formulati nel linguaggio del progettista. Nell'early design si hanno in input le descrizioni funzionali ed i vincoli (functional requirements), anziché i parametri tecnici, che saranno introdotti più tardi;
- il sistema restituisce un output in termini di prestazioni ambientali (quantificato da indicatori) in fase iniziale. Le analisi qualitative, tipiche della progettazione concettuale, richiedono molta conoscenza, per cui un progettista esperto sarà in grado di stimare quale dei concetti alternativi porterà probabilmente ad un progetto più economico, ma non sarà in grado di fare previsioni simili per quanto riguarda l'impatto ambientale.

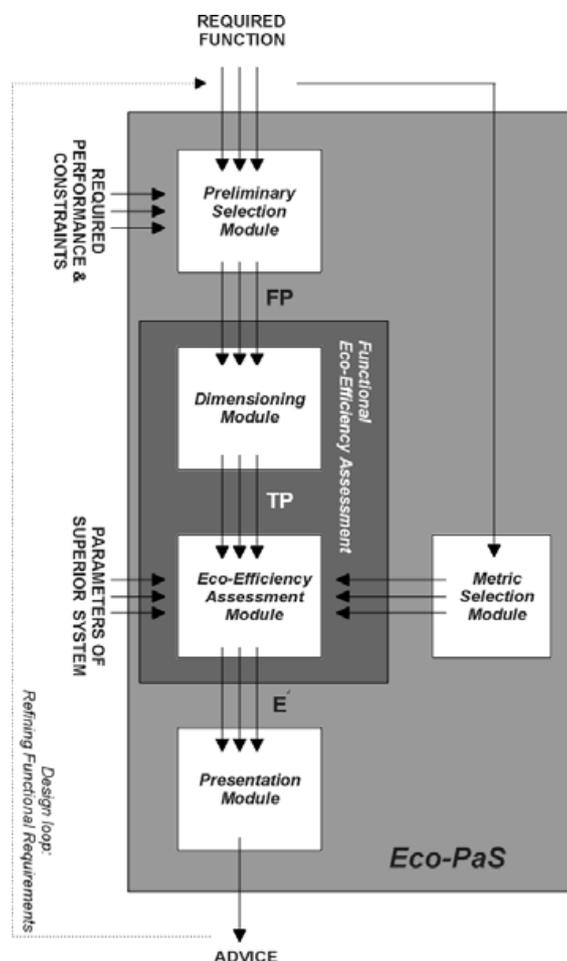


Fig 2.11 Framework del metodo Eco-PaS

Il metodo Eco-PaS fa uso degli E-CERs (Eco- Cost Estimating Relationships), che sono definiti come degli eco-costi ambientali che dipendono da altre variabili indipendenti (“eco-cost driver variables”), come requisiti funzionali (FR) o parametri di progetto (DP). Sostanzialmente un E-CER è funzione di un FR o di un DP e può essere espresso da un classico indicatore di

prestazione ambientale (ad esempio quelli Eco-Indicator '99). Secondo gli sviluppatori del metodo, i vari E-CERs si possono ottenere tramite tre tecniche: attraverso un modello di sviluppo teorico, attraverso un'analisi di regressione su dati empirici e secondo leggi di crescita [Dick et al., 2004]. Il metodo si articola nella seguente procedura:

- a) partendo da una serie di requisiti in input, si crea un modello funzionale che rappresenti il prodotto in fase di progettazione e se ne individuano i componenti, anche se in maniera grossolana;
- b) successivamente si sceglie una misura dell'impatto ambientale (ad esempio i mPts di Eco Indicator '99) e, per ogni blocco funzionale, si calcola l'E-CER di riferimento insieme alle altre metriche utilizzate per soddisfare i requisiti in ingresso;
- c) sulla base degli E-CERs calcolati al passo b), si esegue un assessment sull'intero concept di prodotto per ottenere, in seguito, un impatto medio ed un intervallo di incertezza di valori;
- d) dall'analisi del set di impatti il progettista cerca di individuare quale componente della soluzione concettuale ha la peggiore performance ambientale e può essere potenzialmente migliorato;
- e) come passo finale, viene eseguito un LCA di un prodotto simile al concept per poter validare i risultati ottenuti al passo d).

2.3.5 Metodo delle Green Guidelines

Anche l'approccio delle green guidelines sviluppato dal dipartimento di ingegneria dell'Università del Texas [Telenko et al., 2009] si propone di supportare la valutazione ambientale nell'early design. Esso parte dalla constatazione che le linee guida di eco-design ed i principi classici (si faccia riferimento al capitolo 1), talvolta, non sono esaustivi, per cui necessitano di un ampliamento. Il metodo è basato su una combinazione di approcci fra cui l'analisi dei bisogni dei clienti, l'analisi del ciclo di vita ed il reverse engineering, il quale costituisce il riferimento per una valutazione sistematica dell'architettura dei prodotti esistenti e le loro funzionalità.

Il metodo consta di diversi passaggi. In primo luogo, i requisiti dei clienti sono estesi con ulteriori esigenze relative a prestazioni ambientali desiderate. Esse costituiscono l'input del processo di re-design del prodotto e sono identificate dalle analisi LCA eseguite dopo un processo di analisi di prodotti reali. Quest'ultime analisi sono utilizzate anche nei passi finali del metodo per orientare le azioni progettuali future. Il workflow può essere sintetizzato nelle fasi di seguito riportate:

- STEP 0) Selezione dei prodotti e probabili problemi ambientali. Un insieme di prodotti viene selezionato per l'analisi e la scelta è effettuata in base alla loro importanza funzionale, cioè dal punto di vista di una loro sufficiente complessità. E' importante che il progettista scelga un set di prodotti che abbiano caratteristiche simili e possiedano le principali funzioni della famiglia di dispositivi a cui appartengono, benché le architetture possano comunque essere differenti;
- STEP 1) Generazione dei requisiti di progettazione ambientale. Viene proposto un primo insieme di requisiti ambientali (analizzando i bisogni degli utenti), che vengono registrati cercando di estrarre dei requisiti di sostenibilità potenziali come bisogni latenti. In questa fase, inoltre, è possibile analizzare le modalità di utilizzo del prodotto, le quali risultano utili specialmente se i progettisti si vogliono focalizzare su una specifica fase del ciclo di vita (uso delle risorse, durata, riciclabilità) Alla fine di tali attività di analisi si spera di ottenere dei requisiti ambientali da tradurre in requisiti funzionali e, quindi, ottenere una buona comprensione del funzionamento del dispositivo;
- STEP 2) Previsione dell'architettura e delle funzionalità. In questa fase il progettista sviluppa ed amplia i bisogni di natura ambientale ed analizza i prodotti in una prospettiva funzionale e concettuale. Da una fase di reverse engineering si passa alla modellazione funzionale del concept di prodotto che si vuole sviluppare utilizzando il metodo "black-box". Questo metodo parte da una macro-funzione ed esplode le sottofunzioni analizzando i flussi che attraversano il sistema, offrendo, altresì, un supporto allo sviluppo creativo di nuovi concept di prodotto. Dopo aver creato le strutture funzionali ed ipotizzato il modello (con qualsivoglia metodo di rappresentazione) è possibile arrivare ad uno schema più dettagliato creando, così, un'ipotesi di schema di prodotto che tiene conto anche dei flussi esistenti tra i blocchi funzionali. Successivamente si passa allo sketching di possibili componenti concettuali (archetipi) che svolgano le sotto-funzioni individuate, ottenendo una o più architetture su cui è possibile verificare che i requisiti funzionali sono stati soddisfatti. Anche le green guidelines ottenute fino a questo momento possono essere verificate e le varie architetture possono essere confrontate tramite una checklist al fine di ottenere eventuali requisiti ambientali aggiuntivi;
- STEP 3) Quantificazione delle specifiche tecniche. A questo punto, il team di progetto cerca di attribuire dei parametri quantitativi e misurabili ai requisiti di carattere ambientale che sono stati sviscerati, insieme, ovviamente ai requisiti funzionali espressi dai clienti. Un metodo di supporto a questa attività è il QFD (HoQ – House of Quality),

dove verranno identificati dei parametri progettuali che in qualche modo soddisferanno anche gli obiettivi di carattere ecologico. Questi ultimi requisiti ambientali dovranno essere studiati da tre punti di vista: l'utilizzo, la funzionalità ed i dettagli tecnici. A questo punto, possono prendere forma nuove potenziali linee guida: utilizzare forme di energia più pulita (compresa quella umana); ridurre le perdite di energia attraverso il design, per esempio attraverso l'isolamento delle superfici e la presenza di valvole; migliorare la notifica delle fine delle operazioni all'utente, in modo che il prodotto non funzioni oltre il dovuto; ottimizzare il processo di funzionamento;

- STEP 4) Analisi dei prodotti. Dei prodotti reali sono analizzati e confrontati con i concetti in via di sviluppo. I dispositivi vengono disassemblati e ne viene studiata l'architettura, dando l'opportunità di verificare se le funzioni relative alle soluzioni proposte sono più o meno innovative del previsto. Si crea una distinta materiali (BOM) dallo smontaggio dei dispositivi reali e si esegue un LCA per supportare la fase di re-design. La lista delle guideline può, eventualmente, essere ampliata;
- STEP 5) Esecuzione dell'analisi del ciclo di vita. Al passo cinque si esegue un LCA di uno dei prodotti esistenti. I risultati sono utilizzati per dare le priorità agli obiettivi dell'attività di re-design. La precisione dell'analisi, ovviamente, si basa sulla disponibilità dei dati che, per questa ragione, deve essere la più completa possibile;
- STEP 6) Generazione dei concetti. Vengono generati i concetti dei nuovi prodotti e si definiscono le loro architetture e le linee guida che aiutano a soddisfare i requisiti ambientali. La generazione dei concetti può essere ottenuta utilizzando il metodo 6-3-5, o un approccio classico;
- STEP 7) Aggiornamento e quantificazione delle linee guida di progettazione ambientale. La lista delle guidelines è finalizzata e validata. Successivamente una coppia di concetti e due distinte basi vengono create per ogni linea guida, al fine di rappresentare il prodotto prima e dopo l'implementazione di ogni singola guideline. Le linee guida sono formulate a partire dalle soluzioni tecniche che il progettista ha trovato per soddisfare al meglio le esigenze di sostenibilità in ogni embodiment. Infine, le guideline sono aggiornate ancora una volta, attraverso delle possibili analogie con altri modelli di prodotto non inclusi nel set dei dispositivi oggetto di studio. Questo confronto con altri esempi rende le guideline più adatte ad una applicazione generale.

Terminato l'ultimo step, due concept di prodotto e le relative distinte basi devono essere creati per ogni linea guida, per rappresentare il prodotto prima e dopo la sua implementazione. Su ogni

concetto (e la sua distinta) viene eseguita un'analisi LCA prima e dopo l'implementazione e, inoltre, i progettisti valutano l'impatto potenziale di ogni soluzione. Questa verifica serve a capire se la l'applicazione delle guideline migliora il design originale. Gli autori del metodo precisano che i risultati dell'LCA sono strettamente applicabili solo alla classe di prodotti analizzata nello studio e non possono essere generalizzabili a classi di prodotti diversi, senza ulteriori ricerche.

2.3.6 Metodo MPDS

Il Method for Product Design and Sustainability (MPDS) è il tool sviluppato dal Politecnico di Milano per l'integrazione dei requisiti ambientali nell'attività progettuale al fine di ottenere soluzioni più sostenibili. Il metodo è frutto di diverse esperienze di studio e partnership con molti soggetti industriali (Rex Electrolux, Artemide, Parà, etc.) ed è strutturato in maniera flessibile e modulare, per essere utilizzato a vari livelli di progetto [Vezzoli et al. 2009].

Se ci si riferisce principalmente allo sviluppo di un nuovo prodotto, le macro-fasi che il team deve affrontare sono le seguenti:

- 1) Analisi strategica di prodotto;
- 2) Progettazione del concept;
- 3) Progettazione del prodotto;
- 4) Ingegnerizzazione.

Nella prima fase, dopo aver definito le strategie, si esegue l'LCA di un prodotto esistente ed equivalente dal punto di vista funzionale al prodotto che si intende progettare (almeno nella macro-funzione di partenza). Le priorità strategiche vengono definite ed, in seguito, vengono organizzate in maniera sintetica. Per l'LCA si può utilizzare un software specifico (SimaPro, GaBI) o un approccio semplificato, che in ogni caso, segue lo schema standard (DEFINIZIONE OBIETTIVO → LCI → INTERPRETAZIONE RISULTATI → INTERVENTI), dove l'output finale è costituito dagli obiettivi e dall'unità funzionale, dall'inventario dei dati, dai valori degli indicatori e dalla formulazione degli interventi prioritari.

Con i risultati dell'LCA possono essere compilate le schede di valutazione IPSA (figura 2.12) contenute nel tool "Ideazione Concept Sostenibili" (ICS). Nelle schede, in base a degli assi strategici, vengono indicati i processi ad impatto maggiore che necessitano di interventi ed è possibile calcolare, per ogni strategia, i valori potenziali di impatto ambientale normalizzati e classificati per importanza che è possibile ridurre. Alla fine si otterranno gli indicatori di priorità sia secondo le strategie, che secondo i processi.

I risultati delle tabelle IPSA, che forniscono gli aspetti da migliorare nel nuovo prodotto, sono visualizzabili in modo aggregato sul diagramma radar multi-strategia (Figura 2.13) per avere un insieme di indicazioni chiare da seguire e per redigere una serie di istogrammi che misurino le priorità di ogni strategia.

Strategia	formula IPSA	IPSA	IPSA n.	Priorità	f. m. r	f. m. n
Estensione/intensità uso	$\sum fD_{p,i} \times EI_{c,i} [PP + P + DT + DM]$					
prodotto esist.				P:		
concept						
Riduzione materiali	$c \times EI [PP + P + DT + DM]$					
prodotto esist.				P:		
concept						
Riduzione energia	$c \times EI [\text{energia consumata}]$					
prodotto esist.				P:		
concept						
Estensione vita materiali	$c \times EI [PP \text{ mat. in disc.}] + EI [DM \text{ mat. Disc}]$					
prodotto esist.				P:		
concept						
Riduzione tossicità	$EI_{t,i} [PP + P + DT + U + DM] \text{ mat./proc. tossici}$					
prodotto esist.				P:		
concept						
IPSA max			1			
Conservazione risorse (%)	$\frac{[\sum FE(mt)] \times qant.(mt) / \sum qant.(mt)] \times EI(mt) / EI(t) + [\sum FE(en)] \times qant.(en) / \sum qant.(en)] \times EI(en) / EI(t)}$		%			
prodotto esist.						
concept						

Fig. 2.12 Esempio di tabella IPSA

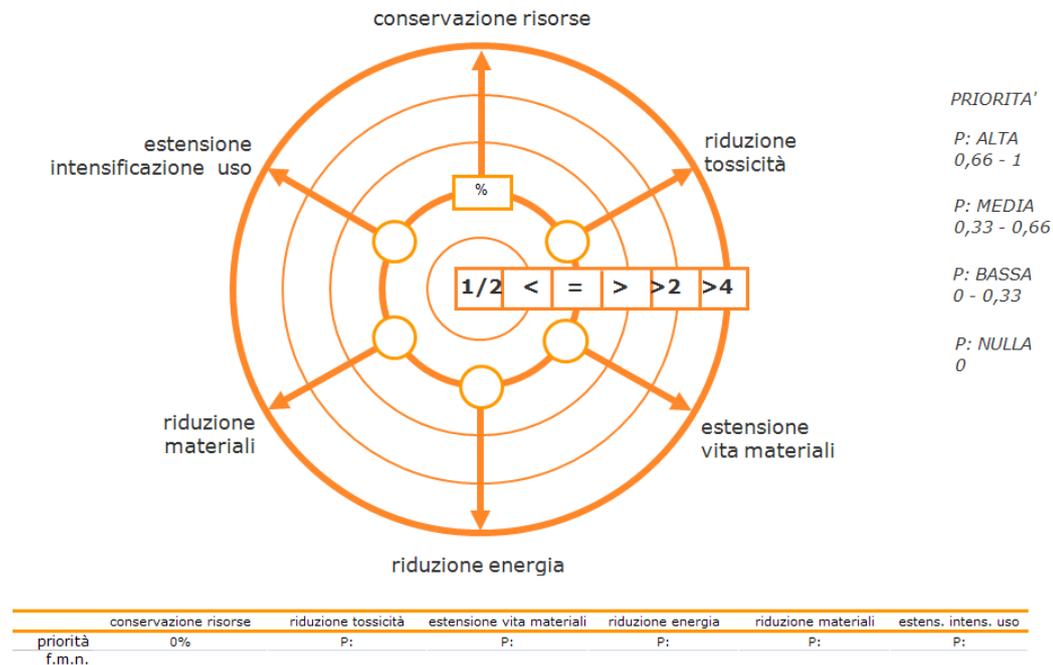


Fig. 2.13 Diagramma radar del tool ICS

Nella fase di progettazione del concept vengono generate le idee che propongono di rendere il prodotto più sostenibile. Quest'attività è agevolata da uno spazio per le "eco-idee" (presente come sezione aggiunta alle tabelle IPSA) e può essere condotta tramite dei workshop. Le idee, una volta chiarificate ed elaborate, sono di input alla creazione uno o più concept, che vengono valutati ed eventualmente ridotti in numero, preferendo quelli con gli impatti potenziali migliori.

Già in questa fase è possibile verificare gli impatti attraverso le checklist qualitative ICS applicate ai concept o con un LCA, che, eventualmente, può essere messo a confronto con l'assessment del prodotto di partenza.

Nella fase di rappresentazione delle caratteristiche ambientali vengono fatte tutte le ipotesi sui processi che caratterizzeranno il ciclo di vita di ogni concept, ciò ha l'obiettivo di sviscerarli quando ancora il prodotto non è definito. Si procede con una prima formalizzazione dell'architettura del concept (con un modellatore di superfici o tridimensionale) distinguendo i vari componenti grezzi e ragionando sulle fasi di vita che li caratterizzeranno, dai materiali da utilizzare alle prime problematiche di dismissione.

Nella progettazione in dettaglio, le scelte e le valutazioni sulla sostenibilità della soluzione diventano più puntuali. Ogni componente progettato viene analizzato a livello di impatti sulla base delle scelte specifiche che sono state prese su geometrie, materiali e processi. Ciò non toglie che altre soluzioni funzionali e meno impattanti possano essere proposte (ad esempio per favorire un miglior riciclo o un buon disassemblaggio), a patto che le geometrie siano compatibili. L'obiettivo è quello di produrre delle specifiche tecniche più accurate e dei risultati da LCA di soluzioni alternative da confrontare fra loro.

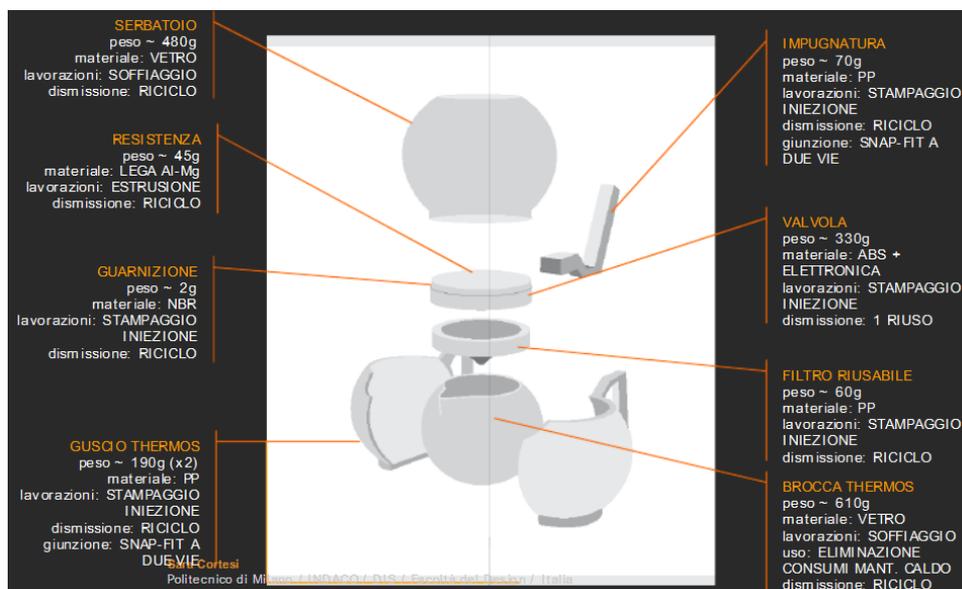


Fig. 2.14 Sviluppo del concept (metodo MPDS)

2.4 Spunti per un nuovo tool di supporto

Ogni strumento di eco-design è caratterizzato da un proprio approccio e da una propria struttura, nonché da una sua natura qualitativa o quantitativa. Per queste ragioni, i vari metodi sono stati classificati in gruppi con caratteristiche simili in modo tale da poter orientare i progettisti a scegliere lo strumento di supporto più adatto alle proprie esigenze. Anche nel caso del presente

lavoro si è ritenuto opportuno classificare la nuova metodologia proposta tra quelle disponibili attualmente per supportare l'attività di eco-design.

Diverse ricerche hanno analizzato i metodi sviluppati per il Design for Environment (DfE) e di supporto alla sostenibilità. Ramani [Ramani et al., 2010], ad esempio, ha presentato una rassegna di metodi e di strumenti per la progettazione eco-compatibile raggruppati per ogni fase del ciclo di vita di un prodotto (dalla progettazione, alla supply chain e alla gestione del fine vita). In prima battuta, infatti, viene presentato un semplice modello che classifica i metodi in relazione a due fattori: il livello del processo di progettazione (concettuale-dettagliato) e l'uso della conoscenza, qualora lo sviluppo richieda grande intensità di esperienza o sia caratterizzato da un uso intensivo di dati. Dalla figura 2.15 si evince che la metodologia che si vuole proporre presenta un buon compromesso tra un utilizzo non eccessivo di dati, anche perché nell'early design non si ha una loro completa disponibilità, e la necessità di un'esperienza minima da parte del progettista nell'effettuare delle ipotesi di progetto.

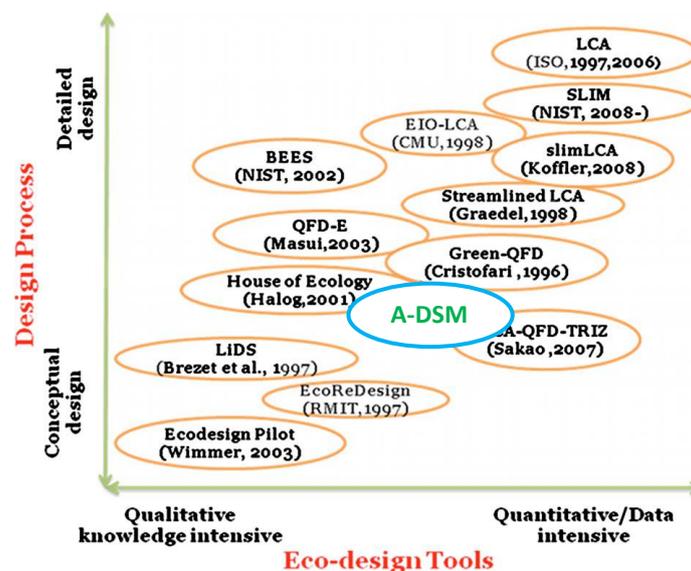


Fig. 2.15 Un possibile posizionamento della metodologia A-DSM nella classificazione dei tool secondo Ramani

Un altro lavoro di review della letteratura recente [Bovea e Perez-Belis, 2011] classifica gli approcci in tre grandi tipologie: tecniche qualitative, semi-quantitative e quantitative. In questo terzo gruppo, possiamo trovare due degli approcci usati nella metodologia che si intende proporre: gli indicatori ambientali e l'LCA semplificato (SLCA). Considerando questa classificazione piuttosto recente, il metodo descritto nelle prossime sezioni può essere considerato un approccio quantitativo ed è caratterizzato dall'utilizzo di varie tecniche (da applicare in base a come è strutturata la procedura): quella basata sulla Design Structure Matrix, la valutazione effettuata in base a degli indicatori ambientali ed una tecnica multi-criterio per la comparazione delle soluzioni progettuali.

Si aggiungono alcune considerazioni importanti evidenziate sempre nel lavoro di review di Bovea e Perez-Belis e che risultano di notevole interesse. Gli autori individuano tre fattori chiave necessari all'ottimizzazione del processo di eco-design e di cui può essere utile tenere conto nello sviluppo di una nuova metodologia:

- 1) la necessità dell'integrazione preventiva degli aspetti ambientali del prodotto in un processo di progettazione (e sviluppo), dal momento che ciò offre la possibilità di effettuare modifiche ed apportare miglioramenti il prima possibile. Al contrario, attendere fasi successive può escludere la possibilità di inserire requisiti ambientali utili (o desiderati), poiché le decisioni di massima sono già state prese;
- 2) l'utilizzo di un approccio basato sul ciclo di vita, che tiene conto di come il prodotto possa influenzare l'ambiente nelle diverse fasi;
- 3) l'utilizzo di tecniche multi-criterio, che tengano conto di tutti i requisiti tradizionali che influenzano un prodotto insieme agli aspetti ambientali ed agli impatti potenziali.

Queste considerazioni sono state prese fortemente in esame, al fine di ottenere una metodologia quanto più efficace. Gli approcci, che fanno riferimento ai tre fattori elencati, sono stati analizzati nella trattazione successiva e costituiscono (insieme alla Design Structure Matrix ed un approccio di tipo pareto) parte degli elementi fondanti del contributo scientifico proposto nel presente lavoro.

CAPITOLO 3

Metodi e strumenti di analisi

3.1 Introduzione

La metodologia proposta nella presente ricerca utilizza una combinazione di approcci differenti tra loro (in maniera integrata). In questa sezione si offre una loro descrizione nell'intento di dare una sufficiente conoscenza delle loro caratteristiche e di far comprendere meglio il loro utilizzo nel capitolo successivo.

C'è da dire, inoltre, che questo tentativo di utilizzare approcci differenti per le problematiche di sostenibilità non è l'unico caso in letteratura. Tra le metodologie che sono state definite "approcci misti", infatti, possiamo citare, a titolo di esempio, COMPLIMENT (acronimo di COMbining environmental Performance indicators, Lifecycle approach and Multi-criteria to assess the overall ENvironmental impact) [Hermann et al., 2007], un metodo relativamente recente, ma molto interessante, che viene applicato per valutare l'impatto di un intero business aziendale. Esso ha diversi elementi in comune con l'approccio che verrà proposto nel prosieguo di questa tesi e, come tale, rappresenta un tentativo di utilizzare metodi eterogenei in un tool integrato. La nuova metodologia, così come lo stesso COMPLIMENT, fa uso aggregato di tre strumenti: l'LCA semplificato, un approccio multi-criterio e degli indicatori di performance ambientale (EPI). Questi, insieme ad una sezione dedicata alla DSM ed una panoramica sul concetto di "efficienza paretiana", vengono descritti di seguito.

3.2 DSM

La Design Structure Matrix (DSM) è un particolare strumento concettuale utilizzato in molti contesti, fra cui la decomposizione e la modellazione di prodotti e processi. Esso è considerato un approccio utile per gestire problemi di grande complessità, in particolare rappresenta gli elementi di un sistema e le loro interazioni. La DSM è stata utilizzata principalmente in diversi campi dell'Ingegneria, ma può essere auspicabile un suo utilizzo anche su una gamma più ampia di applicazioni relative ad altre scienze fra cui: la gestione sanitaria, i sistemi economici, le scienze naturali e le scienze sociali. In ambito industriale, invece, i settori applicativi spaziano dall'automotive all'elettronica fino al campo aerospaziale, ecc.

Dal punto di vista formale la DSM è una matrice quadrata di dimensioni $N \times N$, che descrive la mappatura delle interazioni degli elementi di un sistema [Steward, 1981]. In base al tipo di sistema che viene modellato, la DSM può gestire diversi tipi di architetture. Gli elementi

possono rappresentare svariate entità, mentre le interazioni possono anch'esse essere di diversa natura. Analizzando più in dettaglio il layout tipico di una DSM troviamo i seguenti elementi caratteristici:

- gli elementi di sistema, i quali vengono messi in relazione tra loro e rappresentano componenti meccanici, attività che devono essere svolte, persone da assegnare a compiti o gruppi di lavoro;
- gli elementi diagonali, che nella versione classica non hanno alcuna valorizzazione e rappresentano gli elementi stessi;
- i termini non diagonali, i quali corrispondono alle relazioni tra gli elementi. Essi possono mappare collegamenti fisici, relazioni logiche, informazioni e flussi di diversa tipologia, per cui la loro valorizzazione nella matrice può avvenire per mezzo di simboli, valori puramente binari, numeri e colori differenti tra loro;
- eventuali righe o colonne di input ed output di sistema.

Molto spesso una DSM traduce in forma matriciale una struttura a grafo (anche orientato) che, a sua volta, simula il comportamento di un sistema di parti interagenti. Questa formalizzazione fornisce una facile leggibilità ed un formato di rappresentazione scalabile (con gli ingressi rappresentati dalle righe e le uscite rappresentate dalle colonne), offrendo la possibilità di raggruppare o sequenziare i sottosistemi. Tra i vantaggi principali attribuibili, in generale, ad una DSM possiamo citare i seguenti [Eppinger et al., 2012]:

- la struttura del sistema assume un formato compatto;
- la DSM riesce a rappresentare sistemi articolati e complessi rispetto ad altri strumenti concettuali;
- la buona capacità di visualizzazione della DSM può mettere in evidenza delle aree (sottomatrici) che rappresentano sottosistemi di particolare interesse su cui un gruppo di lavoro deve operare, come ad esempio parti particolarmente stressate, elementi cardine, attività da trattare con una certa priorità;
- la DSM permette una comprensione intuitiva di un sistema, malgrado la sua complessità;
- l'approccio si presta a mappare agevolmente anche l'evoluzione dei sistemi (convergenza, modularità, ecc.) ed a effettuare operazioni complesse sui corrispondenti modelli a grafo, sfruttando, appunto, le proprietà del modello matriciale;
- la DSM è uno strumento flessibile, in quanto è possibile modificare il suo layout e le tipologie di dati che vengono gestite.

La DSM si è sempre più evoluta negli ultimi anni per andare incontro alle esigenze di progetto più svariate. Dagli studi condotti sull'argomento, come ad esempio le ricerche del Massachusetts Institute of Technology [Yassine, 2004] [Browning, 2001], sono state sviluppate differenti tipologie di DSM cercando, in molti casi, di stilare una loro classificazione [Eppinger e Browning, 2012]. Una prima tassonomia è formata dai tre esempi più classici di DSM, concepiti per gestire rispettivamente componenti, processi e team di sviluppo. Il primo tipo è usato per modellare l'architettura di un prodotto, gli elementi DSM sono i componenti del dispositivo che si sta progettando e le interazioni costituiscono le interfacce fra gli elementi (figura 3.1).

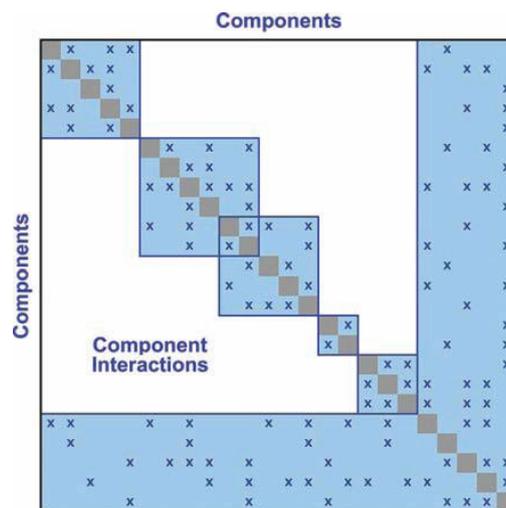


Fig. 3.1 Product DSM

Per modellare l'architettura di un'organizzazione, invece, gli elementi rappresentano le persone o i gruppi di lavoro e le interazioni rappresentano le comunicazioni tra gli individui (figura 3.2).

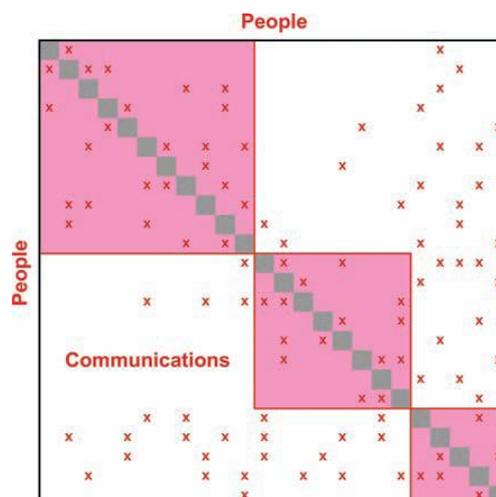


Fig. 3.2 DSM Organizzativa

Nel caso di una architettura di processo, gli elementi della DSM sono le attività del processo stesso, mentre le interazioni rappresentano sia i flussi di informazione che i flussi di materiale

scambiati tra le attività (figura 3.3).

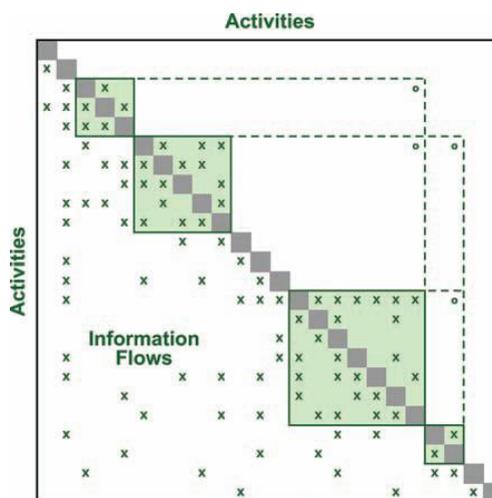


Fig. 3.3 DSM per la mappatura di processi

Una quarta tipologia ha assunto una grande rilevanza scientifica. Si tratta di una DSM “cross-domain” (Multi Domain Mapping - MDM), dove sono visualizzati contemporaneamente diversi tipi di architetture (appartenenti a domini diversi) di cui si vogliono gestire le relazioni ed i collegamenti, come accade nei sistemi e nei progetti complessi (figura 3.4).

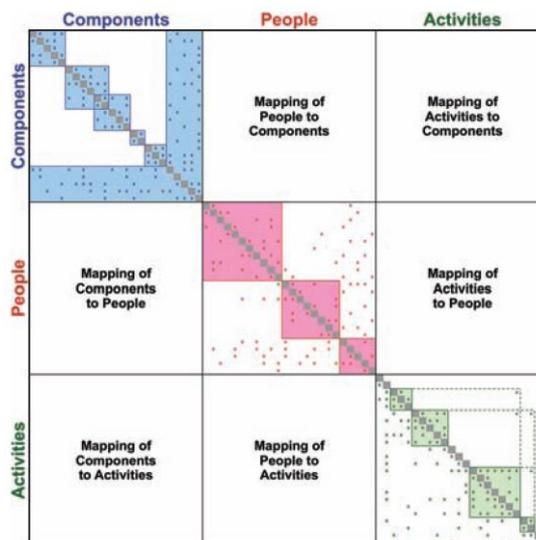


Fig. 3.4 Multi Domain Matrix

Le DSM utilizzate per la progettazione di prodotti e per gestire architetture organizzative sono in genere considerate strutture dati statiche, poichè rappresentano l’intero sistema e tutti i suoi elementi nello stesso momento, mentre quelle utilizzate per la mappatura di processi sono strutture dati di tipo time-based e, cioè, più adatte a descrivere le evoluzioni di un sistema in funzione del tempo.

Le tassonomie classiche, inoltre, hanno subito degli aggiornamenti, secondo la natura degli oggetti gestiti nella struttura dati, come nel caso delle Parameter-based DSM (figure 3.5-3.6).

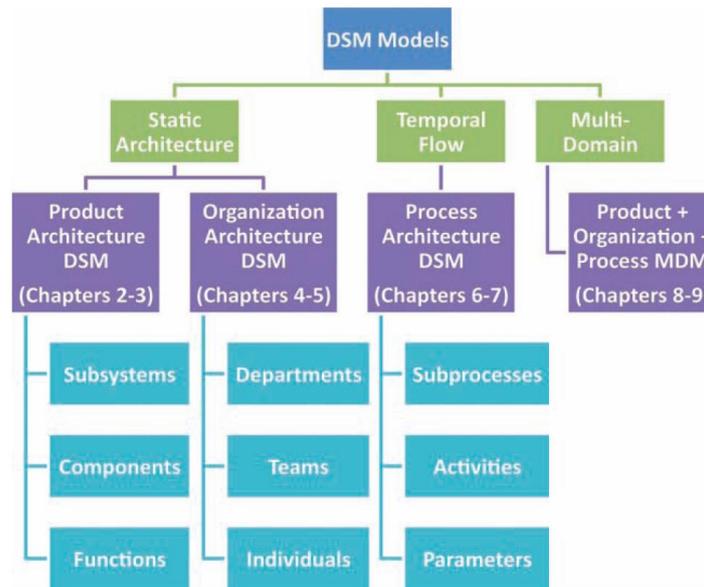


Fig. 3.5 Esempio di tassonomia delle DSM

DSM Data Types	Representation	Application	Analysis Method
Component-based	Multi-component relationships	System architecting, engineering and design	Clustering
Team-based	Multi-team interface characteristics	Organizational design, interface management, team integration	Clustering
Activity-based	Activity input/output relationships	Project scheduling, activity sequencing, cycle time reduction	Sequencing & Partitioning
Parameter-based	Parameter decision points and necessary precedents	Low lever activity sequencing and process construction	Sequencing & Partitioning

Fig. 3.6 Tassonomia per le DSM secondo i metodi di analisi e le applicazioni [Hong e Park, 2009]

E' possibile fare un'altra interessante classificazione in base alla tipologie di interazione tra gli elementi. Nelle celle non diagonali, infatti, possono essere presenti diverse simbologie, numeri o valori quantitativi, nonché valori appartenenti a scale di valutazione qualitative. Dalla letteratura e dalle applicazioni industriali si riportano le seguenti tipologie:

- ❑ DSM booleane, in cui l'interazione è rappresentata dall'assenza o dalla presenza di un simbolo, o dai valori 0 ed 1 per mappare le relazioni di adiacenza;
- ❑ DSM numeriche, che rappresentano valori quantitativi assoluti, i quali mappano dei flussi tra i componenti o altri tipi di relazione;
- ❑ DSM in cui l'interazione è rappresentata da valori o simboli, a cui sono associati dei particolari significati.

Se ci si riferisce alle DSM utilizzate per le architetture di prodotto, negli ultimi vent'anni si è notata una particolare evoluzione proprio nella rappresentazione delle interazioni che possono

essere presenti fra gli elementi. Su questa tipologia Pimmler ed Eppinger [Pimmler e Eppinger, 1994] hanno offerto un ottimo spunto (anche per il presente lavoro), introducendo l'utilizzo di quattro tipi di interazione e quantificando queste relazioni attraverso una scala di valori costituita da cinque posizioni, come si evince dalla figura 3.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Radiator A		2 0 0 2			2 -2 0 0											
Engine Fan B	2 0 0 2				2 0 0 2								1 0 0 0			
Heater Core C				1 0 0 0			2 0 0 0	-1 0 0 0								0 0 0 2
Heater Hoses D			1 0 0 0						-1 0 0 0							
Condenser E	2 -2 0 0	2 0 0 2				0 2 0 2		-2 2 0 2								
Compressor F					0 2 0 2			0 2 0 2	1 0 0 2	0 0 2 0	0 0 2 0		1 0 0 0			
Evaporator Case G		2 0 0 0						2 0 0 0						2 0 0 0	2 0 0 0	2 0 0 2
Evaporator Core H		-1 0 0 0		-2 2 0 2	0 2 0 2	2 0 0 0		1 0 0 2								0 0 0 2
Accumulator I			-1 0 0 0		1 0 0 2			1 0 0 2	1 0 0 0							
Refrigeration Controls J					0 0 2 0			1 0 0 0		0 0 2 0			1 0 0 0			
Air Controls K					0 0 2 0				0 0 2 0		0 0 2 0		1 0 2 0	0 0 0 2	0 0 2 0	
Sensors L											0 0 2 0		1 0 0 0			
Command Distribution M	1 0 0 0				1 0 0 0				1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0		1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	
Actuators N						2 0 0 0				0 0 2 0			1 0 0 0			
Blower Controller O						2 0 0 0				0 0 2 0			1 0 0 0			2 0 0 2
Blower Motor P		0 0 0 2				2 0 0 2	0 0 0 2						1 0 0 0		2 0 0 2	

Fig. 3.7 DSM di un sistema di raffreddamento con quattro tipi di interazione

I tipi di interazione che possono essere individuati tra gli elementi sono quattro:

- Spaziale. E' richiesto un legame di adiacenza tra due o più elementi;
- Energia. E' richiesto uno scambio di energia (o trasferimento) tra due o più elementi;
- Informazione. Tra due o più elementi c'è uno scambio di dati o un segnale;
- Materiale. Indica lo scambio di materia tra almeno due entità di sistema.

La scala di valori che ogni tipo di flusso può assumere quantifica il grado dell'interazione. La scala proposta dagli autori è formata da cinque elementi:

- Required. Vuol dire che l'interazione è necessaria per la funzionalità (valore +2);
- Desired. L'interazione è opportuna ma non è necessaria alla funzionalità (valore +1);
- Indifferent. La presenza o l'assenza di un legame funzionale è indifferente (valore 0);
- Undesired. La presenza di una relazione ha effetti negativi sulla funzionalità di un componente (valore -1);
- Detrimental. L'assenza dell'interazione è necessaria per avere un risultato in termini di funzionalità (valore -2).

L'esempio di "Product DSM" visualizzato in figura 3.7 è un riferimento importante per il lavoro di ricerca in essere, poiché, anche nel presente studio, le celle gestiranno valori relativi a quattro tipi di interazione tra i componenti di un'architettura di dispositivo.

3.3 LCA ed approcci semplificati

Il Life Cycle Assessment è una metodologia che ha come obiettivo la quantificazione degli impatti ambientali e la loro valutazione lungo il ciclo di vita di un prodotto. Le fasi dell'analisi sono quelle descritte nella normativa ISO 1404X (Raw Material, Production, Transport, Use e Disposal), mentre l'approccio in sé consta di cinque passi fondamentali:

- 1) la definizione dell'obiettivo, in cui sono definite le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, le ipotesi sul sistema, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati;
- 2) l'analisi di inventario, che ha lo scopo principale di ricostruire tutti i processi di funzionamento delle principali fasi del ciclo di vita del prodotto o del sistema che si intende analizzare. Redigere un inventario vuol dire studiare, raccogliere ed elaborare i dati, imputandoli alle varie fasi (è il cosiddetto Life Cycle Inventory o LCI);
- 3) la valutazione degli impatti è lo studio del danno ambientale provocato dalle varie attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità di ciò che viene rilasciato nell'ambiente, nonché i consumi delle risorse. Queste valutazioni vengono effettuate a partire dal Life Cycle Inventory organizzando, sintetizzando (per mezzo di indicatori) ed interpretando i dati precedentemente ottenuti;
- 4) l'interpretazione è la parte conclusiva di un LCA ed ha come finalità l'adozione dei cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi e delle attività considerate, valutandole in maniera iterativa ed in modo tale da non attuare provvedimenti che peggiorino il sistema.

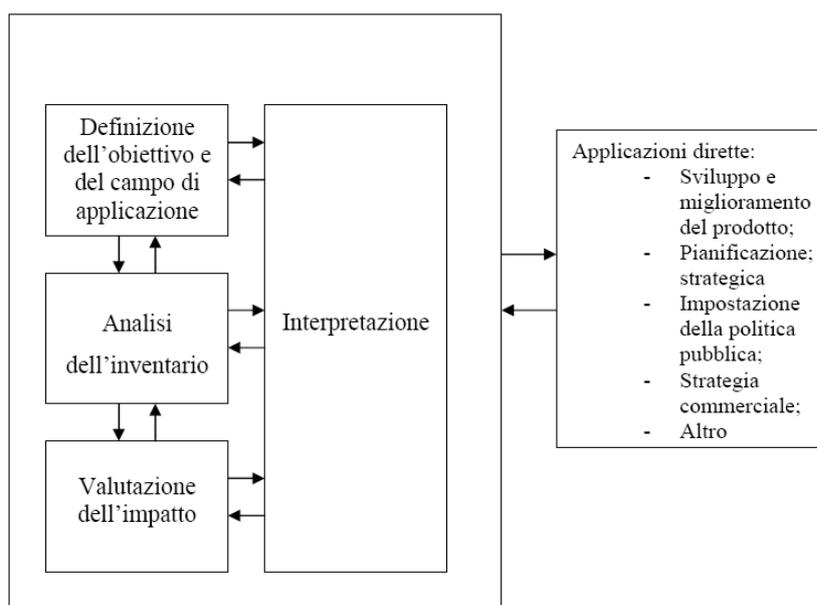


Fig. 3.8 Fasi di un LCA

Nonostante le grandi potenzialità e la completezza di questo approccio, esso soffre di una certa complessità e necessita di un grande impiego di tempo nella fase di compilazione dell'analisi di inventario. Per questo motivo, già negli anni novanta, si è pensato a strumenti che potessero essere usati in luogo di un LCA completo, cioè più snelli e semplificati [Eisenhard et al., 2000]:

- le liste di controllo o checklists (trattate anche nel capitolo 2) [Lindahl, 1999] sono approcci qualitativi che forniscono delle strategie di progettazione che tengono conto di aspetti ambientali come l'utilizzo di materiale, l'efficienza energetica e utilizzo di sostanze inquinanti. In ogni lista di controllo vengono formulate delle domande su temi di carattere ambientale per ogni fase del ciclo di vita del un dispositivo in fase di sviluppo. Seppure in modo generale, ciò stimola una progettazione conscia dal punto di vista della sostenibilità, ma non promuove la generazione di nuove soluzioni di progetto;
- gli approcci basati su matrici qualitative e quantitative di valutazione ambientale (Allenby, 1992) mettono a confronto le fasi del ciclo di vita di un prodotto con le problematiche relative alla sostenibilità. Esempi di rilievo sono dati dalla MET Matrix (Material Energy Toxicity – figura 3.9) [Brezet e Van Hemel, 1997] e dalla matrice ERPA [Graedel, 1998] (figura 3.10), in cui viene introdotta una scala qualitativa di valori al fine di quantificare un impatto più o meno rilevante. Di contro, questi metodi non offrono strategie di progettazione e di sviluppo. Non meno importante è l'assessment effettuato tramite la MECO Matrix (Material Energy Chemicals Other), in cui gli impatti, valorizzati in questo caso in modo quantitativo, sono contabilizzati secondo le cinque fasi classiche del ciclo di vita. Essa è uno degli approcci di LCA semplificato più usati, benché la reperibilità dei dati non sia sempre immediata (figura 3.11);

MET Matrix Worksheet	INPUTS		OUTPUTS
	(M) Use of Materials	(E) Use of Energy	(T) Toxic Emissions
Raw Materials & Component Production (From extraction)	>All the necessary materials, parts and components.	>Energy consumption for the obtainment of raw materials. >Energy used to refine the materials. >Energy consumption for transport of the materials to the factory.	>Toxic waste generated by the extraction and refinement of materials prior to production.
Factory Production (Including packaging & dispatch)	>Auxiliary materials purchased (screws, electrical items etc.) >Additional substances used in the production process (i.e. items for welding, painting, etc.)	>Energy consumption in the processes employed in the factory.	>Toxic waste produced in the factory. >Remainder of materials: offcuts, rejects, etc.
Distribution & Supply Chain	>Materials used for product packaging. >Elements of repackaging used for transport and distribution.	>Energy consumption during packaging and packing (where significant). >Transport from the factory to the final distributors.	>Waste from combustion produced during transport. >Waste packaging.
Use Operation (normal functioning) and Service (maintenance and repairs)	>Consumables. >Estimated spare parts.	>Energy consumed by the product throughout its estimated useful lifetime.	>Waste from consumables. >Waste from spare parts.
End of Life system - (EoL) Waste Management - Recovery and Disposal	>Consumption of raw materials and auxiliary materials for the end of life treatment.	>Energy used in the EoL system for materials or parts (incineration, recycling, etc.). >Energy for transport to EoL systems.	>Toxic waste generated by the product at EoL. >Waste from combustion. >Recycling & disposal of materials.

Fig. 3.9 Esempio di matrice MET

Life cycle stage	Materials choice	Energy use	Solid residues	Liquid residues	Gaseous residues
Premanufacture	P: 2 E: 2 E.w: 2 E.c: 2	P: 2 E: 2 E.w: 2 E.c: 2	P: 2 E: 2 E.w: 2 E.c: 2	P: 2 E: 2 E.w: 2 E.c: 2	P: 2 E: 2 E.w: 2 E.c: 2
Product Manufacture	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data
Product Delivery	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data
Product Use	P: 0 E: 2 E.w: 4 E.c: 4	P: 0 E: 0 E.w: 2 E.c: 2	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P: 0 E: 0 E.w: 4 E.c: 4
Refurbishment, Recycling, Disposal	P: 2 E: 2 E.w: 1 E.c: 1	P, E: No data E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E, E.w, E.c: No data	P, E: No data E.w: 2 E.c: 2

P= Car driven on petrol, E= Car driven on ethanol, E.w: Car driven on electricity from water power, E.c: Car driven on electricity from coal.
P: 12/36, E.c, E.w: 23/40, E:14/36

Fig. 3.10 Esempio di matrice ERPA

	Material	Manufacture	Use	Disposal	Transport
1. Materials a) quantity b) resource					
2. Energy a) primary b) resource					
3. Chemicals					
4. Others					

Fig. 3.11 Matrice MECO

- il metodo dell’LCA razionalizzato [SETAC, 1999] propone un approccio di life cycle assessment focalizzato solo su attività critiche per l’analisi, trascurando delle fasi che non sono strettamente necessarie a descrivere l’impatto ambientale del prodotto in esame. Come effetto collaterale, più snella diventa l’analisi meno precisi saranno i risultati.

Di seguito sono riportati altri due metodi di LCA semplificato che sono stati significativi negli ultimi anni:

- lo Streamlined LCA, dove l’assessment non è condotto seguendo pedissequamente la normativa ISO 1404X. Alcune fasi del ciclo di vita, infatti, non sono prese in considerazione, mentre in altri casi i dati sui processi non sono completi e vengono calcolati sulla base di ipotesi tramite informazioni spesso aggregate;
- lo slimLCA sviluppato in collaborazione con il gruppo Volkswagen [Koffler, 2008], in cui le attività di semplificazione sono concentrate nel reperimento e nell’elaborazione della grande mole di dati che vanno a costituire l’inventario.

L’idea di un approccio semplificato che tiene conto delle varie fasi di un ciclo di vita, quindi, si adatta bene all’intento di effettuare un assessment di massima di un prodotto nella fase concettuale (con dati approssimati). Diversamente dagli strumenti presentati, però, la ricerca verrà effettuata secondo un gruppo di indicatori che descrivono i potenziali impatti di un dispositivo e che sono facilmente monitorabili.

3.4 Indicatori

Un indicatore è, in generale, una misura numerica che cerca di fornire un'informazione chiave sull'andamento di un sistema (o di una sua porzione) per quel che concerne un suo determinato aspetto. Spesso, a differenza del singolo dato, l'indicatore condensa le informazioni di processi anche complessi rappresentando una grandezza che dev'essere monitorata costantemente e che, inoltre, possiede un proprio andamento. Nella maggior parte dei casi gli indicatori forniscono i seguenti benefici principali:

- 1) sono di supporto alle decisioni degli stakeholders di un particolare progetto o sistema, affinché, a seconda dei valori assunti, si possano prendere le decisioni future;
- 2) accrescono la comprensione di come sta andando un sistema attraverso una misura che, in un certo senso, ne semplifica e ne sintetizza il comportamento;
- 3) possono misurare la distanza tra risultati e target o valori "limite" che bisogna rispettare, veicolando le azioni correttive sul sistema o sul progetto che si intende condurre.

Lo schema di seguito riportato mostra che un indicatore generico può essere caratterizzato da un suo dominio di appartenenza (sociale, economico, ecologico, funzionale). Inoltre, qualora sia concepito per misurare performance globali, esso sarà sintetico, strategico ed aggregato, altrimenti sarà dettagliato, preciso, quantitativo e specifico (come nel caso della valutazione di dispositivi industriali e processi di vario genere).

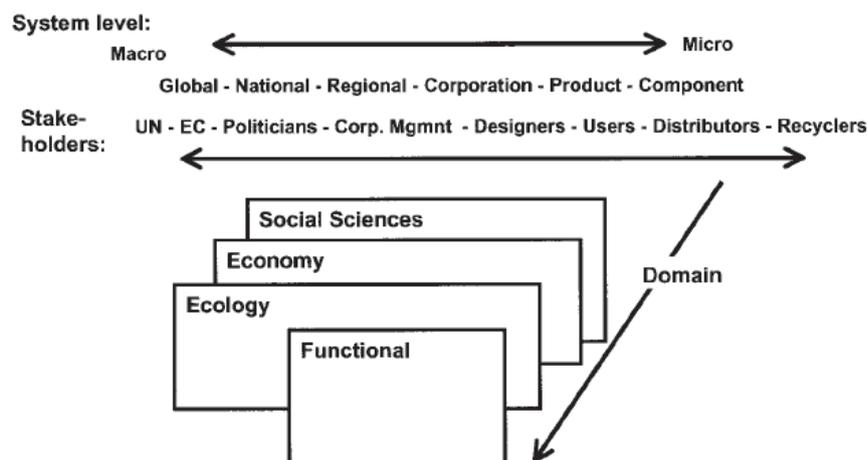


Fig. 3.12 Classificazione degli Indicatori secondo Persson [Persson, 2001]

Accanto ad indicatori di tipo socio-economico e tecnologico, sono stati sviluppati diversi indicatori di performance ambientale e di supporto al problema della sostenibilità, soprattutto per la mancanza di metriche univoche e condivise sul tema. Con particolare riferimento alla questione dell'eco-compatibilità dei prodotti industriali, alcuni di questi indicatori servono a contabilizzare, e quindi misurare, determinate caratteristiche ambientali di un prodotto al fine poterle migliorare nella fase progettuale. Contestualmente, gli indicatori costituiscono un ottimo

riferimento per una valutazione ambientale e contribuiscono, così, al miglioramento e alla selezione delle alternative di progetto meno impattanti. Altri tipi di indicatori, invece, servono a fornire al mercato ed ai fornitori delle informazioni sulla performance ambientale, come le eco-etichettature e le dichiarazioni ambientali di prodotto per gli utenti finali (si faccia riferimento al capitolo 1). Poichè è difficile avere un unico indice ambientale, è stato necessario “progettare” gli indicatori per misurare l’eco-compatibilità di un prodotto (o sistema) e dotarli di determinate caratteristiche. Secondo l’analisi di Persson, ad esempio, le proprietà di un indicatore ambientale efficace possono essere sintetizzate come segue [Persson, 2001]:

- deve rappresentare le condizioni ambientali e l’impatto generato sulla società;
- deve essere semplice, facile da interpretare e mostrare il suo andamento nel tempo;
- deve essere sensibile ai cambiamenti dell’ambiente ed alle attività umane correlate;
- deve fornire una base per i confronti internazionali;
- deve avere una soglia associata o valore di riferimento, in modo che gli utenti possano monitorare i valori che esso assume;
- dev’essere teoricamente fondato in termini tecnico-scientifici;
- deve essere basato su standard internazionali per quanto riguarda la sua validità;
- può essere collegato a modelli economici, previsionali e sistemi informativi.

I dati richiesti per creare l’indicatore, inoltre, devono essere:

- disponibili in un ragionevole rapporto costi / benefici;
- adeguatamente documentati e di qualità accertata;
- aggiornati regolarmente con procedure affidabili.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di indicatori utilizzati nell’ambito della sostenibilità. Essi possono essere adimensionali o avere una propria unità di misura, possono assumere valori assoluti o rappresentare grandezze specifiche, si pensi all’energia utilizzata per kilogrammo di prodotto (kWh/kg) o al numero di tonnellate a kilometro (t/km). Tra quelli più utilizzati nei vari software LCA si hanno: Carcinogens, Ozone Depletion, Eutrophication, Climate Change, Global Warming Potential, Land Use, Water Consumption, etc. (figura 3.13).

3.4.1 Indicatori di performance ambientale (Environmental Performance Indicators)

La letteratura definisce un indicatore di performance ambientale come un’espressione che fornisce informazioni sul livello ambientale di un’organizzazione e ne guida il continuo miglioramento. Questa definizione comprende diverse tipologie di indicatori, i quali possono descrivere gli impatti a più livelli. La normativa ISO 14001 [Bennett e James, 1998] [Marshall e Brown, 2003], infatti, ne distingue tre tipi:

- 1) Indicatori della condizione ambientale (ECI - Environmental Condition Indicators);
- 2) Indicatori di livello organizzativo (MPI - Management Performance Indicators);
- 3) Indicatori di livello operativo (OPI - Operational Performance Indicators).

I primi forniscono informazioni sulla condizione nazionale, locale, regionale o globale di un ambiente. I secondi tendono a guidare gli aspetti della politica ambientale di un'organizzazione, ad esempio, monitorando gli investimenti di un'azienda in tecnologie di produzione ad impatto più basso, verificando l'adozione di strumenti di eco-design negli uffici di progettazione, promuovendo la costituzione di nuove gamme di prodotti in luogo di quelle più impattanti oppure con l'adozione di nuove procedure (si pensi all'utilizzo di un manuale di smontaggio e riciclo). Gli MPI includono, inoltre, il monitoraggio dei rapporti con l'opinione pubblica e la verifica del rispetto degli obiettivi ambientali con gli stakeholders. Infine, gli indicatori operativi forniscono informazioni sui materiali, sulla quantità di energia elettrica e termica richiesta, sulla quantità delle emissioni di CO₂, sul funzionamento degli impianti e della logistica, focalizzandosi, quindi, sui prodotti e sui servizi in uscita. Infine, accanto agli indicatori descritti nella normativa ISO, la ricerca di Henri e Journeault [Henri e Journeault, 2008] ne considera un'ulteriore classe, ovvero quelli di tipo finanziario. Essi sono da utilizzare in combinazione con quelli di tipo ambientale per legare la sostenibilità a misure di tipo economico.

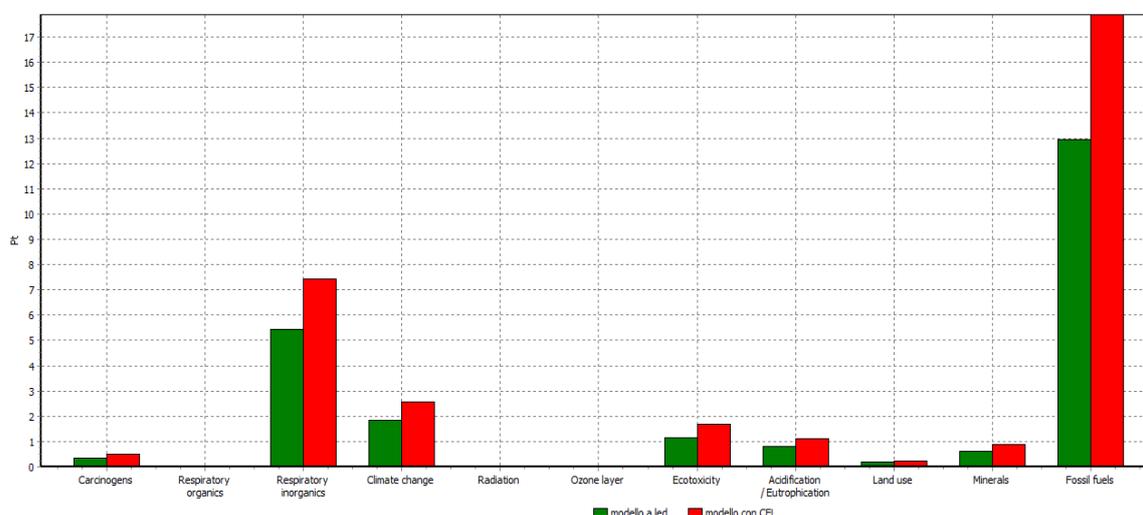


Fig. 3.13 Indicatori degli impatti in SimaPro 7 per due lampade (CFL e LED) a confronto

Altre ricerche hanno cercato di creare una classificazione dei vari indicatori ambientali. Fra le tante, quella di Dewulf [Dewulf, 2003] asserisce che i prodotti ed il loro ciclo di vita possono essere oggetto di valutazione tramite gli Environmental Performance Indicator (EPI) e ciò è coerente con l'approccio utilizzato nel presente lavoro. Egli propone, quindi, una classificazione alternativa caratterizzata da tre tipi di indicatori:

- 1) i “Technology Oriented EPI” sono quegli indicatori che derivano da dati tecnici ed hanno un forte legame con le performance ambientali. Si parte da questi, in genere, per implementare le linee guida da utilizzare nella progettazione eco-compatibile, in quanto il progettista spesso ne dispone abbastanza facilmente o è in grado di ricavarli;
- 2) gli “Ecologically Oriented EPI” sono gli indicatori che danno informazioni sulle sostanze chimiche e le emissioni nell’ambiente in termini di impatto e danno. In genere, sono imposti dalle normative sulle sostanze pericolose e focalizzano l’attenzione su determinate categorie di emissioni di particolare rilevanza per gli ecosistemi (come ad esempio la CO₂ legata alle produzioni e a molte attività umane);
- 3) i “Value Oriented EPI” costituiscono sostanzialmente una somma pesata di altri EPI. Un esempio è dato da Eco-Indicator ‘99, dove gli impatti, calcolati a partire da differenti materiali e processi, sono misurati con un punteggio (mPts). Quest’ultimo esprime un millesimo del carico ambientale annuale di un abitante medio in Europa, utilizzando una logica, anche in questo caso, orientata agli effetti.

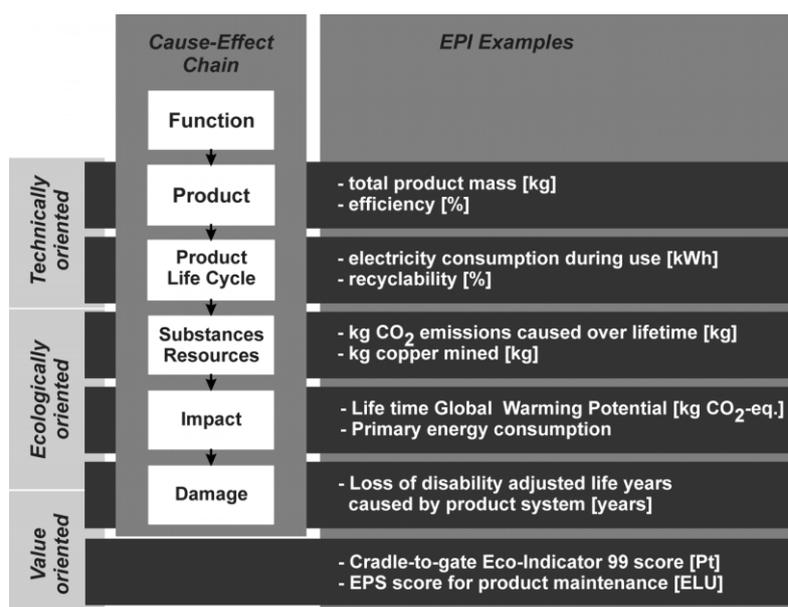


Fig. 3.14 Esempi di EPI di tipo operativo (OPI) in una tassonomia alternativa [Dewulf, 2003]

3.5 MCDM

Il Multi-Criteria Decision Making (MCDM) è un approccio molto usato nell’ambito delle cosiddette “Decision Sciences” e supporta un soggetto (decisore) nell’effettuare una scelta nel momento in cui si hanno più alternative e più criteri di confronto. Le tecniche MCDM sono frequentemente usate anche in diversi campi di applicazione come: Informatica, Management, problemi di Ingegneria e, negli ultimi anni, sono stati di supporto alla risoluzione di problemi di

progettazione. Questo fatto ha suggerito la possibilità di un loro impiego nella valutazione ambientale dei prodotti industriali durante il loro sviluppo [Hermann et al., 2007][Gao et al., 2010][De Napoli et al., 2012].

Come sarà discusso nel prossimo capitolo, le tecniche MCDM forniscono un supporto utile in un processo di selezione tra le diverse alternative sulla base di criteri multipli. Nel problema che verrà analizzato, infatti, vi è una fase in cui un progettista deve confrontare un gruppo di soluzioni di prodotto secondo alcuni indicatori ambientali e la scelta della migliore (o delle migliori) può essere difficile se si confrontano prestazioni caratterizzate da unità di misura diverse tra loro. A causa di questo confronto multidimensionale, l'incertezza in fase di selezione può essere risolta mediante un approccio multi-criterio, anche perché il problema presenta le seguenti caratteristiche:

- un decisore decide tra più alternative;
- le alternative sono caratterizzate da diversi criteri di scelta che, in generale, possono essere in conflitto tra loro;
- i criteri hanno unità di misura differenti (non confrontabili);
- è possibile associare un diverso grado di importanza ai criteri tramite dei pesi.

Gli elementi che accomunano un po' tutti i metodi in questione e che, quindi, caratterizzano un tipico problema decisionale sono:

- le alternative di scelta;
- i criteri (o attributi) sulla quale le scelte vengono effettuate;
- i pesi (valori numerici) da attribuire a ciascun criterio, la cui somma è unitaria;
- le unità di misura di ogni criterio;
- la matrice delle decisioni, in cui ogni elemento a_{ij} rappresenta il valore che assume l'alternativa A_i rispetto al criterio C_j .

Di seguito viene mostrato il funzionamento di cinque tecniche MCDM note. Esse, inoltre, costituiscono la base per metodi più complessi presenti in letteratura, che sono stati sviluppati per andare incontro ad esigenze di precisione ed affidabilità dei modelli matematici.

3.5.1 Weighted Sum Model (WSM)

Il modello della somma pesata (WSM) è un metodo molto utilizzato, per lo più quando il criterio di scelta è unico. Supponiamo di avere m alternative ed un numero n di criteri. L'alternativa migliore è quella che soddisfa la seguente espressione [Fishburn, 1967]:

$$A^* = \max \sum_{j=1}^n a_{ij} * w_j \quad \forall i=1, \dots, m \quad (a)$$

dove A^* è la migliore alternativa, n è il numero di criteri decisionali, a_{ij} è il valore effettivo della i -esima alternativa (A_i) in termini del j -esimo criterio C_j e w_j è il peso che determina l'importanza del j -esimo criterio.

Dal punto di vista matematico questo modello si basa sul principio di utilità additivo, dunque il valore complessivo di ciascuna alternativa è pari alla somma dei prodotti indicati come nella relazione (a). Il modello presenta, già a prima vista, delle incongruenze quando viene applicato a problemi decisionali multidimensionali. La presenza di più unità di misura differenti tra loro, infatti, rende impossibile la determinazione di un unico valore per una funzione di utilità (di tipo additivo), dove gli addendi non sono sommabili e ciò rende difficile prendere una decisione.

Per fornire un esempio numerico (nel caso di buon funzionamento), si consideri di un problema con quattro alternative e cinque criteri di scelta espressi esattamente con la medesima unità di misura. I pesi relativi ai cinque criteri sono stati scelti in modo casuale, ma in maniera tale che la loro somma sia pari ad 1. Il vettore dei pesi w risulta essere: $w = [0,3 \ 0,15 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,25]$, mentre la matrice delle decisioni presenta i seguenti valori:

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	10	13	24	15	20
A2	15	20	10	5	5
A3	16	10	12	14	9
A4	11	12	5	18	15

Applicando la relazione (a) ed indicando con $W(A_i)$ il valore della somma pesata dell'alternativa A_i si ha che:

$$W(A_1) = 10 \times 0,3 + 13 \times 0,15 + 24 \times 0,1 + 15 \times 0,2 + 20 \times 0,25 = 15,35$$

$$W(A_2) = 15 \times 0,3 + 20 \times 0,15 + 10 \times 0,1 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,25 = 10,75$$

$$W(A_3) = 16 \times 0,3 + 10 \times 0,15 + 12 \times 0,1 + 14 \times 0,2 + 9 \times 0,25 = 12,55$$

$$W(A_4) = 11 \times 0,3 + 12 \times 0,15 + 5 \times 0,1 + 18 \times 0,2 + 15 \times 0,25 = 12,95$$

Nel caso di massimizzazione, e cioè nel caso di preferenza per l'alternativa col maggior valore di $W(A_i)$, la migliore alternativa è A_1 . Inoltre, è possibile stilare il seguente ranking:

$$A_1 > A_4 > A_3 > A_2 \text{ (dove ">" sta per "meglio di").}$$

Ovviamente, i criteri possono rappresentare dei costi e, quindi, attributi che vanno minimizzati, per cui la migliore alternativa sarà quella che presenterà il minor valore di $W(A_i)$.

3.5.2 Weighted Product Method (WPM)

Il Weighted Product Method (WPM) è un modello matematico basato sull'operatore di moltiplicazione che presenta interessanti peculiarità. Esso è chiamato anche “analisi adimensionale” [Triantaphyllou, 1998], poiché la sua struttura elimina qualsiasi unità di misura e, quindi, rende possibile il confronto di due o più alternative anche se i criteri hanno unità di misura diverse tra loro (caratteristica che costituisce il limite principale del WSM).

Ogni alternativa è confrontata con le altre moltiplicando una serie di termini pari al numero dei criteri di scelta. Ogni termine è il rapporto dei valori che le due alternative assumono per quel determinato criterio e viene elevato a potenza, assumendo come esponente il peso che il decisore ha dato al criterio stesso. Il modello matematico è strutturato come segue [Bridgman, 1922] [Miller e Starr, 1969]:

$$P(A_i/A_k) = \prod_{j=1}^n (a_{ij}/a_{kj})^{w_j} \tag{b}$$

dove n è il numero di criteri, a_{ij} è il valore della i-esima alternativa rispetto al j-esimo criterio e w_j è il peso associato al j-esimo criterio.

Poiché il modello è una moltiplicazione di rapporti, il confronto tra due alternative viene valutato sul termine $P(A_i/A_k)$, infatti, se questo è maggiore di uno, l'alternativa A_i è preferibile rispetto ad A_k (nel caso di massimizzazione). Molto interessante è anche il caso di minimizzazione, dove, nel caso di criteri di tipo costo, un'alternativa è preferibile ad un'altra se $P(A_i/A_k) < 1$.

Così, il WPM può essere utilizzato per problemi decisionali mono e multi-dimensionali, offrendo una certa semplicità computazionale. Inoltre, rispetto agli altri metodi MCDM, il modello confronta le varie alternative a coppie, per cui alla fine di tutti i confronti è necessario considerare non solo i valori numerici risultanti, che danno una misura della performance complessiva di un'alternativa rispetto all'altra, ma anche il numero di vittorie ottenute da ciascuna alternativa.

Consideriamo l'esempio numerico utilizzato per testare il WSM. Il vettore w è il seguente: $w = [0,3 \ 0,15 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,25]$ e la matrice delle decisioni risulta così composta:

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	10	13	24	15	20
A2	15	20	10	5	5
A3	16	10	12	14	9
A4	11	12	5	18	15

Applicando la relazione (b) ed indicando con $P(A_i/A_k)$ il valore del prodotto pesato si ha che:

$$P(A_1/A_2) = (10 / 15)^{0,3} * (13/20)^{0,15} * (24/10)^{0,1} * (15/5)^{0,2} * (20/5)^{0,25} = 0,167$$

$$P(A_1/A_3) = (10 / 16)^{0,3} * (13/10)^{0,15} * (24/12)^{0,1} * (15/14)^{0,2} * (20/9)^{0,25} = 0,320$$

$$P(A_1/A_4) = (10 / 11)^{0,3} * (13/12)^{0,15} * (24/12)^{0,1} * (15/18)^{0,2} * (20/15)^{0,25} = 0,175$$

$$P(A_2/A_3) = (15 / 16)^{0,3} * (20/10)^{0,15} * (10/12)^{0,1} * (5/14)^{0,2} * (5/9)^{0,25} = 0,203$$

$$P(A_2/A_4) = (15 / 11)^{0,3} * (20/12)^{0,15} * (10/5)^{0,1} * (5/18)^{0,2} * (5/15)^{0,25} = 0,173$$

$$P(A_3/A_4) = (16 / 11)^{0,3} * (10/12)^{0,15} * (12/5)^{0,1} * (14/18)^{0,2} * (9/15)^{0,25} = 0,128$$

Nel caso di massimizzazione, il metodo fornisce la seguente classifica in base al numero di confronti a coppie vinti da ciascuna alternativa: $A_4 > A_3 > A_2 > A_1$ (dove ">" sta per "meglio di"), per cui la migliore alternativa risulta essere A_4 (poichè vince su tutte le altre). Nel caso i criteri fossero di tipo "costo" si avrebbe che: $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$, ed A_1 risulterebbe la migliore alternativa sulla base dei confronti effettuati.

3.5.3 Analytic Hierarchy Process

Il Processo Analitico Gerarchico (AHP) [Saaty, 1980] si basa sull'organizzazione dei criteri di scelta tramite un sistema di gerarchie. In questo caso la matrice alternative/criteri è costituita da elementi che non rappresentano valori di performance ma le importanze relative delle alternative in termini di ogni criterio. Ogni termine (performance), infatti, viene diviso per la somma degli stessi a_{ij} sul j-esimo criterio, normalizzando ad 1 l'intera colonna corrispondente. La migliore alternativa (nel caso massimizzazione) è data dalla seguente relazione:

$$A^* = \max \sum_{j=1}^n q_{ij} * w_j \quad \forall i=1, \dots, m \tag{c}$$

dove A^* è la migliore alternativa, n è il numero di criteri decisionali, q_{ij} è il valore relativo della i-esima alternativa (A_i) per il j-esimo criterio e w_j è il peso del j-esimo criterio. La struttura è simile al metodo della somma pesata. L'AHP utilizza i valori relativi in luogo di quelli reali e, quindi, può essere utilizzato anche per problemi multidimensionali, ottenendo i benefici del WPM. Consideriamo la matrice alternative/criteri con i dati utilizzati negli esempi relativi al metodo della somma pesata e del prodotto pesato:

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	10	13	24	15	20
A2	15	20	10	5	5
A3	16	10	12	14	9
A4	11	12	5	18	15

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,19	0,24	0,47	0,29	0,41
A2	0,29	0,36	0,20	0,1	0,10
A3	0,31	0,18	0,23	0,27	0,18
A4	0,21	0,22	0,1	0,35	0,31

Si noti che le colonne della matrice delle decisioni sono state normalizzate ad 1, infatti vale la relazione $\sum_{i=1}^m q_{ij} = 1$. Applicando la formulazione (c) si ha che:

$$\text{AHP}(A_1) = 0,19 \times 0,3 + 0,24 \times 0,15 + 0,47 \times 0,1 + 0,29 \times 0,2 + 0,41 \times 0,25 = 0,30$$

$$\text{AHP}(A_2) = 0,29 \times 0,3 + 0,36 \times 0,15 + 0,2 \times 0,1 + 0,1 \times 0,2 + 0,1 \times 0,25 = 0,21$$

$$\text{AHP}(A_3) = 0,31 \times 0,3 + 0,18 \times 0,15 + 0,23 \times 0,1 + 0,27 \times 0,2 + 0,18 \times 0,25 = 0,24$$

$$\text{AHP}(A_4) = 0,21 \times 0,3 + 0,22 \times 0,15 + 0,1 \times 0,1 + 0,35 \times 0,2 + 0,31 \times 0,25 = 0,25$$

Si ottiene, così, il seguente ranking: $A_1 > A_4 > A_3 > A_2$ ed A_1 come migliore alternativa (massimizzazione).

3.5.4 Metodo ELECTRE

Il metodo ELECTRE è l'acronimo di ELimination Et Choix Traduisant la Réalité [Figueira, 2005]. Come accade per il WPM, questa tecnica utilizza il confronto a coppie (pair-wise comparison) tra due alternative e tale confronto viene eseguito per ognuno dei criteri in modo separato. Due alternative vengono confrontate criterio per criterio sulla base delle loro performance. Un'alternativa A_i è non-dominata da un'altra A_k se questa non supera in almeno un criterio la precedente ed possiede i valori restanti uguali, per cui il decisore terrà per buona A_i fin quando non ce ne sarà una migliore. Il metodo ELECTRE introduce anche dei valori soglia, in modo che il decisore possa essere guidato nelle scelte, e dei pesi da attribuire ai criteri di selezione per esprimere la loro importanza relativa.

Infine, il metodo ELECTRE produce un intero sistema di relazioni binarie di preferenza tra le alternative, ma a volte non è in grado di identificare l'alternativa migliore in assoluto. Si produce solo un nucleo di alternative principali e vengono eliminate quelle meno favorevoli. Il metodo, almeno nella versione classica (ELECTRE I), si sviluppa nei seguenti passi:

- 1) Costruzione di una matrice di decisione normalizzata;
- 2) Attribuzione di un peso agli elementi della matrice di decisione;
- 3) Determinazione dei set di concordanza e discordanza;
- 4) Costruzione delle matrici di concordanza e discordanza;
- 5) Determinazione delle matrici dominate di concordanza e discordanza;
- 6) Determinazione della matrice aggregata di dominanza;
- 7) Eliminazione delle alternative meno preferibili.

3.5.5 Metodo TOPSIS

Il TOPSIS (acronimo di Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [Hwang e Yoon, 1981] è un metodo di MCDM che sfrutta il concetto di distanza geometrica delle soluzioni e, tipicamente, può essere considerato un'alternativa al metodo ELECTRE. Secondo

quest'approccio l'alternativa migliore dovrebbe possedere la minima distanza dalla soluzione ideale e la massima distanza dalla peggiore (indicata col termine "negative-ideal alternative").

L'assunto di base è che ogni criterio (o attributo) ha una tendenza ad avere una funzione di utilità monotona crescente o decrescente, ed, inoltre, il decisore ha conoscenza dei criteri (come nel metodo ELECTRE). In sintesi, il metodo costruisce le due soluzioni virtuali "ideale" e "negativa ideale" e calcola la distanza di ogni alternativa reale da queste. Anche nel metodo TOPSIS si parte da una matrice di decisione di m alternative ed n criteri e si segue per grandi linee la struttura del metodo ELECTRE, seguendo i passi elencati:

- 1) Costruzione di una matrice di decisione normalizzata;
- 2) Costruzione di una matrice di decisione normalizzata pesata;
- 3) Determinazione della soluzione "ideale" e di quella "negativa-ideale";
- 4) Calcolo della misura di separazione;
- 5) Calcolo della "vicinanza relativa" dalla soluzione ideale per le alternative;
- 6) Classifica dell'ordine di preferenza.

3.6 Pareto-efficienza

La Pareto-efficienza (talvolta Pareto-Ottimalità o Efficienza Paretiana) è un concetto introdotto da Vilfredo Pareto in ambito economico, ma, con alcuni accorgimenti ed ipotesi aggiuntive, trova applicazione in molte discipline, tra cui anche le problematiche di tipo ingegneristico. Il suo utilizzo, infatti, è richiesto quando una soluzione di un problema deve contemporaneamente minimizzare (o massimizzare, nel caso inverso) due o più obiettivi che ci si è posti e questa stessa soluzione può non esistere se gli obiettivi sono conflittuali tra di loro. Entra in gioco il concetto di "soluzione efficiente" o "soluzione non dominata".

Secondo Pareto, un vettore soluzione \mathbf{x} domina strettamente (è preferibile a) un vettore \mathbf{x}' se ciascun parametro di \mathbf{x} non è maggiore del parametro corrispondente di \mathbf{x}' e almeno un parametro è strettamente minore, cioè: $x_i \leq x'_i$ per ogni i e $x_i < x'_i$ per qualche i .

Se una soluzione domina tutte le altre, siamo in presenza della soluzione ottima in assoluto, altrimenti, si avranno più soluzioni non-dominate (efficienti). Esse costituiscono la cosiddetta "frontiera di Pareto", cioè l'insieme delle soluzioni progettuali che non sono strettamente dominate da alcuna soluzione. Nella figura 3.15 si ha un gruppo di alternative Pareto-efficienti poste sulla frontiera (tra cui S_i e S_j) che dominano la generica alternativa S_k , ma tra di esse non è possibile determinare quale sia la migliore.

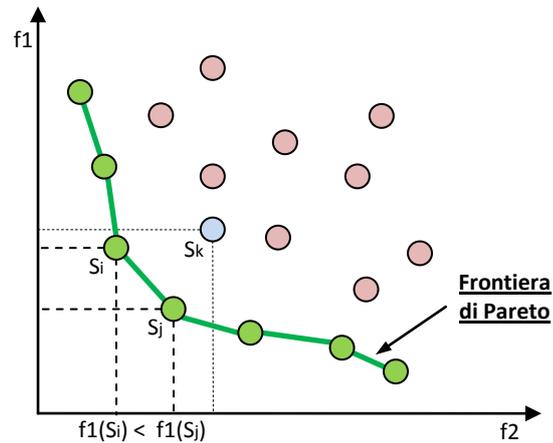


Fig. 3.15 Esempio di frontiera efficiente di Pareto

Considerando il presente studio, e cioè la scelta di un concept di prodotto che minimizzi una serie di impatti ambientali, un'alternativa risulterà caratterizzata da più criteri di scelta. Per stabilire se essa sia ottima, dovrà essere migliore delle altre secondo tutti i criteri (o gli obiettivi) considerati. Tuttavia, è possibile che una soluzione ottima non possa essere individuata, perciò l'approccio paretiano potrebbe supportare i progettisti nell'identificazione di un insieme di concetti "efficienti" dal punto di vista ambientale.

Bisogna aggiungere che, in teoria, il cosiddetto "Ottimo Paretiano" si realizza quando non è più possibile apportare miglioramenti di efficienza ad una soluzione senza che queste alterazioni peggiorino lo stato delle altre. Benchè le soluzioni che verranno trovate siano apparentemente indipendenti tra loro, non si può escludere che, in un approccio paretiano, le soluzioni si ritrovino legate le une alle altre e che eventuali miglioramenti delle prestazioni su un concept possano compromettere le performance degli altri.

3.7 Conceptual design

Il Conceptual Design si identifica con le prime fasi del processo di progettazione, dove, a partire dall'identificazione dei problemi, vengono elaborate delle soluzioni progettuali di massima.

Nonostante esso sia, ancora oggi, poco supportato in termini di strumenti e di risorse di tempo, le decisioni di progetto prese in questa fase hanno una significativa influenza su molti fattori di successo per un prodotto come: costi, prestazioni, affidabilità, sicurezza, ecc. E' lecito pensare, quindi, che il conceptual design possa influenzare anche le future caratteristiche ambientali (e di eco-compatibilità) di un prodotto. Durante questa fase, infatti, vengono formulate molte delle scelte strategiche e vengono prese delle decisioni che diventano difficili da cambiare man mano che il progetto diventa dettagliato e le soluzioni definitive vengono validate dal team. Inoltre,

mentre all'inizio del concepimento di un dispositivo (o di un prodotto-servizio) il progettista può dare sfogo alla sua creatività proponendo idee in modo libero (perché privo di molti vincoli), la libertà di formulare proposte diminuisce notevolmente nelle fasi di sviluppo successive.

Tra gli approcci più usati (e più sistematici), che hanno supportato il processo di progettazione in questa fase, si ricorda l'approccio funzionale, il quale, per le sue potenzialità, è stato adottato anche nel presente lavoro di ricerca.

3.7.1 Approccio funzionale

La progettazione funzionale è un approccio che supporta la generazione delle idee di progetto a partire dalla "funzione" [Chakrabarti e Blight, 2001] che il prodotto, visto come un sistema di parti interagenti, deve svolgere in maniera efficace. I progettisti vengono stimolati a continui ragionamenti sulle entità coinvolte nel progetto che, in questo modo, vengono sviluppate in modo continuo e sistematico fino alle soluzioni.

L'approccio funzionale si è evoluto fino a possedere un proprio linguaggio di rappresentazione. Affrontando i problemi in termini di funzioni, è nata la necessità di guidare i progettisti verso la ricerca di soluzioni concettuali nelle prime fasi del design in modo sistematico. Il problema della rappresentazione dell'approccio è stato largamente discusso [Deng, 2002][Chakrabarti e Blessing, 1996], innanzitutto proponendo una classificazione delle funzioni, come ad esempio la distinzione tra gli intenti del progettista ad alto livello ("purpose functions") e le effettive funzioni del dispositivo nel dettaglio ("action functions") ed, in seguito, discutendo sulla natura semantica o sintattica della rappresentazione e le varie forme per poterla attuare. Le prime due modalità di rappresentazione sono state le seguenti:

- le trasformazioni di flusso input-output basate su modellazione matematica;
- l'esplicitazione di una funzione attraverso la coppia "verbo + nome", usando un approccio linguistico.

Quest'ultima tipologia unisce una rappresentazione del significato, e quindi della semantica, ad una sintassi semplice ed intuitiva, creando così un buon compromesso. I blocchi "verbo + nome" sono stati fondamentali per la creazione e lo sviluppo di metodologie a supporto dell'attività del progettista nel conceptual design. Tra i vari strumenti di rappresentazione si ha la rete funzionale, che è un esempio di metodologia sistematica e strutturata con regole di composizione che ne costituiscono la grammatica. Per poter generare una possibile soluzione, infatti, la metodologia prevede l'impiego dei seguenti elementi [Bruno et al., 2003]:

- 1) lo spazio di progettazione;
- 2) i blocchi funzionali;

- 3) gli archetipi;
- 4) i link funzionali.

Il processo di progettazione concettuale ha inizio con l'individuazione delle funzioni che l'apparecchiatura deve svolgere, nel rispetto degli specifici requisiti (organizzati in una fase preliminare). Ciascuna funzione, espressa da un verbo che ne descrive l'azione ed un nome che ne specifica l'oggetto, è rappresentata mediante un blocco funzionale. Il blocco funzionale, già presente in diverse metodologie in letteratura [Ulrich e Eppinger, 2008] [Bruno et al., 2003][Bohm et al., 2010], viene rappresentato da un cubo, sulle cui superfici possono concorrere più collegamenti. Le relazioni tra i blocchi funzionali sono detti "link funzionali" [Rizzuti et al., 2006] [Pahl e Beitz, 1996] e rappresentano, nella maggior parte dei casi, delle interazioni relative a quattro tipi di collegamenti:

- 1) Forza. Esso rappresenta un legame fisico tra due o più componenti (ad esempio contatti) ed indica interazioni reciproche;
- 2) Segnale. Essenzialmente, rappresenta un impulso inviato ad un processo per notificare uno stato, per regolare le interazioni tra componenti o per indicare eventi che si sono verificati;
- 3) Materiale. Questo tipo di collegamento funzionale definisce i flussi di materia che sono presenti soprattutto durante il funzionamento di un dispositivo;
- 4) Energia. Questo collegamento funzionale è legato all'energia scambiata tra i blocchi funzionali di una rete e può rappresentare diversi tipi di flusso (elettrico, termico, ecc.).

L'insieme di connessi dai link costituisce la rete. Essa è una struttura concettuale in continuo aggiornamento e viene sviluppata fino ad avere una prima architettura di prodotto. Infatti, tramite la reiterazione dell'attività di schematizzazione concettuale ed effettuando le prime scelte costruttive, si perviene ad un maggiore livello di dettaglio con la trasformazione dei blocchi funzionali in elementi geometrici grossolani detti "archetipi", ai quali sono associabili classi di componenti. Alla fine del processo, lo spazio di progettazione sarà occupato da un insieme di archetipi connessi fra loro da link funzionali, che costituirà la prima stesura della soluzione costruttiva (architettura di prodotto).

In figura 3.16 sono visualizzate due reti che rappresentano due soluzioni concettuali differenti di un macinacaffè. Le reti sono quasi complete di tutti gli elementi e dei link funzionali che i progettisti sono stati in grado di definire. Quasi tutti i vari blocchi sono stati trasformati negli archetipi che esprimono una o più funzioni ed è stato possibile, inoltre, associare alle superfici connesse lo stesso colore associato al tipo di link coinvolto.

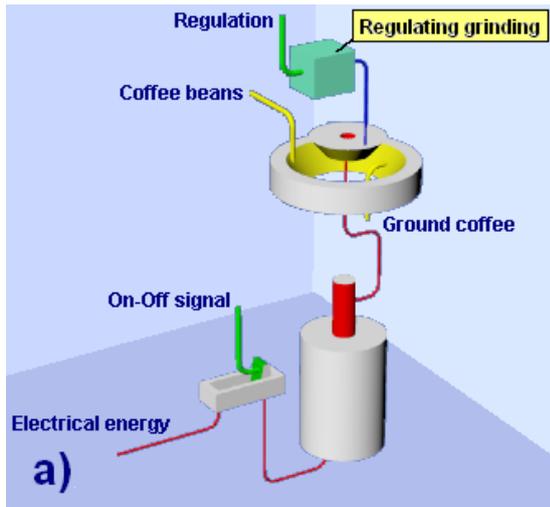


Fig. 3.16 – a) Rete funzionale del concept 1

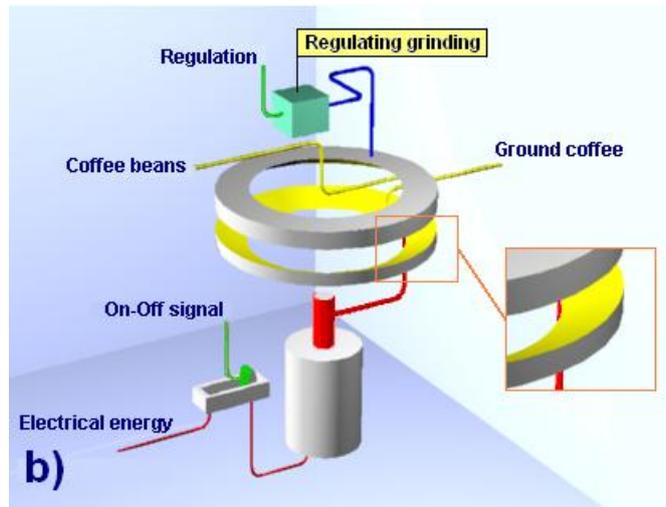


Fig. 3.16 – b) Rete funzionale del concept 2

L’approccio funzionale è stato sviluppato ulteriormente sia dal punto di vista semantico, sia dando importanza anche all’aspetto sintattico. In primo luogo si è tentato di codificare un numero di funzioni elementari che i vari blocchi potevano espletare, come proposto nella figura 3.17 [Giampà et al., 2004]. Ciò è stato un tentativo utile a guidare il progettista nella composizione di una rete, essendo conscio della natura degli elementi che la costituiscono.

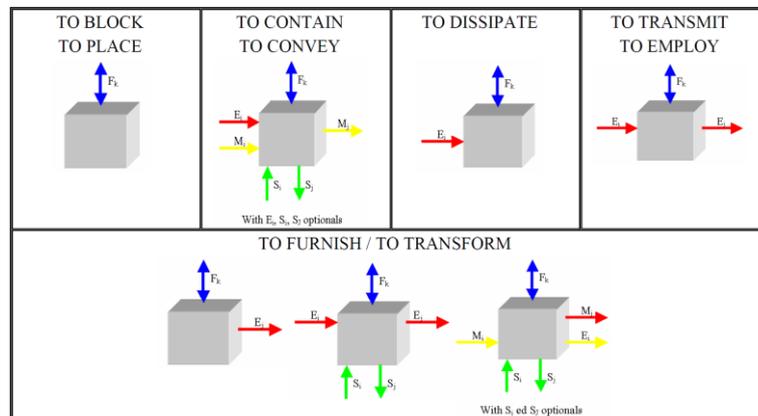


Fig. 3.17 Esempio di codifica dei blocchi funzionali [Giampà et al., 2004]

Contestualmente allo sviluppo di metodi per il conceptual design, altri strumenti sono stati sviluppati per formalizzare in maniera più consistente la generazione sistematica dei concetti tramite reti funzionali. Un esempio viene offerto dalla formalizzazione mediante strutture a grafo [Rizzuti et al., 2006][Al-Hakim et al., 2000] (Figure 3.18-3.19). L’intento principale è stato quello di formalizzare il processo di progettazione concettuale mediante delle strutture che consentissero un maggior controllo sulla coerenza di una rete funzionale in fase di allestimento. I blocchi funzionali corrispondono ai nodi del grafo, mentre i collegamenti di forza, segnale, materiale ed energia si traducono negli archi di collegamento. Il link di forza rappresenta una mutua interazione e non risulta orientato, mentre ai restanti collegamenti è fissato un verso

percorrenza, poichè, in genere, essi individuano dei flussi. I colori che codificano i link sono quelli utilizzati nelle figure 3.16-3.19, ovvero: blu per i contatti di forza, verde per il segnale, giallo per i flussi di materiale e rosso per quelli di energia.

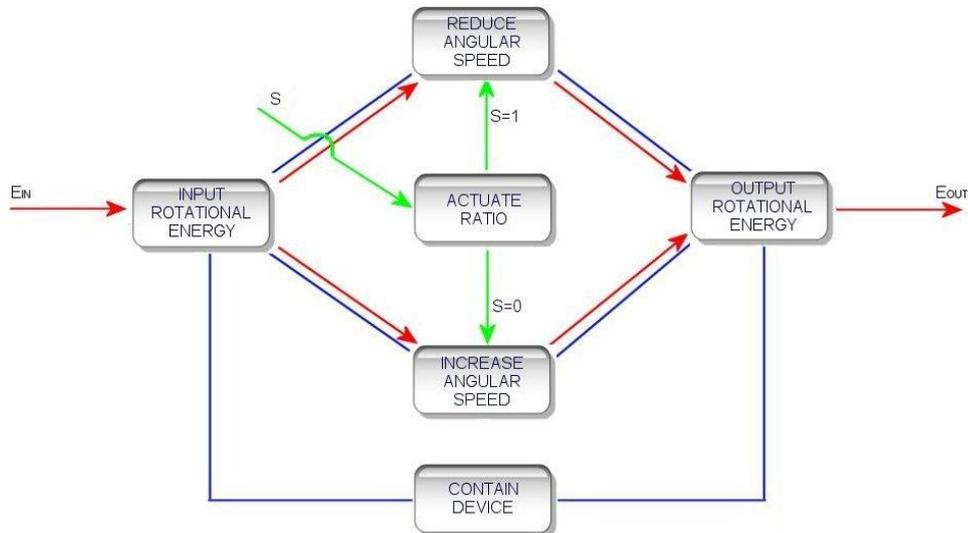


Fig. 3.18 Rete funzionale a grafo di un sistema di trasmissione

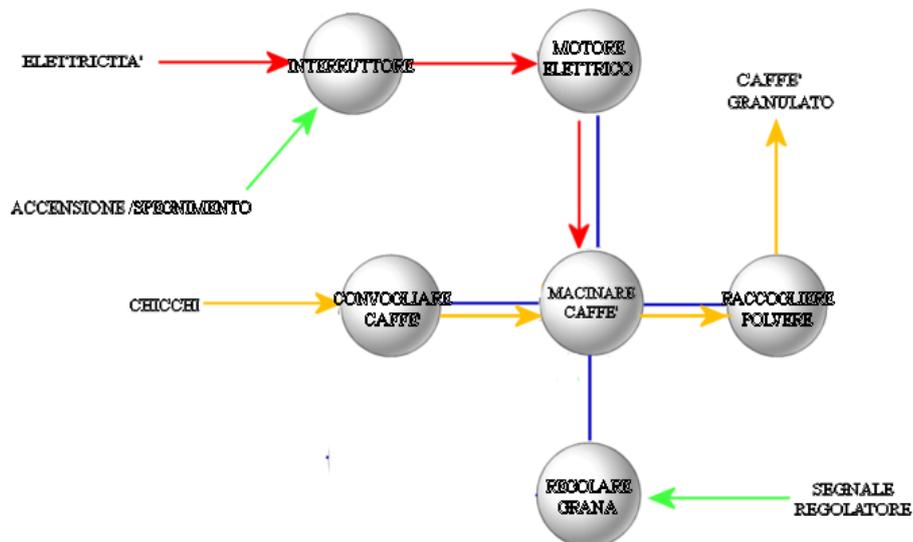


Fig. 3.19 Rete funzionale a grafo di un macinacaffè

CAPITOLO 4

Una metodologia integrata per l'early design

4.1 Una proposta metodologica

Negli scorsi anni sono state sviluppate molte metodologie e tool di supporto alla progettazione dei prodotti industriali al fine di migliorarne l'eco-compatibilità. Questa grande varietà di strumenti offre preziosi contributi su diversi aspetti. Essi sono strutturati in modo differente l'uno dall'altro ed ognuno presenta delle peculiarità che lo rendono più adatto al momento in cui viene utilizzato, dalle strategie di Eco-Design che forniscono indicazioni generali per lo sviluppo di prodotti in chiave sostenibile, ai software per il Life Cycle Assessment (LCA) che supportano i progettisti nella valutazione dei dispositivi quando è necessario confrontarne gli impatti (si pensi al processo di sviluppo di un prodotto ex-novo o al miglioramento di dispositivi già esistenti e così via). I tool che possono essere utilizzati, dunque, sono molteplici e comprendono: liste di controllo (checklists), eco-design guidelines, metodi fondati su indagini, metodi basati su indicatori, l'LCA, ecc.

Numerose ricerche accademiche ed industriali hanno mostrato come alcune di queste tecniche, come per esempio l'LCA, possono essere utilizzate efficacemente solo su dispositivi già presenti sul mercato o, almeno, già sviluppati in dettaglio. La valutazione, come prescritto dalle normative ISO 1404X e relative modifiche, si basa sulla compilazione dei Life Cycle Inventory (LCI), dove è richiesta una grande quantità di informazioni ed un elevato livello di precisione dei dati. Essa, in particolare, risulta ottenibile solo attraverso un'adeguata documentazione e con un'analisi spesso eseguita sul prodotto finito. Inoltre, la contabilizzazione delle risorse impiegate ed i diversi tipi di impatto di un dispositivo (come gas serra, riduzione dell'ozono, smog fotochimico, ecc.) sono quantificati secondo i materiali o, più in generale, le risorse utilizzate e non secondo gli elementi costitutivi di un prodotto che vanno a soddisfare determinate funzioni. Tale approccio, infatti, potrebbe essere utile in fase di sviluppo concettuale di un prodotto, mentre l'LCA puro non sembra essere adatto ad un early assessment, anche perché non è considerato una metodologia "design oriented" [Ramani et al., 2010] ed è utilizzato, in genere (e con qualche limite), come punto di partenza per la riprogettazione di un dispositivo, come metodo di confronto tra prodotti reali o per validare i risultati di un'attività di progetto.

Poiché uno degli obiettivi che ci si è posti nell'attività di eco-design è quello di tenere conto dei

fattori ambientali al più presto possibile nello sviluppo di un prodotto, la proposta è quella di integrare la valutazione degli aspetti ambientali di un dispositivo industriale durante l'attività di progettazione, poiché è proprio questa fase che determina una parte consistente degli impatti.

Partendo da quest'ipotesi, una valutazione di questo tipo può essere utile a prevenire lo sviluppo di prodotti poco efficienti e, quindi, potenzialmente non sostenibili. Per poter perseguire l'obiettivo di sviluppare prodotti eco-compatibili, essendo consci delle caratteristiche ambientali già in fase di conceptual design, viene proposto un approccio integrato, che va ad aggiungersi a quella classe di metodologie da utilizzare nell'early design (metodi discussi nel capitolo 2). La metodologia discussa nei prossimi paragrafi si distingue per essere sviluppata sulla base di una Design Structure Matrix (DSM), che, oltre ad aver raggiunto una certa maturità come strumento per la gestione di prodotti e processi, è utilizzata in molti contesti per la sua flessibilità.

In definitiva, la combinazione di una valutazione ambientale con uno strumento che gestisce le architetture di prodotto durante le prime fasi del suo sviluppo può essere un modo per affrontare il problema della sostenibilità nel momento in cui si creano i concept e, pertanto, il progettista si trova ad operare, per lo più, su modelli funzionali.

4.2 Metodologia A-DSM: generalità

La metodologia descritta nel presente lavoro propone la valutazione sistematica di diverse alternative di progetto e, successivamente, un loro confronto nelle prime fasi del loro sviluppo al fine di ottenere la soluzione migliore dal punto di vista ambientale. In fase di progettazione concettuale, infatti, i progettisti lavorano su modelli che non sono completamente definiti, inoltre le informazioni sono scarse o approssimate e molte ipotesi possono essere fatte su funzioni, materiali, architetture e futuri processi di lavorazione delle parti. La metodologia si basa su un'integrazione di strumenti concettuali diversi tra loro e sfrutta il concetto di "rete funzionale", la quale, a partire da uno schema di tipo "black box", viene elaborata gradualmente fino a diventare una struttura sempre più accurata.

In figura 4.1 è possibile visualizzare uno schema riassuntivo dell'intero iter metodologico. Partendo da un set di requisiti funzionali, un'idea di prodotto viene sviluppata tramite un certo numero di "reti funzionali" fino ad ottenere una serie di modelli definiti e caratterizzati da archetipi. I dati relativi agli archetipi, che caratterizzano e danno informazioni sul loro impatto (i dati sono legati al ciclo di vita dei componenti), vengono reperiti e successivamente elaborati sulla base delle geometrie, dei materiali scelti e delle ipotesi di progetto formulate su ogni concept di prodotto. A questo punto, una A-DSM (Augmented Design Structure Matrix) viene

costruita per ogni concept ed i relativi dati vengono inseriti nella matrice. Quest'ultima attività è supportata da alcune regole che sono state definite per guidare il processo di popolamento della struttura dati. Il passo successivo è l'esecuzione di un set di procedure atte a valutare i concetti che si stanno sviluppando. Dopo un primo controllo, che è utile ad ottenere un modello funzionale coerente (esso può essere svolto in prima battuta anche sulla rete funzionale appena allestita), vengono calcolati due indicatori di performance relativi allo spreco di materiale ed alle perdite di energia (indicati con α e β rispettivamente) che il dispositivo potrebbe produrre durante il suo funzionamento. Quest'attività è eseguita in base ad alcune ipotesi ed è supportata dalla conoscenza e dall'esperienza che progettisti hanno sulla tipologia di dispositivo in esame. Una terza valutazione viene effettuata su degli indicatori (Environmental Performance Indicator o EPI) che descrivono gli archetipi, cioè considerando esclusivamente le loro caratteristiche ambientali intrinseche. A quest'ultima valutazione segue un confronto a coppie dei concetti, il quale deve essere effettuato mediante il Weighted Product Method (WPM) sugli stessi EPI, al fine di ottenere una prima classifica delle soluzioni e per calcolare, inoltre, un terzo parametro di analisi (chiamato γ). Quest'ultimo, insieme ad α e β precedentemente trovati per tutti i modelli funzionali, costituisce il vettore di parametri di ingresso per l'analisi di ogni soluzione di progetto. In quest'ultima fase, i concetti sono posizionati in uno spazio tridimensionale e sono valutati tra loro nell'intento di selezionare la soluzione concettuale più sostenibile, ovvero quella con i valori minori di α , β e γ , e procedere eventualmente ad un suo miglioramento o a quello di altri concept che sono potenzialmente soddisfacenti dal punto di vista ambientale.

Nelle prossime sezioni, viene presentata una descrizione dettagliata del metodo A-DSM per illustrare come i progettisti sono supportati nel loro lavoro. L'approccio si compone di tre parti principali: a) la matrice A-DSM con le sue proprietà e le regole da utilizzare durante l'inserimento dei dati; b) gli assessment utilizzati per calcolare gli impatti a partire dai dati; c) la fase di confronto tra le soluzioni progettuali, dove viene selezionata la migliore configurazione di prodotto, vengono analizzati dei possibili casi di incertezza e le soluzioni possono essere eventualmente migliorate. In particolare, la sequenza di passi può essere strutturata come segue:

- 1) Disegno delle reti funzionali per supportare la generazione dei concetti;
- 2) Determinazione degli archetipi e formalizzazione dell'architettura del prodotto per ogni soluzione;
- 3) Reperimento dei dati per la determinazione di sette indicatori di performance ambientale (EPI) relativi al ciclo di vita degli archetipi ed allestimento dei collegamenti funzionali dei concept;

- 4) Costruzione di una A-DSM ed inserimento dei relativi dati per ogni concept di prodotto;
- 5) Verifica della coerenza funzionale dei link di ogni A-DSM e, se necessario, revisione del di ogni concept di prodotto;
- 6) Valutazione del materiale di scarto e delle perdite di energia (parametri " α " e " β ") e calcolo del vettore degli EPI complessivi per ogni soluzione concettuale;
- 7) Sulla base dei sette EPI complessivi, che devono essere tutti minimizzati, si applica il WPM per avere una classifica dei concept tenendo in considerazione esclusivamente gli indicatori. Questa fase comprende l'organizzazione dei confronti, l'applicazione del WPM, l'interpretazione dei risultati e l'analisi delle eventuali eccezioni del modello;
- 8) Calcolo di un valore adimensionale in base ai risultati del WPM (parametro " γ ") da aggiungere ai parametri relativi alle perdite di materiale ed energia, per effettuare un'analisi globale delle soluzioni di progetto;
- 9) Ricerca dei concept migliori tramite un approccio Paretiano (i parametri in input sono α , β e γ calcolati ai passi 6 e 8 e successivamente normalizzati);
- 10) Se è richiesta una soluzione unica (nel caso di più concept efficienti), trovarla tramite una funzione obiettivo aggregata (AOF) e, se necessario, migliorare una o più soluzioni progettuali di interesse.

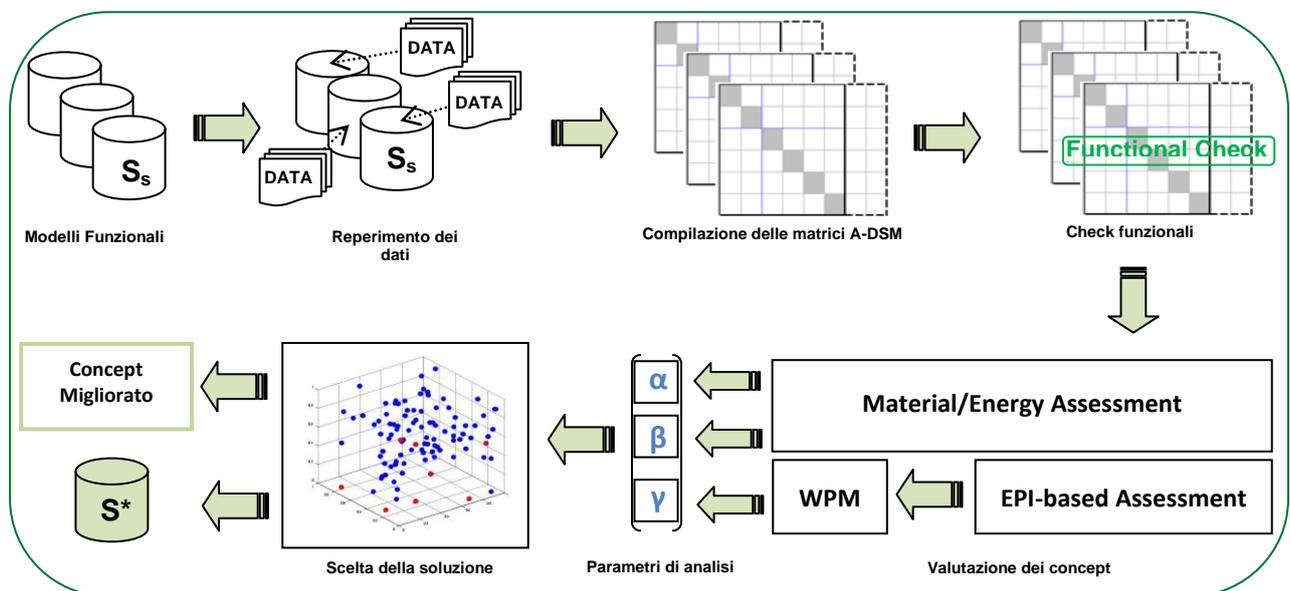


Fig. 4.1 Workflow della metodologia integrata basata sulla A-DSM

4.2.1 Struttura di una A-DSM

L'Augmented-DSM (A-DSM) è una matrice di progetto che presenta delle peculiarità distintive rispetto ad una DSM classica, sia dal punto di vista del layout sia per le particolari caratteristiche

che possiede come struttura dati. Essa è caratterizzata da due sezioni principali: la prima è una matrice di dimensioni $N \times N$, dove sono gestiti gli archetipi delle soluzioni di progetto, mentre la seconda è costituita da due colonne adiacenti dove sono raccolti i dati relativi ai flussi di materiale ed energia scambiati tra il concept di prodotto che si sta progettando e l'ambiente esterno. Nella matrice quadrata, un gruppo di sette indicatori di prestazione ambientale (gli EPI) viene memorizzato in ogni elemento diagonale [Zhang e Li, 2010] [Rocco et al., 2011]. Gli EPI sono legati alle ipotesi che i progettisti fanno sul ciclo di vita dello specifico archetipo e, in particolare, sono legati alle cinque fasi tipiche del "product lifecycle". Queste fasi, in genere, vengono descritte come segue:

- Materie Prime. In letteratura si considerano l'estrazione ed i primi trattamenti delle sostanze che andranno a costituire il prodotto. Nell'ottica di un uso ponderato delle risorse, la quantità di materiale utilizzata in un componente e le sue caratteristiche sono elementi da tenere in forte considerazione;
- Produzione. Vengono considerate le trasformazioni delle materie prime negli impianti di lavorazione, benché gli impatti siano causati anche dal funzionamento dell'impianto stesso e dai processi di servizio addebitabili al prodotto;
- Trasporto. In tale fase si considera la distribuzione del prodotto lungo la catena logistica fino al cliente finale, ma anche gli spostamenti accessori (come quelli per il servicing) e la logistica in entrata per semilavorati e materie prime;
- Uso. Questa fase copre il periodo di funzionamento, ma anche la manutenzione, il ripristino ed il servicing;
- Smaltimento. Si considerano i processi che rendono il prodotto riusabile e riciclabile (compreso lo smontaggio), oltre ovviamente ai costi ambientali derivanti dall'uso di discariche e dall'eventuale incenerimento dei rifiuti e degli scarti.

Gli EPI sono stati selezionati non come indicatori prioritari in assoluto, ma come un buon compromesso tra: rilevanza nella letteratura, accettazione nella comunità scientifica, disponibilità dei dati e buona associabilità alle principali fasi del ciclo di vita. Inoltre, gli EPI sono stati scelti come valori quantitativi che, con adeguato supporto, possono essere ottenuti da dati con le seguenti caratteristiche [ISO 14031, 1999]:

- Reperibilità. I dati devono essere reperibili e trasparenti per gli stakeholders del progetto;
- Valutabilità. I dati devono rappresentare aspetti significativi del prodotto;
- Misurabilità. Sono previste procedure univoche per calcolare ogni EPI.

Questi indicatori sono abbastanza comuni in letteratura e negli strumenti di eco-design e, benché

essi siano presenti in metodologie tra loro distinte, sono stati utilizzati congiuntamente nella presente metodologia, al fine di poter valutare le varie soluzioni di progetto in una prospettiva legata al ciclo di vita di un prodotto industriale. I sette indicatori comprendono [De Napoli et al., 2012] [Rocco et al., 2011]:

1. Massa (M). Tale valore indica la quantità di materiale impiegato per la creazione di un determinato componente. In fase di progettazione essa può essere determinata, ad esempio, calcolando il volume del modello CAD per la densità specifica del materiale che verrà utilizzato, esprimendo i valori ottenuti in [kg], [g], ecc.;
2. Presenza di sostanze pericolose (HS). Essa rappresenta la quantità di sostanze tossiche che potrebbero essere presenti in un componente (creato a partire dall'archetipo corrispondente). Generalmente viene espressa in grammi ([g]) e sottomultipli;
3. Potenziale di riscaldamento globale (GWP). Esso indica il potenziale contributo all'effetto serra (GHG) delle sostanze che costituiscono il materiale scelto per la creazione di un componente. Nella pratica, l'unità di misura utilizzata è il [kg CO_{2eq}];
4. Indicatore di impatto in fase di fabbricazione (IM). Esso misura l'impatto prodotto dalla creazione dei componenti che verranno sviluppati a partire dagli archetipi. Inoltre, tiene conto dell'impatto del materiale, in termini di estrazione e sintesi, e del processo primario di lavorazione che è stato ipotizzato. Questo indicatore è espresso in [mPts] (millipoints di Eco-Indicator '99);
5. Indicatore di trasporto (TR). Esso misura la distanza [km] dalle fonti delle materie prime che devono essere lavorate per ottenere il pezzo in fase di sviluppo. Nel caso in cui il componente venga fornito dall'esterno, si indica la distanza dalle fonti di approvvigionamento del pezzo (finito o semilavorato);
6. Indicatore di potenza in fase di utilizzo (PU). Indica la potenza massima che può essere impiegata dall'elemento rappresentato dall'archetipo. Generalmente, si riferisce a generatori e motori (in molti casi è un dato di targa) ed è misurato in [W] e multipli;
7. Non riciclabilità (LR). Tale indicatore è la quantità di materiale che si ipotizza non riciclabile e viene calcolato come una quantità (in [kg], o [g]) o come rapporto (la massa non riciclabile del materiale rispetto alla massa totale dell'archetipo). Si tenga conto che i rapporti non possono essere sommati direttamente e vanno tradotti in valori dimensionali.

Com'è facile osservare, gli indicatori hanno fonti informative diverse, infatti, essi sono quantificati dai progettisti o possono essere ottenuti utilizzando dati relativi a componenti reali simili agli archetipi, ecc. La Tabella 4.1 può essere di supporto all'attività di reperimento dei dati

e per calcolare, successivamente, i valori degli EPI ed usarli durante la valutazione dei concetti. Gli archetipi sono classificati in due tipologie, considerando sia il caso in cui l'archetipo debba essere progettato sia il caso di soluzioni già presenti sul mercato (o su un database di concetti) che potrebbero essere adatte a svolgere una particolare funzione richiesta. Entrambi gli scenari, quindi, sono indicati in tabella per ciascun EPI.

EPI	Tipologia Archetipo	Scenario	Unità	Possibili riferimenti
Massa (M)	Da progettare	Calcolata come volume modello CAD moltiplicato per la densità del materiale impiegato	kg; g	Progettista (o team di sviluppo)
	Componente equivalente	Massa del componente	kg; g	Scheda tecnica (o repository)
Presenza di sostanze pericolose (HS)	Da progettare	I progettisti scelgono i materiali, i possibili cicli di produzione e valutano l'opportunità di non utilizzare sostanze pericolose	kg; g	Controllo di tabelle RoHS [Direttiva 2002/95/EC, 2003]
	Componente equivalente	I progettisti valutano i materiali e i cicli di produzione utilizzati (potrebbero essere state impiegate delle sostanze nocive)	kg; g	Scheda tecnica (o repository)
Potenziale di riscaldamento globale (GWP)	Da progettare	I progettisti selezionano i materiali e valutano le sostanze da impegnare	kg CO _{2eq}	- tool LCA - IPCC 2007
	Componente equivalente	Partendo dalle caratteristiche dei materiali, si risale agli impatti	kg CO _{2eq}	- Database Gabi - tool LCA - IPCC 2007
Indicatore di impatto in fase di produzione (IM)	Da progettare	Sulla base delle quantità di materiale da impiegare e dei processi primari sia calcola l'impatto dalle tabelle di EI '99	mPts	ECO INDICATOR '99 (EI '99) Database [Goedkoop e Spriensma, 2001] GaBi Database
	Componente equivalente	Vengono analizzate le caratteristiche fisiche del componente	mPts	ECO INDICATOR '99 (EI '99); Database Gabi; Scheda materiale
Indicatore di trasporto (TR)	Da progettare	Distanza dalla fonte di approvvigionamento delle materie prime	km	Scheda materiale del fornitore
	Componente equivalente	Distanza dalla fonte di approvvigionamento del componente	km	Scheda materiale del fornitore
Indicatore di potenza in fase di utilizzo (PU)	Da progettare	Potenza Massima stabilita	W	Progettista (o team di sviluppo)
	Componente equivalente	Potenza Massima dichiarata	W	Scheda tecnica (o repository)
Non riciclabilità (LR)	Da progettare	I progettisti stimano quanto materiale potrebbe non essere riciclato	kg; g or %	Progettista (o team di sviluppo) Schede materiali
	Componente equivalente	I progettisti stimano quanto materiale non può essere riciclato	kg; g or %	Scheda tecnica

Tabella 4.1 Possibili riferimenti per gli EPI

Nei termini fuori dalla diagonale della matrice, ogni cella è suddivisa in quattro posizioni, in cui sono memorizzati valori quantitativi relativi ai link di forza, segnale, materiale ed energia che i diversi archetipi si scambiano tra loro nell'intera architettura del modello funzionale.

La seconda sezione principale della A-DSM si compone di due colonne aggiuntive poste sul lato destro, dove devono essere memorizzate le interazioni tra il dispositivo e l'ambiente esterno (anche verso altri sistemi o prodotti). In particolare, abbiamo (figura 4.2):

- la colonna delle "Relazioni Esterne" ($\Omega 1$), dove devono essere inseriti i valori delle relazioni funzionali verso l'ambiente eterno;
- la colonna di "Problemi di Sostenibilità" ($\Omega 2$), in cui devono essere raccolti i valori dei link che rappresentano ingressi e output indesiderati di energia e materiale.

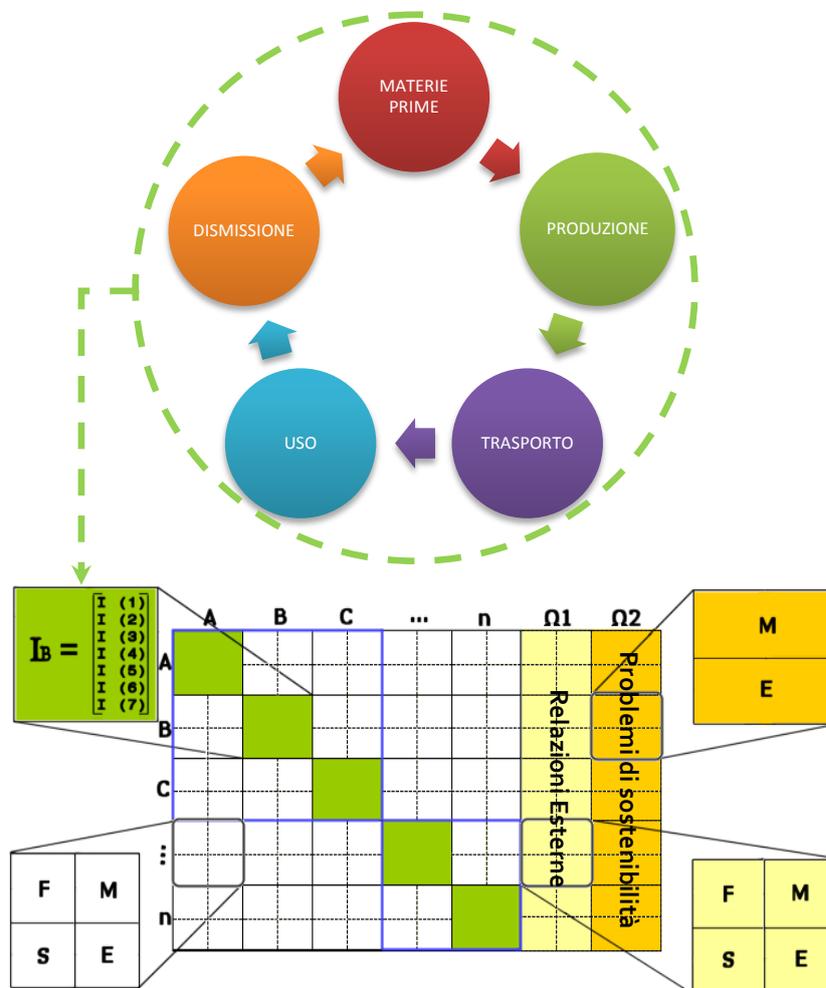


Fig. 4.2 Layout di una A-DSM

La prima colonna è composta da celle divise in quattro posizioni (così come ogni elemento non diagonale presente nella matrice quadrata), mentre la seconda colonna possiede celle formate da due sole posizioni, al fine di contabilizzare esclusivamente quantità di materia ed energia.

Il processo di inserimento dei dati nella matrice è formalizzato attraverso le seguenti regole:

- nella sottocella di forza (F) il valore è booleano e viene inserito 1 se vi è una connessione fisica, 0 o “elemento vuoto” altrimenti (ciò descrive la presenza o l'assenza del link);
- nella sottocella di Segnale (S) il valore da inserire è -1 se un segnale è in entrata, 1 se il segnale è in uscita, 0 o “elemento vuoto” altrimenti;
- nella sottocella di Materiale (M) il valore da inserire è di tipo numerico, rappresenta una quantità (es. [g] o [kg]) ed è positivo se il link è in output, mentre è negativo se il link è in input (0 o “elemento vuoto” se vi è assenza di link);
- nella sottocella di Energia (E) il valore è di tipo numerico, rappresenta una quantità (espressa in [J] e multipli) ed è positivo, se il link è in uscita, mentre è negativo in caso di link in ingresso (0 o “elemento vuoto” se vi è assenza di link).

4.2.2 Procedure di valutazione

Alla fine del processo di allestimento di ogni A-DSM, una o più matrici potrebbero presentare alcuni problemi di completezza e coerenza dei dati. Questi problemi possono essere presenti già nei modelli funzionali (per esempio nel caso di connessioni mancanti), ma possono anche sorgere durante la fase di immissione dei dati in ogni singola matrice, poiché ai vari link sono associati dei valori numerici. In particolare, possono verificarsi i seguenti problemi:

- i dati risultano mancanti o errati, quindi, la matrice presenta problemi di incompletezza o inconsistenza;
- vi sono casi di incertezza sulla combinazione di link che concorrono su un elemento funzionale, generando incoerenza nel modello.

Nel primo caso si potrebbe incorrere in errori che portano ad avere degli impatti complessivi non calcolati correttamente, mentre nel secondo caso si potrebbero avere situazioni in cui un legame di forza risulta mancante tra due o più archetipi fra cui sussiste, ad esempio, un flusso di materiale o di energia (o entrambi). Ciò dovrebbe suggerire un “warning” ai progettisti che, in questo modo, sarebbero indotti a rivedere il loro lavoro [Rizzuti et al., 2006]. In particolare, l'analisi delle connessioni di forza, segnale, materiale ed energia in ingresso e in uscita da ogni archetipo può aiutare il team di lavoro ad avere matrici A-DSM coerenti da punto di vista funzionale e, inoltre, permette di interrogarsi sulla potenziale natura degli archetipi. L'esecuzione dei controlli funzionali è formalizzata dalle equazioni (1.1 e 1.2):

$$NB(i, 3) = \sum_{j=1}^{n+2} A(i, j, 3) \quad (1.1)$$

$$NB(i, 4) = \sum_{j=1}^{n+2} A(i, j, 4) \quad (1.2)$$

dove $A(i,j,3)$ e $A(i,j,4)$ sono le sottocelle 3 e 4 dell'elemento $A(i,j)$; $NB(i,k)$ (con $k=3,4$) è il valore di divergenza del nodo posto all' i -esima riga, cioè relativa all' i -esimo archetipo, calcolato sul terzo ed sul quarto link rispettivamente (NB sta per "Node Balance").

Considerando $NB(i,3)$ i progettisti possono dare la seguente interpretazione ai vari archetipi:

- $NB(i,3) > 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo sorgente;
- $NB(i,3) = 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo di transito;
- $NB(i,3) < 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo contenitore (o di deposito).

Considerando $NB(i,4)$, si ha che:

- $NB(i,4) > 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo "generatore" o "trasformatore" di energia;
- $NB(i,4) = 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo di transito (o neutro);
- $NB(i,4) < 0 \rightarrow$ l'elemento funzionale è un nodo "dissipatore" (o passivo).

Inoltre, se i valori relativi ai link di materiale $A(i,j,3)$ e di energia $A(i,j,4)$ sono inseriti, la presenza di almeno un link di forza deve essere verificata attraverso un controllo logico, che, teoricamente, potrebbe essere formalizzato come segue:

- se $A(i,j,3) = \text{"valore"}$ e $A(i,j,1) = 1 \rightarrow$ "ok", else \rightarrow "controlla l'archetipo funzionale";
- se $A(i,j,4) = \text{"valore"}$ e $A(i,j,1) = 1 \rightarrow$ "ok", else \rightarrow "controlla l'archetipo funzionale".

Validate le varie A-DSM, è necessario valutare i flussi di materiale e di energia che (in molti casi) sono presenti in ogni concept. Il gruppo di lavoro, infatti, è tenuto a quantificare i valori relativi a questi flussi ed a calcolare due indicatori chiamati " α " e " β ". La procedura prevede di analizzare la colonna $\Omega 2$ ed effettuare la somma dei termini relativi ai link di materiale ed energia ($k = 1, 2$) utilizzando le equazioni seguenti (2.1 - 2.2):

$$\alpha_s = \sum_{i=1}^n A(i, n+2, 1) \quad (2.1)$$

$$\beta_s = \sum_{i=1}^n A(i, n+2, 2) \quad (2.2)$$

dove il termine $A(i,n+2,k)$ è la sottocella dell'elemento $A(i,n+2)$; n è il numero di righe (e quindi degli archetipi) ed α_s e β_s sono, rispettivamente, i valori del materiale di scarto e delle perdite di energia totali per ogni soluzione (concept) S_s (con $s = 1, \dots, m$).

4.2.3 Valutazione degli archetipi

Al fine di valutare ogni soluzione di progetto nelle sue componenti, gli archetipi devono essere analizzati in base alle loro caratteristiche e proprietà. In una prima fase i valori degli EPI vengono calcolati per ciascun singolo archetipo. Una volta inserito ogni set di indicatori nel

corrispondente termine diagonale della A-DSM, è possibile manipolare la struttura matriciale per affinare l'architettura del prodotto. A questo punto, è possibile ottenere l'insieme degli EPI complessivi considerando l'intera soluzione progettuale attraverso la formulazione (3):

$$d_h = \sum_{i=1}^n I_{ih} \quad (3)$$

dove n rappresenta il numero di archetipi della generica soluzione S_s e $I_i = [I_{i1}, \dots, I_{ih}, \dots, I_{i7}]$ (con $h = 1, \dots, 7$) è il vettore in cui sono memorizzati i sette EPI relativi ad ogni archetipo i della soluzione S_s (ovvero i termini indicati con I_{ih}).

L'analisi tramite indicatori ambientali può essere condotta in modo più dettagliato sui sottosistemi, se la A-DSM viene sottoposta ad un'attività di "clustering" per esigenze di progetto, sfruttando, in questo modo, la propensione della matrice ad essere manipolata. Tali attività si possono verificare durante un processo di progettazione e possono permettere al designer di focalizzare i suoi interventi su degli assemblati che, ad esempio, presentano valori degli EPI non soddisfacenti e che, quindi, richiedono particolare attenzione. La A-DSM, inoltre, può essere clusterizzata subito dopo l'inserimento dei dati e l'esecuzione dei check funzionali, oppure può essere partizionata a partire da una rete funzionale già clusterizzata, semplificando notevolmente le attività di manipolazione degli elementi del sistema.

Dalle considerazioni precedenti, si può dedurre che un macro-blocco funzionale può essere tradotto da un cluster rappresentato da una sottomatrice A^t . Essa avrà r componenti (con $r < n$) e, quindi, r vettori di EPI da inserire nei rispettivi termini diagonali. Quindi, il valore dell'indicatore d_h^t , associato al cluster A^t , può essere calcolato mediante l'equazione (3.1):

$$d_h^t = \sum_{i=1}^r I_{ih}^t \quad (3.1)$$

dove I_{ih}^t è l' h -esimo EPI relativo ad ogni singolo archetipo appartenente al cluster A^t , r sono i componenti rappresentati in A^t , d_h^t rappresenta l' h -esimo EPI che tiene conto di tutti gli archetipi di A^t . L'indicatore aggregato d_h calcolato nell'equazione (3), in questo caso, è determinato dalla relazione (3.2):

$$d_h = \sum_{t=1}^p d_h^t \quad (3.2)$$

dove t e p sono rispettivamente il contatore ed il numero esatto di cluster di A .

Il progettista (o il team), a questo punto, osserva che ogni soluzione S_s è caratterizzata da un vettore di EPI (complessivo) chiamato D_s , dove $D_s = [d_1, \dots, d_h, \dots, d_7]$; ogni termine d_h contenuto in D_s è il valore cumulato che ogni singolo EPI "h" assume nell'intera soluzione S_s .

Quando gli impatti complessivi sono stati calcolati per tutti i concetti, il team deve effettuare un primo confronto tra le soluzioni progettuali che sono state sviluppate, per cui diventa necessario l'utilizzo di un metodo appropriato per svolgere tale attività.

I metodi MCDM forniscono un supporto utile a un processo di selezione tra diverse alternative sulla base di criteri multipli. Nel nostro caso, un progettista (o un team) deve selezionare il dispositivo con il minimo impatto ambientale e questa scelta può essere difficile nel caso in cui essa venga effettuata su criteri che hanno unità di misura differenti. Come discusso nel precedente capitolo, il problema può essere affrontato con un approccio multi-criterio, poiché soddisfa i seguenti requisiti (si veda il capitolo 3): il progettista deve decidere tra più alternative; le alternative sono caratterizzate da diversi criteri di scelta (ovvero gli indicatori di performance ambientale); i criteri hanno unità di misura differenti (non confrontabili) e diverso grado di importanza. Se il numero delle alternative (cioè dei concept) è m , il processo di comparazione prevede un numero di coppie da confrontare pari a C :

$$C = m * (m-1)/2 \quad (4)$$

La formulazione (4) fornisce il numero esatto di coppie che deve essere messo a confronto. Questa constatazione può essere facilmente verificata tramite una rappresentazione delle m alternative in un grafo G , dove C è proprio il numero di archi che rende G completo (figura 4.3).

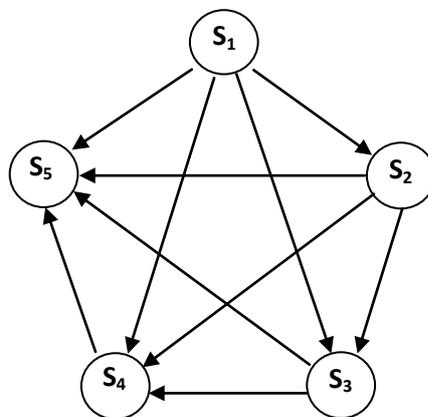


Fig. 4.3 Grafo delle alternative nel caso di cinque soluzioni

Questa formula è utile soprattutto quando il team deve analizzare molti concetti, poiché permette ai progettisti di generare agevolmente la sequenza dei confronti senza alcuno sforzo (costruzione di tutti i collegamenti possibili di G), ad esempio per $m = 3$ e $m = 4$ si ha che $C = 3$ (1-2, 1-3, 2-3) e $C = 6$ (1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4) rispettivamente.

Poiché questo primo assessment si basa su sette indicatori, il Weighted Product Method (WPM) sembra essere utile in questa fase. Esso, infatti, offre vantaggi in termini di basso sforzo

computazionale e risulta adatto ad ottenere un confronto ed una classifica delle alternative. Inoltre, il WPM è stato scelto per la sua intrinseca semplicità di utilizzo, per le operazioni elementari coinvolte e per la sua facile interpretazione, anche da parte di persone non necessariamente esperte di metodi matematici complessi. Nel contempo, come inconveniente, il WPM presenta una certa rigidità, perché ammette che tutti i criteri di selezione devono essere scelti in stretta correlazione con la soluzione che deve essere trovata e devono seguire la stessa legge. Nella presente metodologia, infatti, tutti gli indicatori devono essere minimizzati (i criteri sono di tipo costo), in quanto incidono sulla sostenibilità di ogni soluzione.

Le soluzioni progettuali sono confrontate a coppie ed ognuna di esse viene valutata mediante il seguente prodotto di rapporti:

$$P(S_k/S_l) = \prod_{h=1}^7 (d_{kh}/d_{lh})^{w_h} \quad (5)$$

dove w_h è il peso associato al h -esimo indicatore (w_h è elemento del vettore dei pesi w) ed ogni singolo termine d_{sh} rappresenta il valore complessivo dell' h -esimo EPI della soluzione S_s .

Nel modello matematico (5), ciascun rapporto è elevato a potenza in base al peso (w_h) che il progettista ha assegnato all'indicatore corrispondente. Generalmente, il risultato può essere uguale, maggiore o minore di 1, ma, relativamente al nostro problema, è stato adottato un approccio "lower is better", quindi, un risultato " $P(S_k / S_l) < 1$ " rende l'alternativa S_k preferibile rispetto ad un'altra S_l . Questo risultato giustifica l'orientamento degli archi nel grafo G (relazione (4)), poiché è sufficiente eseguire il confronto tra due alternative in un unico verso. Si ricorda, inoltre, che ogni indicatore, come accennato in precedenza, deve essere minimizzato, in quanto rappresenta direttamente (es. il GWP) o indirettamente (es. km di per il trasporto) un potenziale impatto ambientale del concept.

Una volta calcolati i risultati del WPM, le soluzioni sono classificate sulla base delle vittorie ottenute in ciascun confronto. Ciò è necessario per il calcolo di un ulteriore parametro, detto γ , che sarà utile per un'analisi più approfondita dell'architettura di prodotto. Esso è ottenuto a partire dai risultati del modello WPM tramite la formulazione (6) [De Napoli et al., 2012] e condensa l'impatto complessivo di una soluzione in un unico valore scalare:

$$\gamma_s = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^m P(S_j/S_i), \quad \forall s=1, \dots, m \quad (6)$$

4.2.4 Eccezioni del metodo WPM

Alcune eccezioni possono verificarsi durante il confronto di ciascuna coppia di concetti a causa

della struttura del modello matematico. Anche se il WPM gestisce il confronto tra due alternative di progetto come un problema adimensionale, la produttoria dei rapporti genera delle incoerenze nel momento in cui vengono elaborati dei valori (relativi a un indicatore) uguali a zero. Tuttavia, per evitare questi problemi, l'indicatore con valore nullo non viene incluso nel calcolo per entrambe le alternative, per cui il metodo sarà lanciato su quelli restanti. La casistica che potrebbe verificarsi è la seguente [De Napoli et al., 2012]:

- a) una soluzione S_k possiede uno o più $d_{kh} = 0$, mentre, in un'altra alternativa S_l , tutti i d_{lh} sono diversi da zero ed il confronto è vinto dal S_k ;
- b) una soluzione S_k possiede uno o più $d_{kh} = 0$, mentre, in un'altra alternativa S_l , tutti i d_{lh} sono diversi da zero ed il confronto è vinto dal S_l ;
- c) entrambe le alternative S_k ed S_l possiedono uno o più indicatori nulli, ma tali valori sono relativi a indicatori diversi.

Nel caso a), è possibile affermare che S_k è preferibile ad S_l , mentre nei casi b) e c), i progettisti devono scegliere la migliore alternativa sulla base di un numero ridotto di EPI e, successivamente, effettuare (a parte) un'ulteriore valutazione sugli stessi concept tenendo conto di eventuali valori non nulli degli indicatori non inclusi nel calcolo. Diversamente dai casi precedenti, se due o più soluzioni progettuali presentano lo stesso elemento uguale a zero (cioè riferito allo stesso indicatore), basterà semplicemente non considerare tale rapporto nel WPM, che, in definitiva, verrà eseguito sui restanti EPI.

4.3 Analisi e scelta dei concept

Nella fase finale del processo di valutazione dei concetti si tiene conto sia dei risultati dell'assessment sulla base dei sette EPI (tramite WPM), sia degli impatti che potrebbero generarsi durante l'uso di un dispositivo (analizzando come saranno espletate le sue funzionalità). A questo punto, ogni soluzione S_s è caratterizzata da una tripla $(\alpha_s, \beta_s, \gamma_s)$, per cui diventa necessario supportare i progettisti nella ricerca della migliore architettura di prodotto, cioè quella che minimizza tutti e tre i parametri e che, in sostanza, domina tutte le altre. Qualora una soluzione unica non esista, possono essere determinate più soluzioni "soddisfacenti", che costituiranno la cosiddetta "frontiera di Pareto" per il problema.

E' necessario osservare che i parametri α , β e γ di ogni soluzione sono diversi tra loro in termini di scala, unità di misura ed escursione dei valori che essi assumono, per cui vanno preventivamente sottoposti ad una normalizzazione (per esempio una Min-Max Normalization) [Karthikeyani Visalakshi e Thangavel, 2009], in modo tale che i progettisti possano operare in

uno spazio le cui coordinate siano comprese in un intervallo $[0,1]$ e, soprattutto, su parametri resi tutti adimensionali. I parametri normalizzati sono ottenuti tramite le formulazioni (7.1 - 7.3):

$$\alpha'_s = (\alpha_s - \alpha_{min}) / (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \quad (7.1)$$

$$\beta'_s = (\beta_s - \beta_{min}) / (\beta_{max} - \beta_{min}) \quad (7.2)$$

$$\gamma'_s = (\gamma_s - \gamma_{min}) / (\gamma_{max} - \gamma_{min}) \quad (7.3)$$

Questi tre parametri formano il vettore di input per l'analisi dei concept secondo un approccio di tipo paretiano. Tale strumento concettuale presenta un ambiente di analisi per le soluzioni di progetto ed è composto dai seguenti elementi (figura 4.4):

- Lo spazio di analisi, che è lo spazio tridimensionale in cui le soluzioni devono essere comparate, analizzate ed eventualmente modificate;
- Le soluzioni di progetto, che sono posizionate nello spazio di analisi in base alle rispettive coordinate α' , β' e γ' .

Poichè gli impatti ambientali di una soluzione vanno minimizzati, saranno preferite le soluzioni più vicine all'origine e tra queste andrà scelta quella che ha il valore più basso di tutti e tre i parametri α' , β' e γ' .

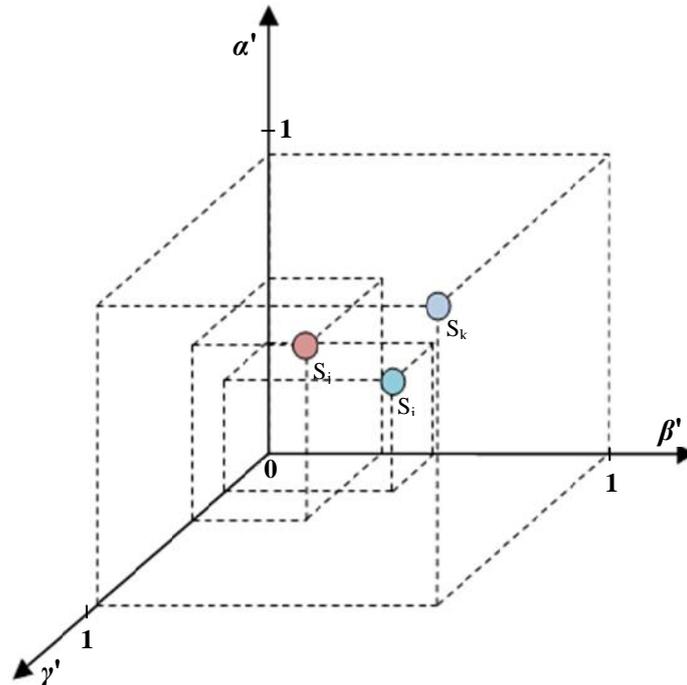


Fig. 4.4 Esempio di spazio di analisi normalizzato

Può accadere, che un'unica soluzione di minimo impatto non esista in assoluto ed i progettisti selezionino un sottoinsieme di concept più soddisfacenti degli altri. Essi, secondo un approccio di tipo paretiano, costituiranno la frontiera delle soluzioni efficienti. Tale sottoinsieme è un

estensione del concetto di frontiera di Pareto nel caso tridimensionale, poichè individua soluzioni progettuali non dominate e che, sebbene siano diverse, avrebbero, almeno in teoria, la stessa efficienza. Secondo la logica paretiana, infatti, le soluzioni di progetto appartenenti alla frontiera (che in questo caso si configurerebbe come una curva tridimensionale) risultano equivalenti tra loro, poichè i parametri α' , β' e γ' hanno la stessa importanza.

I risultati ottenuti in modo visuale possono ulteriormente essere elaborati, attraverso una funzione obiettivo aggregata (AOF). Essa può essere costruita per ottenere una soluzione unica che è il miglior compromesso, considerando i parametri α' , β' e γ' in un'unica funzione di utilità. L'AOF proposta di seguito presenta coefficienti di costo unitari (benchè essi possano comunque assumere differenti valori in una logica generale), mentre le variabili sono soggette a vincoli di non negatività, poichè sia gli impatti calcolati sugli archetipi che le perdite di materiale ed energia, per loro natura, sono valori maggiori o uguali a zero. La funzione obiettivo ed il problema possono essere formalizzati come segue:

$$P = \left| \begin{array}{l} \mathbf{Min} \ Z(\alpha', \beta', \gamma') = \alpha' + \beta' + \gamma' \\ \mathbf{Subject\ to:} \\ \alpha', \beta', \gamma' \geq 0 \end{array} \right|$$

Il progettista deve inserire i valori di α' , β' e γ' nella funzione $Z(\alpha', \beta', \gamma')$ e scegliere il concept di prodotto che offre il minimo valore di funzione obiettivo. Si noti che, in questo caso, la somma dei parametri è possibile, in quanto α' , β' e γ' sono adimensionali, a differenza dei valori non ancora normalizzati di α e β che inizialmente possedevano una propria unità di misura.

Se il team volesse procedere ad un miglioramento di qualche soluzione di particolare interesse, ciò è possibile operando sui parametri α' , β' e γ' ottenuti dagli assessment. Il team di progetto, infatti, può decidere di ridurre gli impatti di alcune soluzioni e, di conseguenza, modificare le caratteristiche intrinseche di uno o più concept di prodotto e/o il suo modo di funzionare.

Nel primo caso, la riduzione degli impatti è legata al parametro γ' e, quindi, agli EPI di ciascun archetipo, per cui l'attività di progetto si traduce nella sostituzione di uno o più archetipi con altri che possiedono caratteristiche ambientali migliori. Ciò può voler dire modificare le ipotesi precedentemente fatte sugli archetipi o rimpiazzare un elemento con un altro dalla differente geometria (che ovviamente deve restare compatibile col resto dell'architettura). Questa modifica può avere come effetto una probabile variazione nei risultati del WPM, e quindi, del parametro γ' , nonché la possibilità di avere la soluzione in questione in una posizione differente rispetto alla precedente nello spazio di analisi. La regolazione di α' e β' risulta più legata all'interazione tra le

parti ed al modo in cui vengono gestiti i flussi di materiale, segnale ed energia quando il prodotto è in uso. In molti casi, l'efficienza è legata al set di archetipi che caratterizzano la soluzione (in tal caso, è chiara la reciproca dipendenza tra α' , β' e γ'), ma non è da escludersi che i flussi possano essere modificati utilizzando gli stessi archetipi costitutivi di partenza.

4.4 Caso di studio: applicazione ad un elettrodomestico

Il caso di studio mostra un'applicazione del metodo A-DSM durante lo sviluppo di uno spremiagrumi. L'analisi è eseguita su cinque concept di prodotto ottenuti a partire da modelli funzionali elaborati fino agli archetipi. Il workflow utilizzato nel caso di studio segue la metodologia descritta nella sezioni (4.2 - 4.3). Le unità di misura per gli EPI utilizzate in questo caso di studio specifico sono riportati di seguito:

- [g] (grammi) per la massa (M);
- [g] (grammi) per le sostanze pericolose (HS);
- [kg CO_{2eq}] (kilogrammi di CO₂ equivalente per il Global Warming Potential (GWP));
- [mPts] (millipoints) per l'impatto nella fase di produzione (IM);
- [W] (Watt) per la potenza dichiarata nella fase d'uso (PU);
- [km] (kilometri) per l'indicatore di trasporto (TR);
- [g] (grammi) per la quantità di materiale non riciclabile (LR).

I flussi di materiale ed energia sono espressi in [g] e [kJ], rispettivamente ([V] è utilizzato per rappresentare i flussi di tensione elettrica).

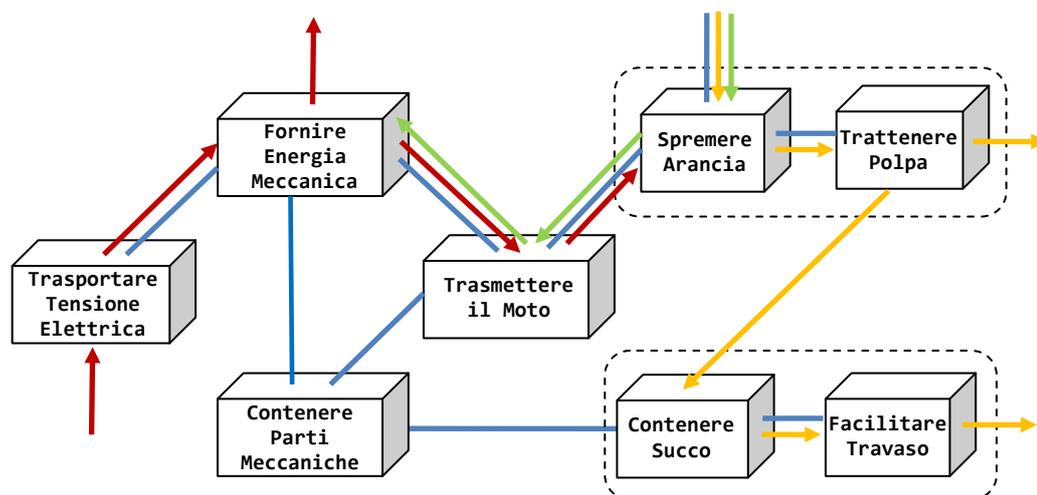


Figure 4.5 Modello funzionale del concept S₁

In figura 4.5 è possibile visualizzare il primo modello funzionale. Lo schema viene riportato già ad un certo grado di dettaglio, poiché il modello è stato creato a partire da un unico blocco

“verbo + nome” ed è stato suddiviso in più sotto-funzioni ad ogni fase di sviluppo. Le sotto-funzioni sono formalizzate in una rete in cui sono rappresentati anche collegamenti funzionali (forza, segnale, materiale, energia) che legano i blocchi. In generale, le funzioni possono essere raggruppate insieme per formare degli assemblati o al fine di essere integrati in un unico archetipo. Nel primo concetto, ad esempio, i blocchi funzionali “Spremere Arancia” e “Trattenere Polpa” sono fusi in un singolo archetipo funzionale (potrebbe essere un elemento per la spremitura forato o con un filtro integrato). Ad ogni modo, al termine della fase di progettazione concettuale, il primo modello di prodotto risulta schematizzato in figura 4.6.

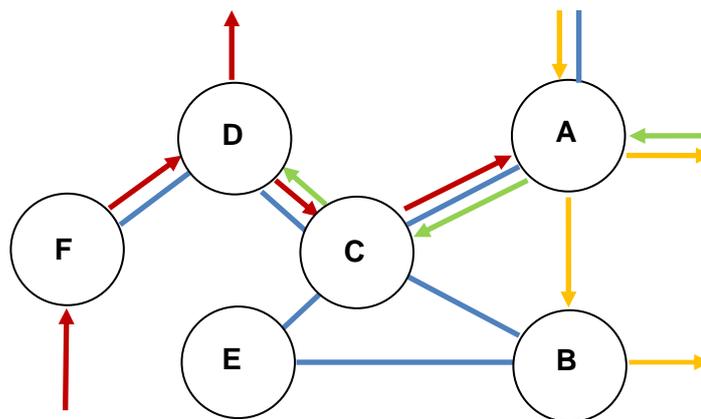


Fig. 4.6 Archetipi del concept S_1

Gli archetipi indicati dalla lettera A alla F sono collegati tra loro da link di forza (blu), segnale (verde), materiale (giallo) ed energia (rosso). Si può notare, inoltre, che i blocchi funzionali “Contenere Succo” e “Facilitare Travaso” sono stati fusi nell’archetipo B, mentre per la spremitura e per permettere di filtrare il succo si è scelto l’archetipo A. A questo punto, a partire dal grafo funzionale, può essere disegnato uno sketch (o un modello concettuale 3D tramite software) del modello, che costituisce un abbozzo di soluzione costruttiva. Lo sketch del primo concept in figura 4.7 è provvisto di una bollatura aggiuntiva per una migliore leggibilità della soluzione e per rendere nota la corrispondenza tra archetipi e schizzi. Per ogni modello funzionale viene fornita una tabella che fa da supporto alla soluzione concettuale. Essa descrive le diverse ipotesi progettuali degli archetipi di ciascun modello, in modo tale che, secondo tali decisioni, i progettisti possano essere orientati nel calcolo degli impatti e, quindi, nella compilazione della A-DSM del modello funzionale che si intende valutare (tabella 4.2).

Nel concetto S_1 , i sette EPI sono calcolati sulla base dei suggerimenti forniti in tabella 4.1 e le ipotesi espresse nella tabella 4.2 per la soluzione specifica. Se si considera l’archetipo A (elemento per la spremitura + filtro integrato), ad esempio, la massa (M) è determinata dal

volume nel modello CAD per la densità del materiale scelto (ABS). I due dati relativi a massa e materiale permettono al progettista di calcolare anche il GWP (potenziale di riscaldamento globale) dell'ABS e l'impatto in [mPts] su Eco Indicator '99 (entrambi gli indicatori sono espressi per 1 kg di sostanza e vanno scalati sulla massa che, teoricamente, il componente possiederebbe). Sulla base della sua esperienza e sui dati che riesce a reperire, il designer può formulare le dovute ipotesi sugli archetipi di ogni soluzione. Per l'archetipo A della soluzione S₁, ad esempio, si è ipotizzato il seguente scenario: l'energia dissipata dall'archetipo si considera trascurabile; non sono previste sostanze nocive (HS) significative; il pezzo sarà prodotto internamente all'azienda e la fonte delle materie prime è situata, sempre per ipotesi, nei pressi dell'impianto di produzione, per cui i km di trasporto per l'approvvigionamento non sono rilevanti (TR = 0); l'archetipo si ritiene riciclabile al 90% (LR = 10%).

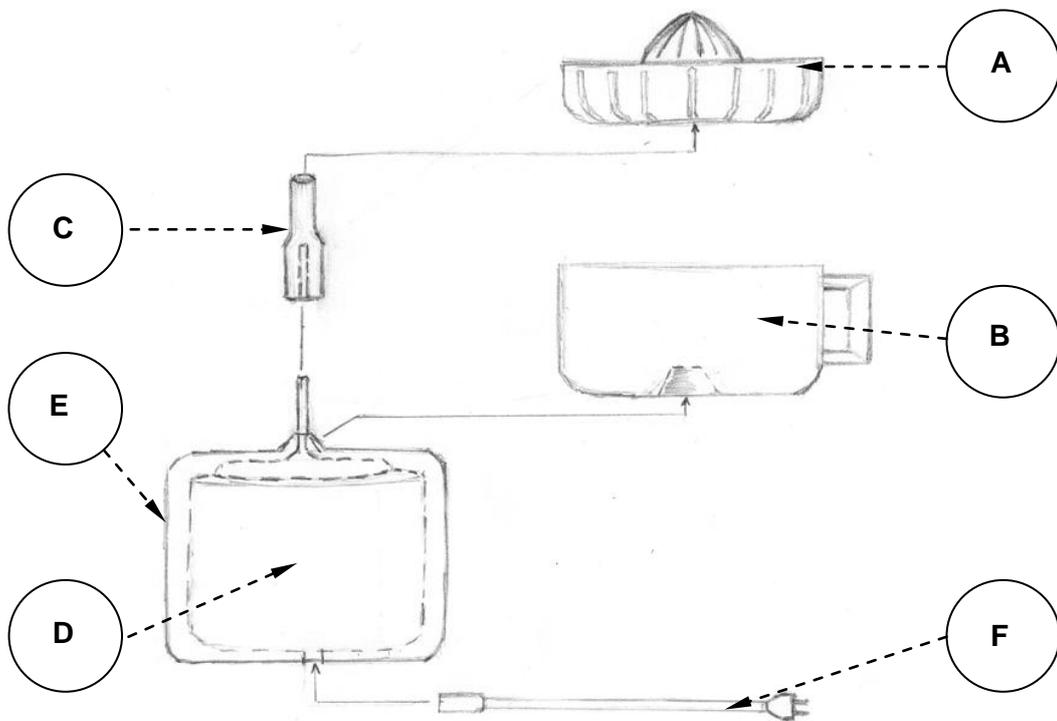


Figura 4.7 Sketch del concept S₁

	Funzione	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S ₁	Spremere Arancia	A (Puntale + Filtro)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trattenere Polpa				
	Contenere Succo	B (Contenitore + Manico)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Facilitare Travaso				
	Trasmettere Moto	C (Albero di trasmissione sagomato)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Fornire energia	D (Motore Elettrico)	1	Acciaio + Rame	Estrusione;

	Meccanica				Termoformatura
	Contenere Parti Meccaniche	E (Housing)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trasportare Tensione Elettrica	F (Cavo di Alimentazione)	1	Gomma + Rame	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.2 Analisi degli archetipi per il concept S₁

Si consideri che il dispositivo debba espletare la funzione di spremitura ed abbia del materiale in ingresso, ad esempio un'arancia la cui massa è pari (per ipotesi) a circa 130 g. Il progettista comincia ad effettuare le prime ipotesi sugli archetipi che ha definito. Per questo primo concept, ad esempio, la scelta del generatore può ricadere su un motore elettrico da 50 W che, presumibilmente avrà in ingresso una tensione da rete elettrica di 220V (tipica dell'uso domestico). La geometria e le misure di alcuni archetipi insieme alla scelta del materiale da utilizzare permettono il calcolo (approssimato) degli EPI degli elementi, consentendo il popolamento degli elementi diagonali della prima A-DSM. Per quanto riguarda i link funzionali, invece, il progettista ipotizza l'andamento dei flussi di materiale ed energia nel dispositivo, quantificando le perdite che si potrebbero avere e posizionando le stesse nelle celle corrispondenti della colonna Ω2. Il tempo di funzionamento per tutti i concept è fissato a 30 secondi, rendendo possibile quantificare le perdite di energia espresse in [kJ]. Il risultato del processo di allestimento è la seguente matrice A-DSM completa dei dati (figura 4.8), la quale traduce in termini matriciali l'architettura di prodotto per il primo modello funzionale S₁.

	A		B		C		D		E		F		Ω1		Ω2		
A	M = 40 HS = 0 GWP = 0,126 IM = 16,64 EU = 0 TR = 0 LR = 4		1	68 g	1				1					1	-130 g		62 g
					1	-1,35 kJ								-1			
B	1	-68 g	M = 118,3 HS = 0 GWP = 0,37 IM = 49,8 EU = 0 TR = 0 LR = 11,8		1												
C	1		1		M = 20 HS = 0 GWP = 0,05 IM = 6 EU = 0 TR = 0 LR = 2		1		1								
	-1	1,35 kJ					1										
D					1		M = 800 HS = 0 GWP = 1,4 IM = 138,84 EU = 50 TR = 100 LR = 50		1								
					-1	1,5 kJ							-220 V			0,15 kJ	
E	1				1		1		M = 160 HS = 0 OGWP = .5 IM = 67,36 EU = 0 TR = 0 LR = 16								

F						1			1	0	M = 56 HS = 0 GWP = 0.11 IM = 7.8 EU = 0 TR = 30 LR = 23			
						220 V			0					-220 V

Fig. 4.8 A-DSM per il concept S₁

Si noti come nelle sotto-celle relative ai link di “energia” possono essere inseriti, talvolta, anche quantità che si riferiscono a potenziali elettrici espressi in [V], che spesso sono in ingresso a molte tipologie di dispositivi e vengono trasformati in energia meccanica (ma anche in calore o in lavoro) da alcune classi di componenti (es. i motori elettrici).

Come discusso per il concept S₁, deve essere creata una matrice A-DSM per ogni soluzione. Nel presente caso di studio sono state create le restanti quattro matrici corrispondenti ai rispettivi concept di prodotto. Di seguito è riportato lo sviluppo del concept S₂ (figure 4.9-4.12) e la tabella 4.3 che ne descrive le ipotesi di progetto.

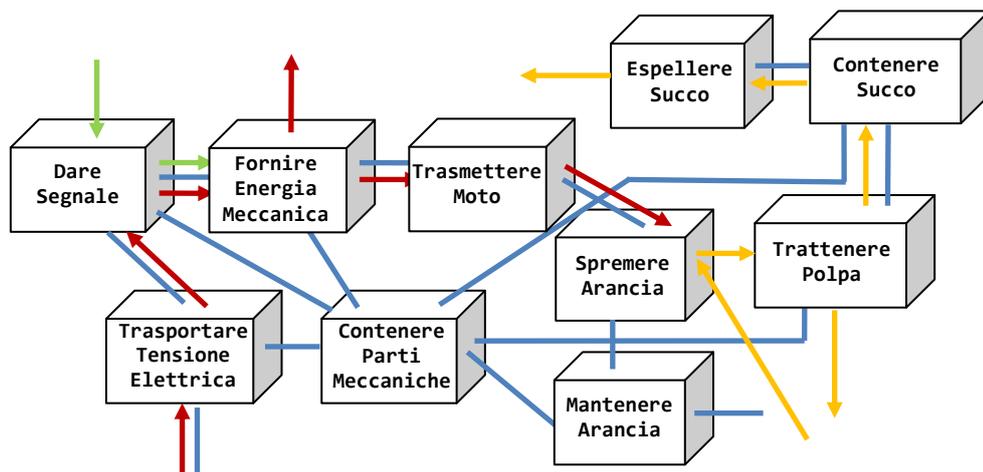


Fig. 4.9 Modello Funzionale del concept S₂

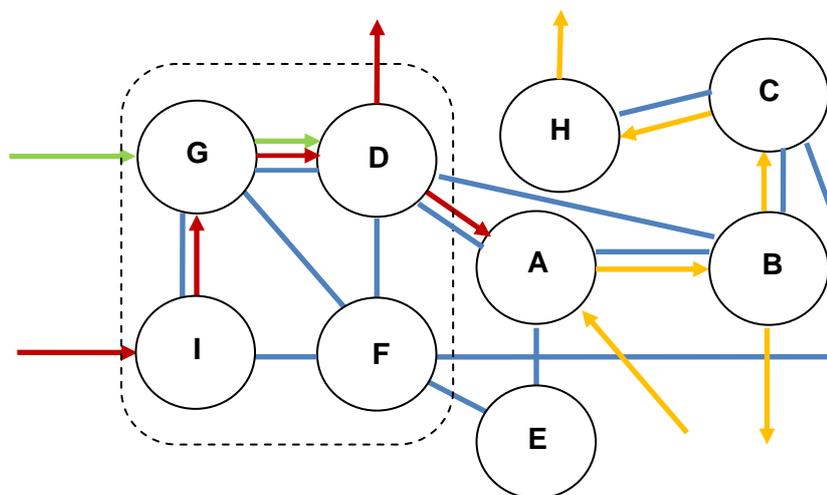


Fig. 4.10 Grafo funzionale con archetipi del concept S₂

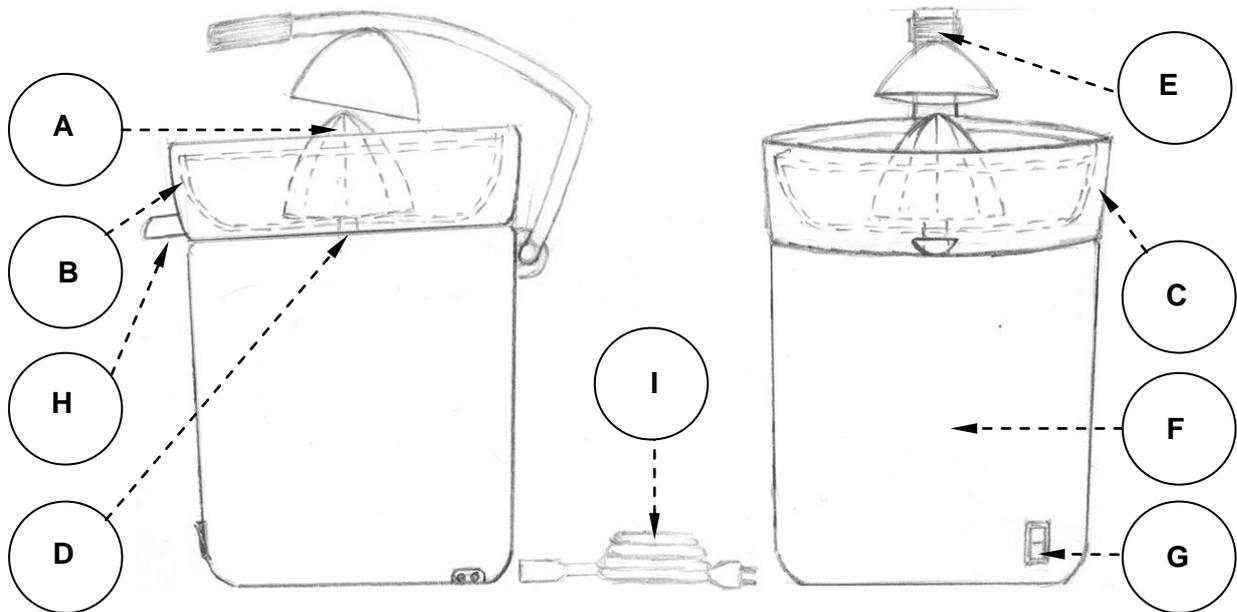


Fig. 4.11 Sketch del concept S_2

	Funzione	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S_2	Spremere Arancia	A (Puntale)	1	Acciaio	Termoformatura
	Trattenere Polpa	B (Filtro)	1	Acciaio	Termoformatura
	Contenere Succo	C (Contenitore)	1	Acciaio	Termoformatura
	Fornire Energia Meccanica	D (Motore)	1	Acciaio + Rame	Estrusione; Termoformatura
	Trasmettere Moto				
	Press Orange	E (Braccetto + Calotta)	1	Acciaio	Termoformatura
	Contenere Parti Meccaniche	F (Housing)	1	Acciaio	Termoformatura
	Dare Segnale	G (Interruttore)	1	ABS	Stampaggio a Iniezione
	Espellere Succo	H (Beccuccio)	1	Acciaio	Termoformatura
	Trasportare Tensione Elettrica	I (Cavo di Alimentazione)	1	Gomma + Rame	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.3 Analisi degli archetipi per il concept S_2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Ω1	Ω2
A	M = 340 HS = 0 GWP = 1.632 IM = 45.22 EU = 0 TR = 20 LR = 3.4	1 90 g			1					1 -130 g	40 g
B	1 -90 g	M = 680 HS = 0 GWP = 3.264 IM = 90.44 EU = 0 TR = 0 LR = 6.8	1 65 g								25 g
C		1 -65 g	M = 544 HS = 0 GWP = 2.61 IM = 72.35 EU = 0 TR = 100 LR = 5.44			1		1 65 g			
D				M = 2720 HS = 0 GWP = 12.74 IM = 475 EU = 100 TR = 150 LR = 272		1					
E	1				M = 680 HS = 0 GWP = 3.264 IM = 90.44 EU = 0 TR = 50 LR = 6.8						
F			1	1		M = 1666 HS = 0 GWP = 8 IM = 221.6 EU = 0 TR = 0 LR = 16.66			1		
G							M = 34 HS = 0 GWP = 0.1 IM = 13.6 EU = 0 TR = 30 LR = 0.34			-220 V	-1
H			1 -65g					M = 81.6 HS = 0 GWP = 0.39 IM = 10.5 EU = 0 TR = 100 LR = 0.82			65g
I						1				M = 40 HS = 0 GWP = 0.077 IM = 5.42 EU = 0 TR = 80 LR = 10	
							220 V				-220 V

Fig. 4.12 A-DSM per il concept S₂

Di seguito, le figure 4.13-4.16 e la tabella 4.4 descrivono lo sviluppo del concept S₃.

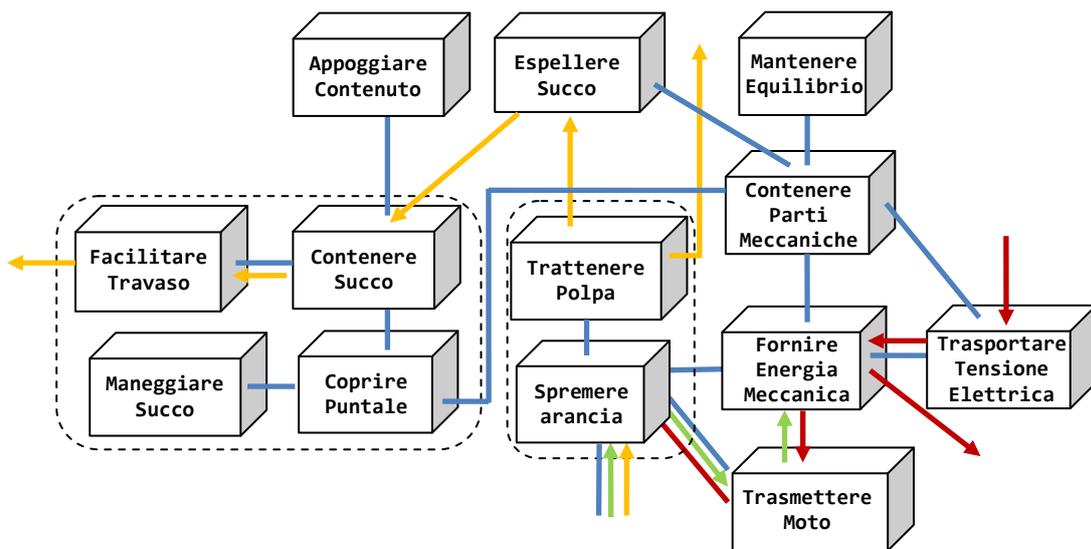


Fig. 4.13 Modello funzionale del concept S₃

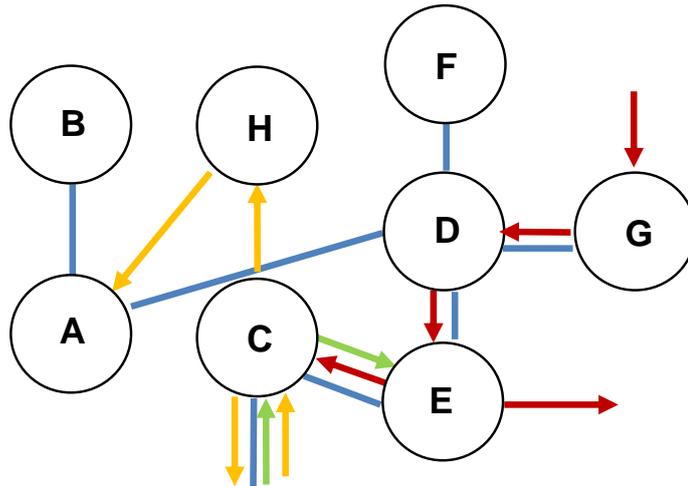


Fig. 4.14 Archetipi del concept S_3

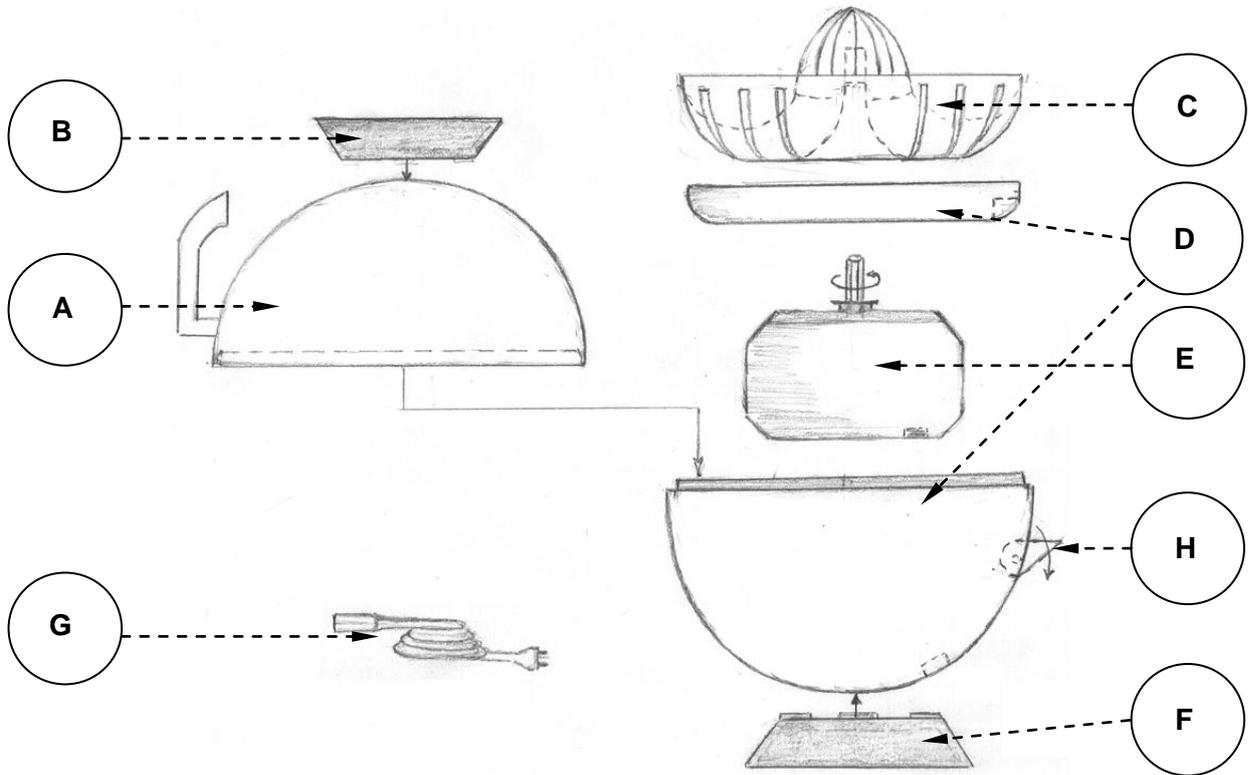


Fig. 4.15 Sketch del concept S_3

	Funzione	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S_3	Contenere Succo	A (Coperchio/Contenitor e + Maniglia)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Facilitare Travaso				
	Maneggiare Succo				
	Coprire Puntale				
	Appoggiare Contenuto	B (Supporto 2)	1	ABS	Stampaggio ad

					iniezione
	Spremere Arancia	C (Puntale + Filtro)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trattenere Polpa				
	Fornire Energia Meccanica	E (Motore)	1	Acciaio + Rame	Estrusione; Termoformatura
	Contenere Parti Meccaniche	D (Housing)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Mantenere equilibrio	F (Supporto 1)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trasportare Tensione Elettrica	G (Cavo di alimentazione)	1	Acciaio + Rame	Trafilatura; Piegatura
	Espellere Succo	H (Beccuccio)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione

Tabella 4.4 Analisi degli archetipi per il concept S₃

	A	B	C	D	E	F	G	H	Ω1	Ω2
A	M = 131.93 HS = 0 GWP = 0.41 IM = 55.54 EU = 0 TR = 0 LR = 1.3	1		1				-55 g	1	
B		M = 30 HS = 0 GWP = 0.09 IM = 12.63 EU = 0 TR = 0 LR = 0.3								
C			M = 40 HS = 0 GWP = 0.126 IM = 16.64 EU = 0 TR = 0 LR = 0.4		1			55 g	-130 g	75 g
D	1			M = 131.93 HS = 0 GWP = 0.41 IM = 55.54 EU = 0 TR = 0 LR = 1.3	1	1	1			
E			1		M = 500 HS = 0 GWP = 0.875 IM = 86.78 EU = 30 TR = 70 LR = 50					0,09 kJ
F				1		M = 50 HS = 0 GWP = 0.156 IM = 21 EU = 0 TR = 0 LR = 0,5				
G				1			M = 43.3 HS = 0 GWP = 0.086 IM = 6.03 EU = 0 TR = 120 LR = 10.82			
H	60 g		-60 g							

Fig. 4.16 A-DSM per il concept S₃

Le figure 4.17-4.20 e la tabella 4.5 descrivono lo sviluppo del concept S₄.

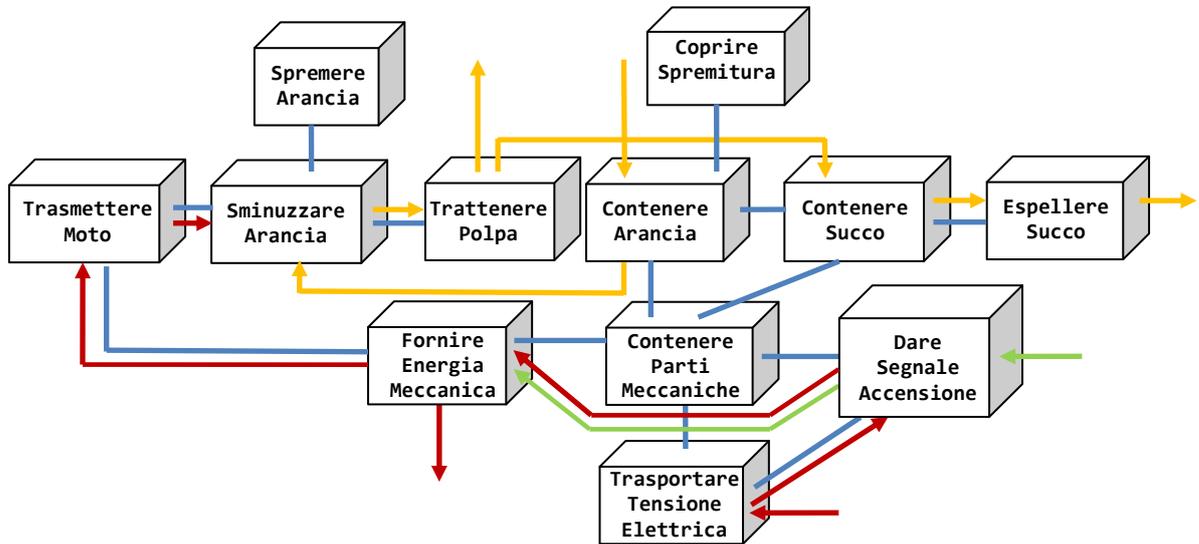


Fig. 4.17 Modello funzionale per il concept S₄

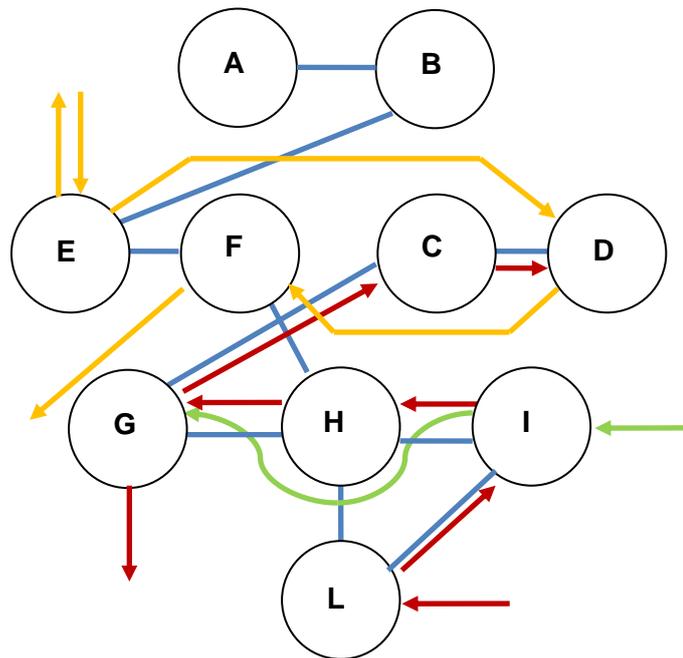


Fig. 4.18 Archetipi del concept S₄

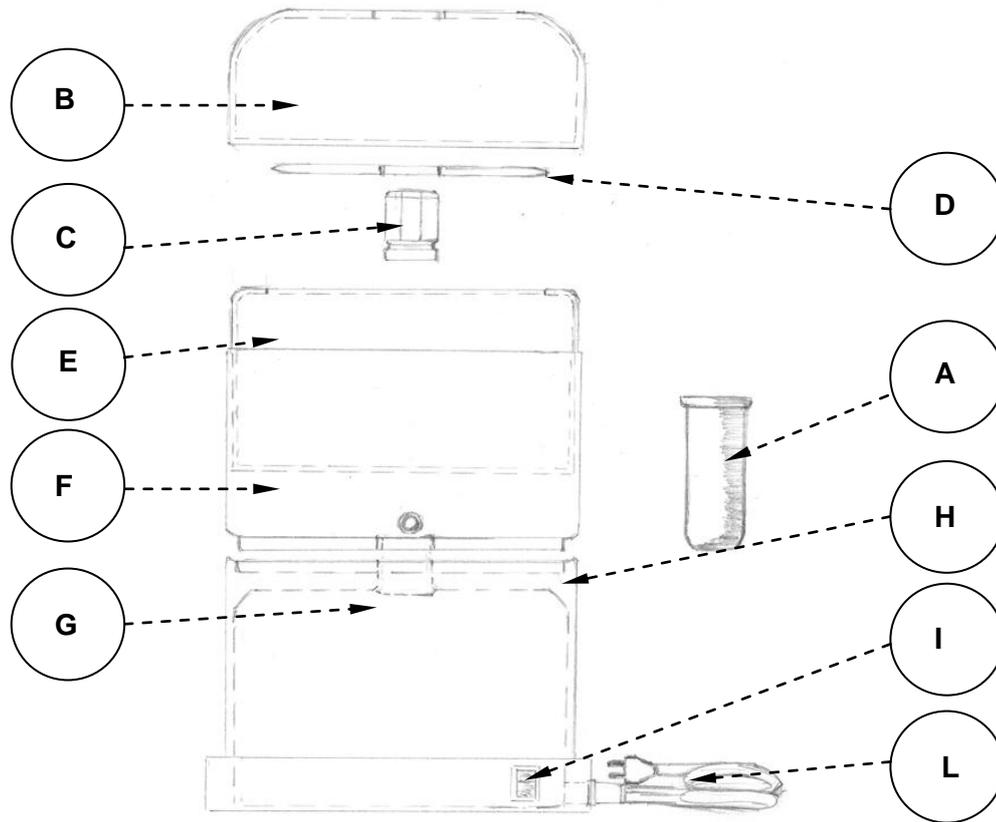


Fig. 4.19 Sketch del concept S₄

	Funzione	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S ₄	Spremere Arancia	A (Plunger)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Coprire Spremitura	B (Coperchio)	1	Acciaio	Termoformatura
	Trasmettere Moto	C (Dado)	1	Acciaio	Termoformatura
	Sminuzzare Arancia	D (Lama Perforata)	1	Acciaio	Termoformatura
	Trattenere Polpa				
	Contenere Arance	E (Contenitore)	1	Acciaio	Termoformatura
	Contenere Succo	F (Scodella + Beccuccio)	1	Acciaio	Termoformatura
	Espellere Succo				
	Fornire Energia Meccanica	G (Motore)	1	Acciaio + Rame	Estrusione; Termoformatura
	Contenere Parti Meccaniche	H (Housing)	1	Acciaio	Termoformatura
	Dare Segnale Accensione	I (Interruttore)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trasportare Tensione Elettrica	L (Cavo di Alimentazione)	1	Gomma + Rame	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.5 Analisi degli archetipi per il concept S₄

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	Ω1	Ω2
A	M = 100 HS = 0 GWP = 0.316 IM = 40 EU = 0 TR = 70 LR = 1	1										
B	1	M = 600 HS = 0 GWP = 2.88 IM = 79.8 EU = 0 TR = 0 LR = 60					1					
C			M = 150 HS = 0 GWP = 0.72 IM = 19.95 EU = 0 TR = 10 LR = 15	1				1				
D			1	M = 230 HS = 0 GWP = 1.1 IM = 30.6 EU = 0 TR = 30 LR = 23								
E				130 g	M = 690 HS = 0 GWP = 3.31 IM = 91.77 EU = 0 TR = 0 LR = 69						-130 g	70 g
F		1		-60g		M = 710 HS = 0 GWP = 3.4 IM = 94.43 EU = 0 TR = 0 LR = 71		1			60 g	
G			1				M = 2020 HS = 0 GWP = 9.46 IM = 396.23 EU = 250 TR = 120 LR = 200					
H								M = 1000 HS = 0 GWP = 4.8 IM = 135 EU = 0 TR = 0 LR = 100				
I									M = 34 HS = 0 GWP = 0.1 IM = 13.6 EU = 0 TR = 30 LR = 1			
L										M = 43.3 HS = 0 GWP = 0.086 IM = 6.03 EU = 0 TR = 20 LR = 10.82		

Fig. 4.20 A-DSM per il concept S₄

Le figure 4.21-4.24 e la tabella 4.4 descrivono lo sviluppo del concept S₅.

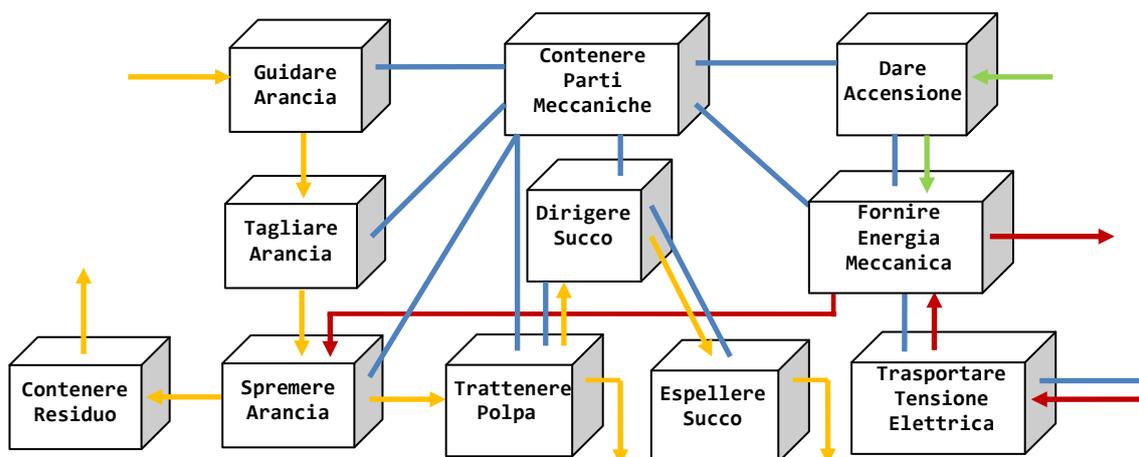


Fig. 4.21 Modello funzionale del concept S₅

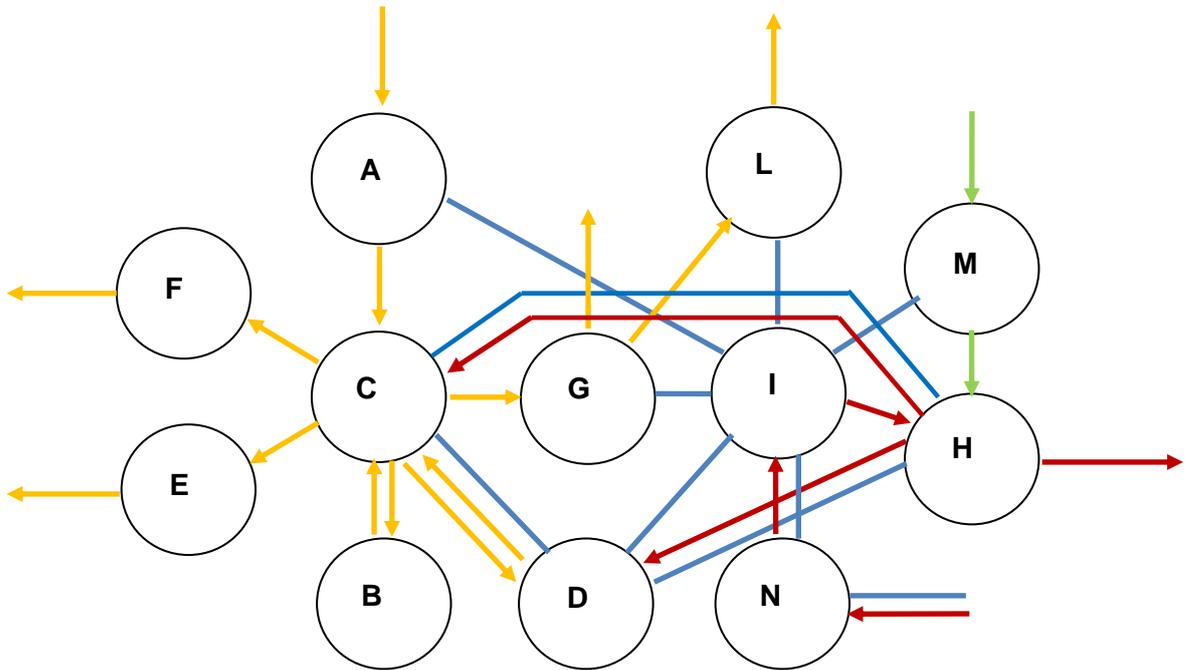


Fig. 4.22 Archetipi del concept S_5

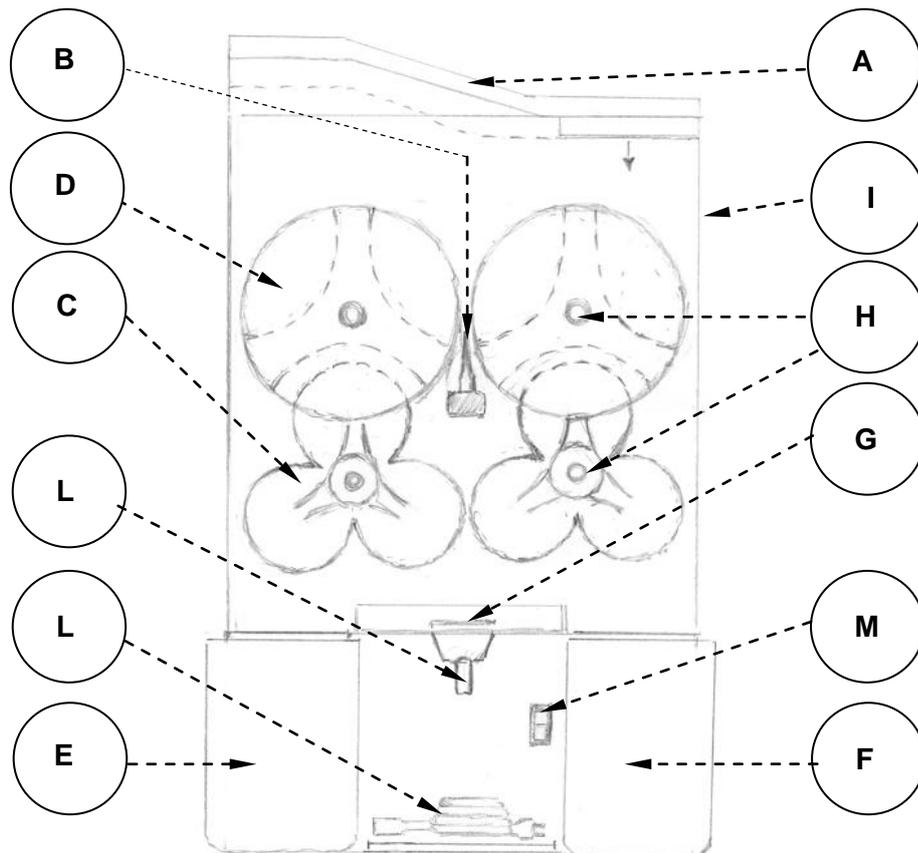


Fig. 4.23 Sketch del concept S_5

	Funzione	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S ₅	Guidare Arancia	A (Guida)	1	Acciaio	Termoformatura
	Tagliare Arancia	B (Lama)	1	Acciaio	Laminazione; Taglio
	Spremere Arancia	C (Punzone)	2	ABS	Stampaggio ad iniezione
		D (Cilindro Sagomato)	2	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Contenere Residuo	E – F (Secchiello)	2	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trattenere Polpa	G (Filtro)	1	Acciaio	Stampaggio ad iniezione
	Fornire Energia Meccanica	H (Motore)	1	Acciaio + Rame	Estrusione; Termoformatura
	Contenere Parti Meccaniche	I (Housing)	1	Acciaio	Termoformatura
	Guidare Succo				
	Espellere Succo	L (Ugello)	1	Acciaio	Termoformatura
	Dare Accensione	M (Interruttore)	1	ABS	Stampaggio ad iniezione
	Trasportare Tensione Elettrica	N (Cavo Alimentazione)	1	Gomma + Rame	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.6 Analisi degli archetipi per il concept S₅

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	Ω1	Ω2
A	M = 507 HS = 0 GWP = 2.43 IM = 67.43 EU = 0 TR = 38 LR = 5.07		130 g						1				-130 g	
B		M = 200 HS = 0 GWP = 0.96 IM = 26.6 EU = 0 TR = 20 LR = 2	-130g 130g											
C	-130 g	-130g 130g	M = 600 HS = 0 GWP = 1.9 IM = 252.6 EU = 0 TR = 0 LR = 6	-130g 130g	30 g	30 g	70 g	1						
D			-130g 130g	M = 600 HS = 0 GWP = 1.9 IM = 252.6 EU = 0 TR = 0 LR = 6				1	1					
E			-30 g		M = 800 HS = 0 GWP = 2.53 IM = 335.8 EU = 0 TR = 0 LR = 8									30 g
F			-30 g			M = 700 HS = 0 GWP = 2.21 IM = 294.7 EU = 0 TR = 25 LR = 7								30 g
G			-70 g				M = 540 HS = 0 GWP = 2.6 IM = 71.82 EU = 0 TR = 0 LR = 5.4		1	60 g				10 g
H			1	1						M = 3500 HS = 0 GWP = 16.8 IM = 465.5 EU = 200 TR = 75 LR = 35				
I	1		4,5 kJ	4,5 kJ						-220 V				0,9 kJ
				1			1			220 V				
L							-60 g		1				-220 V	60 g
											M = 340 HS = 0 GWP = 1.63 IM = 45.22 EU = 0 TR = 0 LR = 3.4			

$$P(S_1/S_2) = (1173,16/6800)^{0,2} * (2,5/32,075)^{0,2} * (280,64/1024,92)^{0,15} * (50/100)^{0,05} * (130/320)^{0,1} \\ * (104,8/322,26)^{0,2} = 0,254$$

I risultati ottenuti dal WPM sono visualizzati in tabella 4.8, dove si può constatare che $S_3 < S_1 < S_4 < S_2 < S_5$ (" $<$ " sta per "meglio di" nel caso di minimizzazione). Quindi, S_3 è il modello di spremiagrumi elettrico migliore in termini di impatto ambientale relativamente alla sola valutazione degli archetipi, poiché ha vinto il maggior numero di confronti. Esaminando le colonne dei risultati in tabella, è possibile osservare che due soluzioni progettuali sono simili se il risultato è vicino ad 1 (come nel caso di $P(S_1/S_3)$ o $P(S_2/S_4)$), mentre risultano anche molto diverse tra loro, se il valore di $P(S_k/S_l)$ è molto superiore (o inferiore) all'unità.

Confronto	Valore	Resultato	Confronto	Valore	Resultato
$P(S_1/S_2)$	0,254	S1	$P(S_2/S_4)$	1,023	S4
$P(S_1/S_3)$	1,120	S3	$P(S_2/S_5)$	0,688	S2
$P(S_1/S_4)$	0,260	S1	$P(S_3/S_4)$	0,232	S3
$P(S_1/S_5)$	0,174	S1	$P(S_3/S_5)$	0,156	S3
$P(S_2/S_3)$	4,407	S3	$P(S_4/S_5)$	0,672	S4

Tabella 4.8 Risultati dei dieci confronti tramite WPM

Il concetto S_3 è preferibile rispetto a S_1 , sebbene entrambi mostrino degli impatti inferiori rispetto al resto delle altre soluzioni progettuali. Tale risultato è verificato calcolando il valore medio " γ ", che è significativamente inferiore per le prime due soluzioni (il concetto peggiore S_5 possiede il più alto valore medio γ), come mostrato nella tabella 4.9.

	S_3	S_1	S_4	S_2	S_5
Numero confronti vinti	4	3	2	1	0
γ	0,377	0,452	2,453	2,514	3,770

Tabella 4.9 Numero di vittorie e valore medio γ per ogni soluzione

A questo punto, la valutazione sugli EPI dei concetti deve essere integrata con le quantità dei materiali di scarto e le perdite di energia precedentemente calcolate per ogni soluzione, al fine di poter selezionare il concept di prodotto complessivamente più sostenibile.

Un approccio visuale viene utilizzato per ottenere il modello funzionale ottimo (oppure un insieme di modelli soddisfacenti), cioè quello che possiede il set di impatti che minimizza i tre parametri α , β e γ . I valori ottenuti dalle valutazioni sono organizzati in tabella 4.10 per essere elaborati e visualizzati in uno spazio tridimensionale (vedi figura 4.25).

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
α	62	65	75	70	70
β	0,15	0,3	0,09	0,75	0,9
γ	0,452	2,514	0,377	2,453	3,77

Tabella 4.10 Valorizzazione dei tre parametri per le cinque soluzioni di progetto

I valori presenti in tabella sono stati trasformati utilizzando le relazioni (7.1) (7.2) e (7.3), per consentire il loro posizionamento nello spazio normalizzato. Per il caso in esame, le coordinate delle soluzioni presentano i valori riassunti nella tabella 4.11.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
α'	0	0,23	1	0,62	0,62
β'	0,07	0,26	0	0,81	1
γ'	0,02	0,63	0	0,61	1

Tabella 4.11 Valori normalizzati

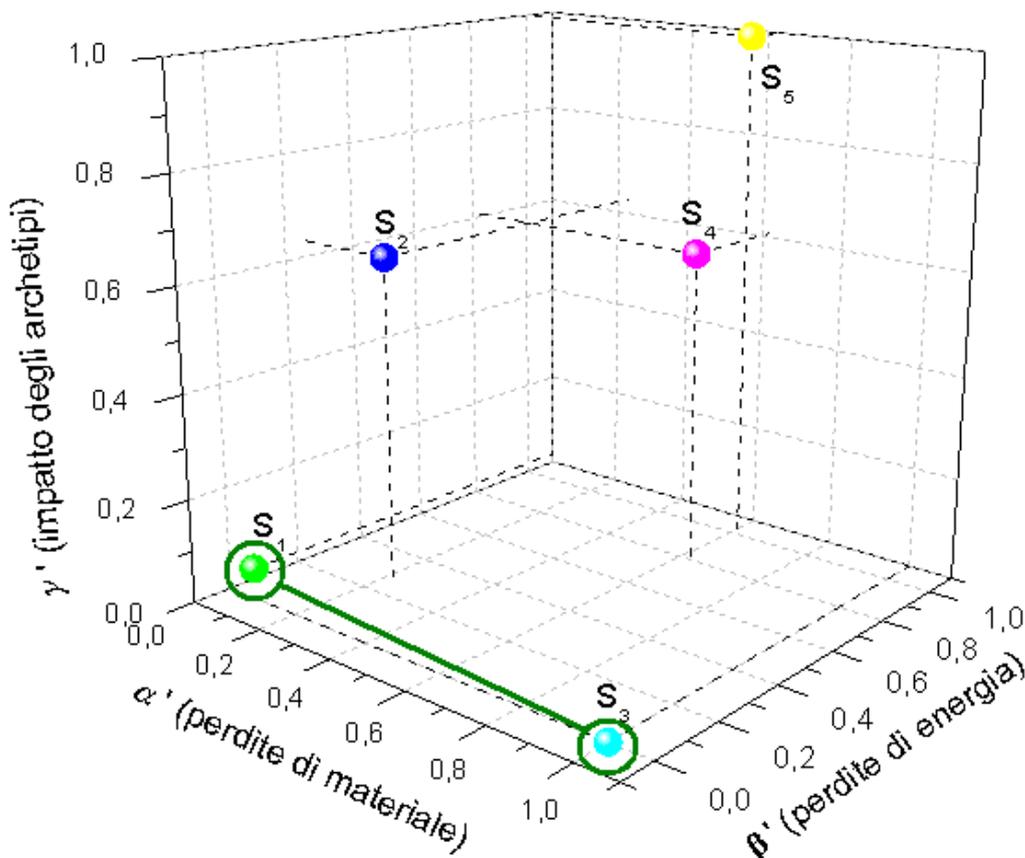


Fig. 4.25 Analisi dei concept dello spremiagrumi nello spazio normalizzato

Secondo il grafico in figura 4.25, S₅ è tra le soluzioni peggiori e può essere scartata, perché è

dominata da S_4 , S_2 ed S_1 . Quest'ultima, a sua volta, è migliore (strettamente) delle altre due, che possono essere ulteriormente scartate. S_3 , invece, risulta migliore di S_1 per i valori di β' e γ' ma non per il valore assunto da α' . La distribuzione delle soluzioni all'interno del grafico mostra dell'incertezza in particolare tra S_3 e S_1 , poiché nessuna delle due è dominata dall'altra in base a tutti e tre i parametri. Queste due alternative (come evidenziato ancora in figura 4.25) formano un sottoinsieme di soluzioni progettuali efficienti, sebbene S_3 sia stato temporaneamente il miglior concetto secondo i risultati espressi dal WPM (l'assessment degli archetipi).

L'intera metodologia permette che il team possa verificare ed elaborare il risultato ottenuto per via grafica attraverso una funzione obiettivo "aggregata" (o "funzione di utilità") $Z(\alpha', \beta', \gamma')$. Essa può essere impiegata per ottenere un singolo modello funzionale avente il miglior compromesso di impatti. Sostituendo i valori della tabella 4.11 nella $Z(\alpha', \beta', \gamma')$, si ha che:

$$Z(\alpha'_1, \beta'_1, \gamma'_1) = 0 + 0,07 + 0,02 = 0,09$$

$$Z(\alpha'_2, \beta'_2, \gamma'_2) = 0,23 + 0,26 + 0,63 = 1,12$$

$$Z(\alpha'_3, \beta'_3, \gamma'_3) = 1 + 0 + 0 = 1$$

$$Z(\alpha'_4, \beta'_4, \gamma'_4) = 0,62 + 0,81 + 0,61 = 2,04$$

$$Z(\alpha'_5, \beta'_5, \gamma'_5) = 0,62 + 1 + 1 = 2,62$$

Utilizzando la funzione di utilità Z , i risultati confermano che S_3 e S_1 sono preferibili a S_2 , S_4 e S_5 . S_1 , inoltre, fornisce il valore più basso di funzione obiettivo per il caso di studio, quindi, può essere considerato il miglior compromesso nel sub-set di soluzioni formato da S_1 e S_3 .

4.5 Caso di studio: applicazione ad un semplice dispositivo meccanico

Questo secondo caso di studio serve a testare il metodo A-DSM su quelle tipologie di dispositivi che, nella fattispecie, non prevedono particolari flussi di materiale ed energia durante il proprio funzionamento, come avviene, al contrario, gli elettrodomestici. Diversamente dall'applicazione del metodo mostrata nella sezione 4.4, in questa sede i concept di prodotto sono valutati esclusivamente in base agli EPI che caratterizzano gli archetipi, mostrando, in un certo senso, la "scalabilità" della metodologia proposta. Le soluzioni, infatti, non saranno valutate in uno spazio a tre dimensioni (con coordinate α' , β' e γ'), ma esclusivamente sui risultati del metodo WPM, che stabilirà il concept ad impatto complessivamente più basso.

Si consideri il caso di un team di progetto che ha intenzione di effettuare la riprogettazione di una pinza per i panni e che il modello funzionale a cui i progettisti sono pervenuti sia, per

semplicità, lo stesso per tutti i concept (fig. 4.26).

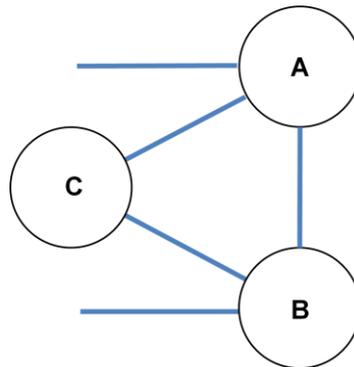


Fig. 4.26 Grafo funzionale relativo ai tre concept di prodotto

Benché il grafo funzionale sia il medesimo per tutte le soluzioni, il team elabora tre concept distinti, che, ovviamente, presentano delle diversità sui materiali e sulle geometrie. La figura 4.27 mostra lo sviluppo del primo concept di prodotto tramite un modellatore CAD, mentre la tabella 4.12 contiene le ipotesi di progetto e la figura 4.28 visualizza l'A-DSM corrispondente alla prima soluzione.

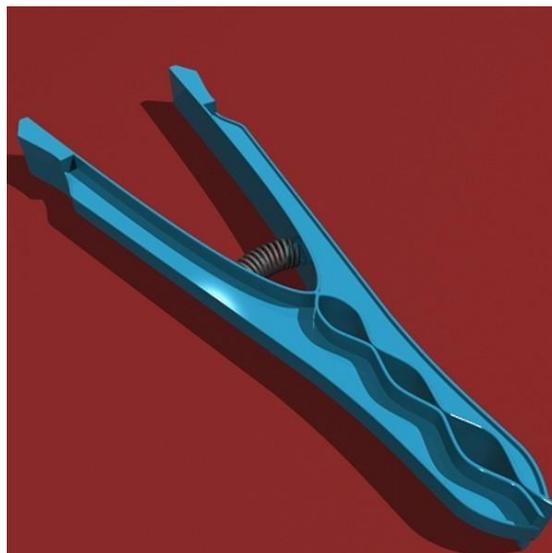


Fig. 4.27 Concept S_1

	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S_1	A (Base 1)	1	Polietilene	Stampaggio ad iniezione
	B (Base 2)	1	Polietilene	Stampaggio ad iniezione
	C (Molla)	1	Acciaio	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.12 Analisi degli archetipi per il concept S_1

Anche in questo secondo caso di studio, le unità di misura per gli EPI sono le seguenti:

- [g] (grammi) per la massa (M);
- [g] (grammi) per le sostanze pericolose (HS);
- [kg CO₂eq] (kilogrammi di CO₂ equivalente per il Global Warming Potential (GWP));
- [mPts] (millipoints) per l'impatto nella fase di produzione (IM);
- [W] (Watt) per la potenza dichiarata nella fase d'uso (PU);
- [km] (kilometri) per l'indicatore di trasporto (TR);
- [g] (grammi) per la quantità di materiale non riciclabile (LR).

	A		B		C		Ω1		Ω2	
A	M = 3,5 HS = 0 GWP = 0,007 IM = 1,23 PU = 0 TR = 10 LR = 0,4		1		1		1			
B	1		M = 3,5 HS = 0 GWP = 0,007 IM = 1,23 PU = 0 TR = 10 LR = 0,4		1		1			
C	1		1		M = 1 HS = 0 GWP = 0,005 IM = 0,086 PU = 0 TR = 20 LR = 0,1					

Fig. 4.28 A-DSM per il concept S₁

Le figure 4.29 e 4.30 e la tabella 4.13 mostrano lo sviluppo della soluzione S₂.



Fig. 4.29 Concept S₂

	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
	A (Base 1)	1	Legno	Taglio; Fresatura

S ₂	B (Base 2)	1	Legno	Taglio; Fresatura
	C (Molla)	1	Acciaio	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.13 Analisi degli archetipi per il concept S₂

	A	B	C	Ω1	Ω2
A	M = 3,4 HS = 0 GWP = 0,006 IM = 0,133 PU = 0 TR = 20 LR = 0,1	1	1	1	
B	1	M = 3,4 HS = 0 GWP = 0,006 IM = 0,133 PU = 0 TR = 20 LR = 0,1	1	1	
C	1	1	M = 2 HS = 0 GWP = 0,01 IM = 0,17 PU = 0 TR = 20 LR = 0,16		

Fig. 4.30 A-DSM per il concept S₂

Le figure 4.31 e 4.32 e la tabella 4.14 mostrano lo sviluppo della soluzione S₃.

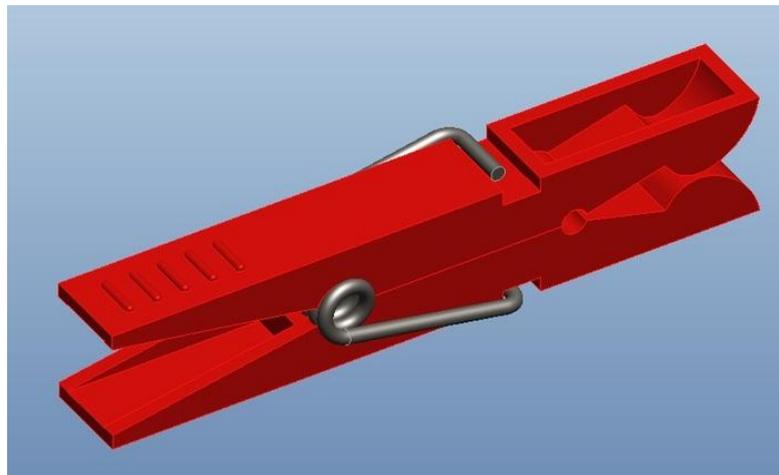


Fig. 4.31 Concept S₃

	Archetipo	Quantità	Materiale	Processi principali
S ₃	A (Base 1)	1	Polietilene	Stampaggio ad iniezione
	B (Base 2)	1	Polietilene	Stampaggio ad iniezione
	C (Molla)	1	Acciaio	Trafilatura; Piegatura

Tabella 4.14 Analisi degli archetipi per il concept S₃

	A	B	C	Ω1	Ω2
A	M = 3,5 HS = 0 GWP = 0,007 IM = 1,23 PU = 0 TR = 10 LR = 0,4	1	1	1	
B	1	M = 3,5 HS = 0 GWP = 0,007 IM = 1,23 PU = 0 TR = 10 LR = 0,4	1	1	
C	1	1	M = 2,6 HS = 0 GWP = 0,012 IM = 0,22 PU = 0 TR = 20 LR = 0,16		

Fig. 4.32 A-DSM per il concept S₃

Utilizzando la relazione (3), si ottengono i valori aggregati degli EPI per tutte le soluzioni, come visualizzato nella tabella 4.15.

	M	HS	GWP	IM	PU	TR	LR
S ₁	8,0	0	0,026	2,54	0	50	0,80
S ₂	8,8	0	0,023	0,438	0	60	0,36
S ₃	9,6	0	0,026	2,68	0	30	0,96

Tabella 4.15 EPI aggregati per le tre soluzioni

Per ottenere la migliore soluzione dal punto di vista ambientale viene lanciato il WPM, eseguendo tre confronti a coppie (in quanto C = 3). Per il caso di studio specifico, il set di pesi è stato selezionato come segue: $w = [0,1 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,25 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,2]$ (anche questa volta per ipotesi dal team di progetto).

Il metodo presenta due eccezioni, la prima sull'indicatore delle sostanze pericolose (HS) e la seconda su quello della potenza in fase di utilizzo del dispositivo (PU), dove è presente il valore nullo per tutte le soluzioni. Il WPM, quindi, è eseguito su cinque EPI. In tabella 4.16 sono riportati gli esiti dei confronti a coppie.

Confronto	Valore	Risultato
P(S ₁ /S ₂)	1,81	S ₂
P(S ₁ /S ₃)	0,98	S ₁
P(S ₂ /S ₃)	0,54	S ₂

Tabella 4.16 Risultati del WPM eseguito su tre confronti

I risultati ottenuti mostrano che $S_2 < S_1 < S_3$, in quanto S₂ vince due confronti, mentre S₁ risulta migliore solo di S₃. Si noti, inoltre, come S₂ abbia un impatto notevolmente minore rispetto alle altre, il cui confronto diretto restituisce un rapporto molto vicino ad 1 (P(S₁/S₃) = 0,98).

4.5.1 Commenti ai casi di studio

Il progettista (o il team di progetto) ha l'opportunità di analizzare ulteriormente il concept che è risultato il migliore dall'assessment nell'intento di migliorarlo, oppure può intervenire su una o più soluzioni che egli trova di particolare interesse. In ogni caso, ciò offre l'opportunità di minimizzare uno dei parametri che presenta una performance non soddisfacente e, quindi, di modificare l'efficienza complessiva di un concept.

Nel primo caso di studio, ad esempio, si ha che il concept S_3 presenta un valore di α' molto alto e, quindi, può essere migliorato. Ciò porta il progettista a riflettere su come poter diminuire lo questo valore e, in molti casi, al rimaneggiamento della soluzione. Le modifiche possono essere di diverso tipo, da quelle in cui si cerca di ottimizzare il flusso di materiale a quelle in cui si verifica la sostituzione o la riprogettazione di uno o più archetipi. In tal caso, il metodo A-DSM va rieseguito, la nuova soluzione di progetto modificata sarà caratterizzata da un set di parametri (α' , β' e γ') diverso dal precedente e, probabilmente, comparirà in un'altra posizione nello spazio delle soluzioni. Questo effetto andrà analizzato ulteriormente, poichè il progettista dovrà effettuare una nuova scelta in base alla nuova distribuzione dei concept, che a sua volta potrebbe fornire una soluzione migliore rispetto alla precedente (rappresentata nel caso di studio dal concept S_1). Attraverso quest'approccio, la metodologia assume una struttura di tipo iterativo, poichè il progettista, qualora lo volesse, sarebbe in grado verificare eventuali nuovi risultati nello spazio delle soluzioni.

Nel secondo caso di studio, è possibile notare che ogni A-DSM non presenta alcun valore nelle celle della colonna Ω_2 , in quanto i flussi di materiale ed energia non sono considerati. Ciò, inoltre, ha ottimizzato drasticamente la procedura di assessment, in quanto non è stato necessario allestire lo spazio normalizzato di analisi delle soluzioni e la fase di selezione è stata anticipata al termine del loro confronto a coppie.

Conclusioni

Il lavoro ha presentato una metodologia di confronto e valutazione ambientale dei concept di prodotto nelle prime fasi della progettazione.

In una prima parte introduttiva si è discusso del problema della sostenibilità dei prodotti industriali in termini di impatti sull'ambiente e come fattore di sviluppo ed innovazione. È stata messa in evidenza la necessità di tenere conto della problematica in ambito progettuale e di come la progettazione sia, forse, uno dei momenti più determinanti per ottenere dispositivi più eco-compatibili.

In secondo luogo sono stati descritti i metodi che hanno dato un contributo nella letteratura recente alla valutazione ambientale dei dispositivi durante il conceptual design e, in una fase successiva, i metodi e gli approcci che sono stati utilizzati (ed adattati) alla formulazione dei vari step e delle procedure di analisi che compongono la metodologia descritta. Ad essa è stata dedicata l'ultima parte del lavoro, in cui sono state trattate le fasi principali del metodo, descrivendo l'approccio integrato in ogni sua parte.

In luogo degli indicatori standard presenti nei classici software LCA, un set di indicatori alternativo (EPI) è stato proposto per valutare i concept sulla base delle informazioni legate al loro ciclo di vita. I concept, inoltre, sono stati valutati non solo sugli EPI degli archetipi, ma anche analizzando il modo in cui essi potrebbero funzionare e, pertanto, sulle possibili perdite nei flussi di materiale e di energia che sono presenti in molteplici dispositivi. Un primo caso di studio è stato analizzato in dettaglio, eseguendo la progettazione concettuale di cinque spremiagrumi dal modello funzionale alla valutazione ambientale tramite A-DSM. L'applicazione del metodo ha mostrato che la costruzione delle matrici e la raccolta dei dati sono fasi piuttosto delicate per quanto riguarda la correttezza del valore totale degli impatti (rappresentati dai parametri α , β e γ). Le performance ambientali, inoltre, sono strettamente legate alla selezione degli archetipi ed alle ipotesi di progetto che sono state fatte sugli elementi dell'architettura dei futuri dispositivi. Inoltre, il caso di studio ha messo in luce i vari momenti decisionali che un progettista deve affrontare durante il processo di sviluppo e l'effettivo flusso di attività che il team deve svolgere (seguendo l'iter di analisi e valutazione descritto nelle sezioni dedicate alla trattazione teorica).

Nell'ottica di una progettazione eco-compatibile, la generazione di dispositivi più efficienti è stata associata al concetto di "soluzioni efficienti" appartenente ad un approccio tipicamente paretiano. La visualizzazione delle soluzioni in uno spazio normalizzato, inoltre, ha permesso di

ottenere un ambiente di supporto alla scelta del concept migliore ed, inoltre, di dare lo spunto per un'eventuale modifica di soluzioni che possono essere migliorate. La modifica di uno o più concept può cambiare la distribuzione iniziale delle soluzioni e ciò fa della metodologia descritta un approccio di tipo iterativo, poiché i progettisti sono indotti ad applicare nuovamente le procedure di valutazione e di scelta per verificare i nuovi risultati. Infine, l'utilizzo di una funzione obiettivo aggregata (AOF), ha permesso di identificare la soluzione che è il migliore compromesso dei tre parametri di confronto che caratterizzano ciascun concept. Successivamente, un secondo caso di studio è stato condotto per testare la possibilità di eseguire un assessment basato esclusivamente sugli EPI e mettere in evidenza, quindi, una certa "scalabilità" della metodologia proposta.

Tra gli elementi critici che necessitano di un'ulteriore analisi vi è l'utilizzo di un numero più elevato di indicatori. Ciò risulta un valido spunto di riflessione, poiché con l'aumento del numero di EPI si avrebbe una riduzione del valore dei loro pesi associati e ciò potrebbe causare alcune criticità nel modello WPM. Nonostante questi potenziali inconvenienti, da un altro punto di vista, l'aumento degli indicatori potrebbe permettere di coinvolgere nella valutazione dei concept anche altri parametri di analisi, come ad esempio diverse tipologie di costi ed altri indicatori di particolare interesse aziendale o progettuale. Il metodo proposto, inoltre, potrebbe essere corredato di ulteriori test per verificare l'efficacia e la facilità di utilizzo delle procedure di assessment. Ciò permetterebbe di ottimizzare e correggere quei passaggi che richiedono particolare attenzione e che si potrebbero semplificare. Una serie di applicazioni su concept appartenenti ad altre famiglie di prodotti può essere un aspetto da valutare in futuro, al fine di comprendere meglio se il metodo A-DSM possa essere considerato "general purpose" oppure sia uno strumento orientato a particolari classi di prodotti.

Questa ricerca, che è stata condotta nell'ambito dell'intero ciclo di dottorato, è affiancata da una produzione scientifica che ha trattato diversi aspetti condensati e discussi in questa sede. I lavori sono stati presentati presso conferenze internazionali (presso il Massachusetts Institute of Technology, presso la conferenza "Design2012", etc.) ed hanno messo in luce i vari aspetti che caratterizzano la metodologia discussa nella trattazione. In un primo lavoro è stata descritta la costruzione di una DSM dal layout modificato (chiamata Augmented DSM o A-DSM) e le sue proprietà come struttura dati [Rocco et al., 2011], mentre un successivo paper ha proposto l'utilizzo della stessa A-DSM nella valutazione dei flussi di materiale ed energia di un dispositivo complesso, nonché le procedure utilizzate per effettuare l'assessment [Rocco et al., 2011]. Un terzo lavoro ha affrontato l'applicazione di un metodo per confrontare le architetture

di prodotto [De Napoli et al., 2012]. Quest'ultimo articolo, così come alcune ricerche che combinano il Multi Criteria Decision Making con le tecniche LCA [Gao et al., 2010] [Hermann et al., 2007], ha proposto un confronto tra le diverse soluzioni progettuali (relative a dispositivi equivalenti dal punto di vista funzionale) mediante il metodo del prodotto pesato (WPM) sulla base di un set di indicatori di performance ambientale.

Il lavoro si conclude con l'auspicio di avere dato un contributo significativo alla problematica dello sviluppo dei prodotti sostenibili, la cui filosofia di progettazione, consapevole ed orientata a soluzioni meno impattanti, risulta sicuramente determinante per un raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità in maniera efficace.

Bibliografia

Al-Hakim L., Kusiak A., Mathew J., “A graph-theoretic approach to conceptual design with functional perspectives”, *Computer-Aided Design* (32), pp. 867-875, 2000.

ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Baltimore Maryland, September 10-13, 2000.

Bennett, M., James, P., “Environment under the spotlight - Current practice and future trends in environment-related performance measurement for business”, Association of Chartered Certified Accountants, London, 1998.

Bohm M. R., Haapala K. R., Poppa K., Stone R. B., Tumer I. Y., “Integrating life cycle assessment into the conceptual phase of design using a design repository”, *Journal of Mechanical Design*, 132 (9), 2010.

Bovea M. D., Pérez-Belis V. A., “Taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process”, *Journal of Cleaner Production*, 20 (1), pp. 61-71, 2011.

Brezet H., Stevels A., Rombouts J., “LCA for eco-design: the dutch experience”, presented at Eco-Design '99, Tokyo, Japan, 1999.

Brezet, H., van Hemel, C., “Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption”, UNEP Ed., Paris, 1997.

Bridgman P.W., “Dimensional Analysis”, Yale University Press, New Haven, CN, 1922.

Browning T., “Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), S. 292-306, 2001.

Bruno F., Giampà F., Muzzupappa M., Rizzuti S., “A methodology to support designer creativity during the conceptual design phase of industrial products”, *Proceedings ICED03*, Stockholm, Sweden, 2003.

Chakrabarti A., Blessing L., “Special issue: representing functionality in design”, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* Vol.10, No.5, pp. 251-253, 1996.

Chakrabarti A., Blight T. P., “A scheme for functional reasoning in conceptual design”, *Design Studies*, Vol. 22, pp. 493-517, 2001.

Choi J.K., Ramani, K., “A quest for sustainable product design: a systematic methodology for integrated assessment of environmentally benign and economically feasible product design”, VDM, Saarbrücken, Germany, 2009.

Cook M., "Understanding the potential opportunities provided by service-orientated concepts to improve resource productivity", *Design and Manufacture for Sustainable Development*, John Wiley and Sons, pp. 125, ISBN 1-86058-470-5, 2004.

- Cornelissen R. L., "Thermodynamics and sustainable development the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility", doctoral dissertation, University of Twente, 1997.
- Curran M. A., "Life Cycle Assessment: principles and practice", EPA/600/ R-06/060, 2006.
- De Napoli L., Rizzuti S., Rocco C., "Comparison of environmental characteristics of functionally equivalent devices by weighted product method", Proceedings of "Design2012 Conference", Cavtat - Dubrovnik, Vol. 2, pp. 777-786, 2012.
- Deng Y. M., "Function and behavior representation in conceptual mechanical design", Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol.16, pp. 343-362, 2002.
- Devanathan S., Ramanujan D., Bernstein W.Z., Zhao F., Ramani K., "Integration of sustainability into early design through the function impact matrix", Journal of Mechanical Design, 132 (8), pp. 081004.1-081004.8, 2010.
- Dewulf W., Duflou J., "Simplifying LCA using indicator approaches: a framework", 10th CIRP Life Cycle Seminar, Copenhagen, May 21-22, 2003.
- Dewulf W., Willems B., Duflou J.R., "Estimating the environmental profile of early design concepts for an electric fruit juicer using the eco-pas methodology", Proc. of 12th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Grenoble, April 3-5, 2005.
- Dewulf W., "A Pro-Active Approach to eco-design: framework and tools", Ph.D Dissertation, Catholic University of Leuven, 2003.
- Dick M., Dewulf W., Birkhofer H., Duflou J., "Estimating the environmental impacts of similar products", Proc. of International Design Conference - Design 2004, Dubrovnik, May 18-21, pp. 1515-1520, 2004.
- Direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 27 gennaio 2003 sulle restrizioni dell'uso di alcune sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), 2003.
- Direttiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 27 gennaio 2003 sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), 2003.
- Eisenhard J. L., Wallace D. R., Sousa I., De Schepper M. S., Rombouts J. P., "Approximate Life Cycle Assessment in conceptual product design", Proceedings of DETC'00, 2000.
- Eppinger S.D., Browning T., "Design Structure Matrix: methods and applications", The MIT Press, 2012.
- Fargnoli, M., Kimura, F., "Sustainable design of modern industrial products", Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, pp. 189-194, 2006.
- Favi C., Peruzzini M., Germani M., "A lifecycle design approach to analyze eco-sustainability of industrial products and product-service systems", Proceedings of the 12th International Design Conference DESIGN 2012, pp. 879-888, 2012.
- Figueira J., Greco S., Ehr Gott M., "Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys", Springer Science + Business Media, New York, 2005.

- Fishburn P. C., "Additive utilities with incomplete product set: applications to priorities and assignments", Operations Research Society of America (ORSA) Publication, Baltimore, MD, 1967.
- Gao Y., Liu Z., Hu D., Zhang L., Gu G., "Selection of green product design scheme based on multi-attribute decision-making method", International Journal of Sustainable Engineering, 3:4, pp. 277-291, 2010.
- Giampà F., Muzzupappa M., Rizzuti S., "Design by function: a methodology to support design creativity international design conference", Dubrovnik, May 18 - 21, 2004.
- Goedkoop M., Spriensma R., "The Eco-indicator '99. A damage oriented method for life cycle impact assessment - Third edition", PRè Consultants, 2001.
- Graedel T. E., "Streamlined Life-Cycle Assessment", New Jersey, Prentice Hall Inc., 1998.
- Haapala K. R., Poppa K. R., Stone R. B., Tumer I. Y., "Automating environmental impact assessment during the conceptual phase of product design", Artificial Intelligence and Sustainable Design AAAI Spring Symposium, 2011.
- Henri J. F., Journeault M., "Environmental performance indicators: an empirical study of canadian manufacturing firms", Journal of Environmental Management; Vol. 87(1), pp. 165-176, 2008.
- Hermann B. G., Kroeze C., Jawjit W., "Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators", Journal of Cleaner Production, Vol. 15, pp. 1787-1796, 2007.
- Hong E. P., Park G. J., "Decomposition problem of engineering systems using axiomatic design and design structure matrix", Proceedings of ICAD2009, The Fifth International Conference on Axiomatic Design, Campus de Caparica, March 25-27, 2009.
- Hubka V., Ernst Eder W., "Theory of technical systems", Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- Hwang C.L., Yoon K., "Multiple attribute decision making: methods and applications", New York, Springer-Verlag, 1981.
- ISO 14040, "Environmental Management - life cycle assessment principles and framework", 2006.
- Karthikeyani Visalakshi N., Thangavel K., "Impact of normalization in distributed k-means clustering", International Journal of Soft Computing, Volume: 4, Issue: 4, pp. 168-172, 2009.
- Koffler C., Krinke S., Schebek L., Buchgeister J., "Volkswagen slimLCI: a procedure for streamlined inventory modeling within life cycle assessment of vehicles", Int. J. Veh. Des., 46, pp. 172-188, 2008.
- Kurtoglu T., Campbell M., "Automated synthesis of electromechanical design configurations from empirical analysis of function to form mapping", J. Engineering Design, 20-1, pp. 83-104, 2009.
- Kurtoglu T., Campbell M., "An evaluation scheme for assessing the worth of automatically generated design alternatives", Res. Engineering Design, 20-1, pp. 59-76, 2009.

- Lindahl M., "A new promising tool for efficient design for environment", Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. IEEE, pp. 734-739, 1999.
- Marshall R. S., Brown D., "Corporate environmental reporting: what's in a metric?", Business Strategy and the Environment, 12 (2), 87, 2003.
- McAloone T., "A short course in sustainable product development: models, methods and mindsets", Unical Seminar Cycle, 28-30 April 2008.
- McAloone T. C., Bey N., "Environmental improvement through product development: A guide", Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark, 2009.
- Medyna G., Coatanéa E., Millet D., "Comparative study of environmental assesement using exergetic LCA implementing in existing software and novel exergetic approach during the early design phase", International Conference on Engineering Design, ICED'09, 2009.
- Miller D. W., Starr M. K., "Executive decisions and operations research", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, NJ, USA, 1969.
- Millet D., Bistagnino L., Lanzavechia C., Camous R., "Does the potential of the use of LCA match the design team needs? Suitability of LCA in product design", Journal of Cleaner Production, 15 (4), pp. 335-346, 2007.
- Otto K., Wood K., "A reverse engineering and redesign methodology for product evolution", Proceedings of the 1996 ASME Design Theory and Methodology Conference, Irvine, CA, Paper No. 96-DETC/DTM- 1523, 1996.
- Pachauri R.K., Reisinger A., "Climate Changes 2007: contribution of working groups i, ii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", Geneva, Switzerland, 2007.
- Persson J.G., "Eco-indicators in product development", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 215 (5) , pp. 627-635, 2001.
- Pimmler T.U., Eppinger S.D., "Integration analysis of product decompositions", Proceedings ASME 6th International Conference on Design Theory and Methodology, Minneapolis, MN, 1994.
- Ramani K., Ramanujan D., Bernstein W. Z., Zhao F., Sutherland J., Handwerker C., "Integrated sustainable life cycle design: a review", Journal of Mechanical Design, 132, 2010.
- Rizzuti S., De Napoli L., Rocco C., "A graph-based approach to check a product functional net", Proceedings of International Design Conference - DESIGN 2006, Dubrovnik - Croatia, May 15 - 18, 2006.
- Rocco C., Rizzuti S., "A proposal of a rough sustainability assessment for conceptual design", Proceedings of the 13th International Dependency and Structure Modelling Conference, Massachusset Institute of Thechnology, U.S.A., 15 - 16 September, 2011.
- Rocco C., Rizzuti S., De Napoli L., "A procedure for early environmental assessment of industrial products", Proceedings of the IMProVe International conference on Innovative Methods in Product Design, June 15th - 17th, Venice, Italy, ADM - INGEGRAF, 2011.

- Rothenberg S., "Sustainability through servicizing", Sloan Management Review, January 2007.
- Saaty T. L., "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill International, New York, 1980.
- Sakao T., "A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design", International Journal of Production Research, 45:18-19, pp. 4143-4162, 2007
- Shimomura Y., Tanigawa S., Takeda H., Umeda Y., Tomiyama T., "Functional evaluation based on function content", Proceedings of the 1996 ASME Design Theory and Methodology Conference, Irvine, CA, Paper No. 96-DETC/DTM-1532, 1996.
- Simon, Evans, McAlloone, Sweatman, Bhamra, Poole, "Ecodesign Navigator a key resource in the drive towards environmentally efficient product design", Manchester Metropolitan University, Cranfield University, EPSRC, 1998.
- Sousa I., Wallace D., "Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts" Technol. Forecast. Soc. Change, 73, pp. 228-249, 2006.
- Stegall N., "Designing for sustainability: a philosophy for ecologically intentional design", Design Issues, vol. 22, no. 2, pp. 56-63, 2006.
- Steward D. V., "The Design Structure System: a method for managing the design of complex systems", IEEE Transactions on Engineering Management, 28(3), 1981, S. 71-74, 1981.
- Sustainable Services Systems (3S): Transition towards sustainability towards sustainable product design", 6th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, Centre for Sustainable Design, October 2001.
- Tan A.R., McAlloone T.C., Andreasen M., "What happens to integrated product development models with Product/Service Systems approaches?" 6th Integrated Product Development IPD 2006 SCHÖNEBECK/BAD SALZELMEN b, Magdeburg, October 18-20, 2006.
- Telenko C., Seepersad C. C., Webber M. E., "A method for developing design for environment guidelines for future product design", Proceedings of IDETC/CIE 2009 ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference August 30 – September 6, San Diego, CA, 2009.
- Thoben K. D., Jagdev H., Eschenbaecher J., "Extended Products: Evolving Traditional Product Concepts", Proceedings of the 7th International Conference on Concurrent Enterprising: Engineering the Knowledge Economy through Co-operation, Bremen, 2001.
- Todd J. A., Curran M. A., "Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report From the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup," Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education, 1999.
- Triantaphyllou E., Shu B., Nieto Sanchez S., Ray T., "Multi-Criteria Decision Making: an operations research approach", Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley & Sons, New York, Vol. 15, pp. 175-186, 1998.
- Ullman D. G., "The mechanical design process", 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1997.
- Ulrich K., Eppinger S.D., "Product design and development", 4th edition, McGraw-Hill New York, 2008.

Van Halen C., Vezzoli C., Wimmer R., “Methodology for Product Service System innovation”, Assen: Uitgeverij Van Gorcum, 2005.

Vezzoli C., Ceschin F., Cortesi S., “Metodi e strumenti per il Life Cycle Design”, Maggioli Editore, 2009.

Wimmer W., Züst R., “Ecodesign Pilot”, Springer Netherlands, 2003.

Yassine A., “an introduction to modeling and analyzing complex product development processes using the Design Structure Matrix (DSM) method”, 2004.

Zhang H.C., Li H., “An energy factor based systematic approach to energy-saving product design”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59 (1), pp. 183-186, 2010.

Zhang Y., “Green QFD-II: a life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices”, Journal of Production Research, Vol. 37, Issue 5, 1999.