

ANALISI DEI METODI DI INTEGRAZIONE DEGLI INDICATORI ECONOMICI E AMBIENTALI

Paula Martina Barbato^{1,*}, Lucia Rigamonti¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sommario

La valutazione della sostenibilità di un processo produttivo sarebbe facilitata dalla disponibilità di strumenti in grado di rappresentarne le prestazioni economiche e quelle ambientali attraverso un unico indicatore. L'obiettivo dell'articolo è proprio quello di identificare la tecnica più indicata a valutare un sistema considerando contemporaneamente la dimensione ambientale e quella economica. In questo modo sarebbe possibile individuare, laddove necessario, qual è l'alternativa migliore tra una serie di opzioni aventi la stessa funzione. Tramite una ricerca bibliografica si sono individuati i seguenti metodi d'integrazione: *i*) ottimizzazione vettoriale; *ii*) eco-efficienza; *iii*) Metodi-Decisionali Multi Attributo (MDMA). I tre differiscono sia per lo scopo con cui viene condotta l'analisi che per il formato degli esiti. Pertanto, la scelta del metodo è funzione del tipo di problema che si intende risolvere. L'ottimizzazione vettoriale e l'eco-efficienza non consentono realmente di integrare le due sfere, dato che il primo le valuta in maniera indipendente e il secondo ne definisce solamente il rapporto. La sola tecnica a fornire un unico punteggio che rispecchi davvero le prestazioni complessive di un sistema è quella dei MDMA, la quale include nell'analisi anche i giudizi dei decisori tramite l'uso di coefficienti di ponderazione. La fase di definizione dei pesi dev'essere svolta con estrema cura, in quanto estremamente delicata. Solo in questo modo è possibile determinare dei coefficienti che rispecchino realmente le preferenze dei decisori oppure, secondo un discorso più generale, le politiche in atto. I giudizi espressi, tuttavia, sono spesso imprecisi, provocando un aumento dell'incertezza della valutazione. A ragion di ciò, si è scelto di analizzare un metodo in particolare, ovvero quello del FAHP&TOPSIS, il quale riduce gli effetti causati dall'uso di dati approssimativi grazie all'applicazione della teoria degli insiemi fuzzy.

Parole chiave: LCA, LCC, sostenibilità, MDMA, FAHP&TOPSIS.

ANALYSIS OF THE INTEGRATION METHODS FOR ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS

Abstract

Assessing the sustainability of a product system requires the use of tools able to represent its economic and environmental performance through a single indicator. For more than 20 years, researchers have been developing and implementing different techniques to integrate the results obtained from Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) analyses. However, research in this area is rather lacking and it has not yet been established which tool is generally the most suitable. The need to boost the sustainability of production processes is increasingly pressing and the definition of a universally recognised integration methodology can no longer be postponed. In this paper, the main integration methods available in related literature are illustrated and compared, highlighting their strengths and limitations. Following an initial bibliographic search, it was concluded that the most widely used methodologies in this field are the following: *i*) vector optimization; *ii*) eco-efficiency; *iii*) Multi Attribute Decision-Methods (MADM); *iv*) monetization method. Several monetization methods exist in literature to convert environmental impacts into the corresponding monetary value. However, one of the main disadvantages of this technique is the uncertainty of the results obtained, caused by the high volatility of economic data. Changes in the economic world are continuous and occur very quickly, making the data obsolete just as quickly. Since this type of methodology is extensively covered in the existing literature, it has been chosen to limit the analysis only to the first three techniques listed. The three methods differ in both the purpose with which the evaluation is conducted and the type of results obtained. Therefore, the choice of the method is based on the type of problem that has to be solved. The objective of this paper is to identify the most suitable technique for evaluating the overall performance of a product system considering both its environmental and economic dimensions. In this way it

* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133, Milano.
Tel. 02.23994249, e-mail paulamartina.barbato@mail.polimi.it

Ricevuto il 20-6-2023. Correzioni richieste il 16-9-2023.
Accettazione finale il 29-9-2023.

is possible, whenever required, to assess which is the best alternative in a set of options characterized by the same function. Vector optimization and eco-efficiency do not allow to truly integrate the economic and environmental spheres, since the former evaluates independently the indicators of the two dimensions and the latter defines their relationship. The only tool able to provide a single result that reflects the overall performances of the system examined is the MADM, which includes in the analysis also the stakeholders' preferences through the use of weighting coefficients. The step of defining weights must be carried out with great care, since the results vary greatly depending on the coefficient applied. Only in this way it is possible to define weighting coefficients that truly represent the stakeholders' preferences or, in a more general sense, the existing policies without assessing incorrectly the system's

performances. The judgments made, however, are often inaccurate, causing an increase in the uncertainty of the analysis. Because of this, it has been chosen to propose, as the most suitable integration technique, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process & Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (FAHP&TOPSIS) method. This method allows for reducing the effects caused by the use of approximate data through the application of the fuzzy set theory, which is an extension of the classical notion of set. In traditional set theory, the membership of elements in a set is assessed according to a bivalent condition (an element either belongs or not to the set), while in the fuzzy set theory elements have degrees of membership.

Keyword: *LCA, LCC, sustainability, MADM, FAHP&TOPSIS*

1. Introduzione

L'incremento della popolazione globale e la crescita economica propri dell'ultimo secolo hanno portato a un aumento delle problematiche sia di carattere ambientale che sociale. La causa principale è da cercarsi nelle modalità con cui i beni vengono prodotti, consumati e, una volta diventati rifiuti, smaltiti (Commissione Europea, 2019). Il passaggio verso processi produttivi e modelli di consumo più efficienti rappresenta una delle sfide chiave del XXI secolo (Huysman et al., 2015). Le industrie giocano un ruolo fondamentale in questa transizione, poiché assumono un peso rilevante nella catena di definizione del valore di un prodotto e sono responsabili di una cospicua parte degli impatti ambientali generati. In Italia, il 21,5% delle emissioni totali di gas serra del 2020 sono da attribuirsi alle industrie del settore energetico, mentre quello manifatturiero e dei processi industriali costituiscono rispettivamente il 12,0% e l'8,1% (ISPRA, 2022).

Da oltre vent'anni, i ricercatori sviluppano e implementano tecniche differenti che consentono di integrare i risultati ottenuti dalle analisi di Life Cycle Assessment (LCA) e di Life Cycle Costing (LCC). La ricerca in quest'ambito, però, risulta piuttosto carente e non è stato ancora stabilito quale sia lo strumento generalmente più indicato. Tuttavia, la necessità di incrementare la sostenibilità dei processi produttivi è sempre più impellente e la definizione di una metodologia d'integrazione universalmente riconosciuta non può più essere posticipata.

L'obiettivo dell'articolo è svolgere una valutazione comparativa dei principali metodi d'integrazione esistenti, al fine di identificare lo strumento ritenuto più adatto alla valutazione delle prestazioni complessive di un sistema. In questo modo è possibile determina-

re, laddove richiesto, l'alternativa più sostenibile (dal punto di vista ambientale ed economico) tra una serie di opzioni aventi la medesima funzione.

2. Materiali e metodi

Grazie a un'iniziale fase di ricerca bibliografica condotta nel database Scopus utilizzando le parole chiave "*LCA, LCC, sustainability, integration methods*" (Tabella 1), si è concluso che i metodi più diffusi nell'ambito dell'integrazione delle prestazioni ambientali ed economiche sono i seguenti: *i*) ottimizzazione vettoriale; *ii*) eco-efficienza; *iii*) Metodi Decisionali Multi-Attributo (MDMA); *iv*) monetizzazione.

Uno degli svantaggi principali associati alla tecnica di monetizzazione, con la quale gli impatti ambientali generati da un processo produttivo vengono convertiti nel corrispondente valore monetario, è l'incertezza dei risultati, causata dall'elevata volatilità dei dati di natura economica. I cambiamenti nel mondo dell'economia, infatti, sono continui e avvengono molto rapidamente, rendendo obsoleti i dati con la medesima velocità. Dato inoltre che questo tipo di metodologia è ampiamente trattato in letteratura, si è scelto di limitare l'analisi solamente alle prime tre tecniche elencate, ovvero quelle dell'ottimizzazione vettoriale, dell'eco-efficienza e dei MDMA. Nei seguenti paragrafi verranno analizzate le caratteristiche di ognuna, in modo da evidenziarne i punti di forza e i limiti.

2.1. Ottimizzazione vettoriale

L'ottimizzazione vettoriale è un metodo di ottimizzazione multi-obiettivo che implica l'analisi indipendente dei diversi obiettivi da trattare (Marler e Arora, 2004). Nonostante non permetta di aggregare realmente le variabili esaminate, consente comunque di

Tabella 1. Articoli rinvenuti in cui sono investigati i possibili metodi d'integrazione dell'LCA e dell'LCC, caratterizzati in base al campo di applicazione, alla tipologia dell'analisi svolta e al metodo d'integrazione utilizzato.

Titolo	Riferimento	Settore di applicazione	Tipologia dello studio	Metodo di integrazione
A classification approach of cost-effective management measures for the improvement of watershed quality	Zanou et al. (2003)	Gestione dei rifiuti	Caso studio	Eco-efficienza
Comparison of four methods for integrating environmental and economic aspects in the end-of-life stage of a washing machine	Park et al. (2006)	Industriale	Caso studio	Ottimizzazione vettoriale Eco-efficienza MDMA Monetizzazione
Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects	Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014)	Sistemi energetici	Proposta di metodologia	MDMA
Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability	Lee et al. (2016)	Logistica	Proposta di metodologia	Eco-design
A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing	Miah et al. (2017)	Accademico	Proposta di metodologia	Ottenuto combinando i punti di forza dei seguenti metodi: MDMA, ottimizzazione di LCA e LCC, costi basati sull'LCA e LCC ambientale, eco-efficienza
Critical Analysis of Methods for Integrating Economic and Environmental Indicators	Huguet Ferran et al. (2018)	Accademico	Revisione	Ottimizzazione vettoriale Eco-efficienza MDMA
A review of monetary valuation in life cycle assessment: State of the art and future needs	Amadei et al. (2021)	Accademico	Revisione	Monetizzazione
Combining O-LCA and O-LCC to support circular economy strategies in organizations: Methodology and case study	Alejandrino et al. (2022)	Industriale	Caso studio	Eco-efficienza
Beyond climate change. Multi-attribute decision making for a sustainability assessment of energy system transformation pathways	Hottenroth et al. (2022)	Sistemi energetici	Caso studio	MDMA

svolgere un'analisi integrata dei sistemi considerati (Huguet Ferran et al., 2018).

Tale metodologia include tecniche differenti, tuttavia, quella di interesse in questo articolo è quella della determinazione dell'opzione dominante a partire da una serie di alternative. Una soluzione è definita dominante nel momento in cui il miglioramento di una delle due dimensioni, ambientale o economica che sia, non implica il peggioramento dell'altra (Allacker, 2010). A ragion di ciò, si può stabilire che l'alternativa 1 domina la 2 ($1 > 2$) unicamente se si verifica una delle seguenti relazioni: $M_1 < M_2$ e $E_1 \leq E_2$ oppure $M_1 \leq M_2$ e $E_1 < E_2$ dove la lettera E rappresenta l'indicatore ambientale, la M quello economico e il pedice i un certo sistema. Qualora un'alternativa non domini l'altra ($1 \sim 2$), non si è in grado né di stabilire quale sia l'opzione migliore né di fornire l'ordine delle preferenze senza risolvere il compromesso tra la dimensione economica e quella ambientale (Suh et al., 2005).

In questo caso è necessario ricorrere all'utilizzo di altri metodi, tra cui quello della monetizzazione e quelli decisionali multi-attributo (si veda paragrafo 2.3).

La prestazione di un'alternativa è funzione della posizione che ha all'interno di un grafico bidimensionale. In Figura 1 è proposto un caso applicativo in cui sono analizzate sei alternative diverse, ognuna delle quali è definita da una coppia di coordinate (M_i, E_i). Le opzioni dominanti sono quelle posizionate nella parte inferiore sinistra del diagramma. In particolare, in Figura 1a, l'alternativa 1 domina le altre. Per stabilire l'ordine delle preferenze delle opzioni rimanenti è necessario seguire un procedimento iterativo. Durante ogni passaggio, l'alternativa che risulta essere dominante in quello precedente va esclusa dall'insieme da analizzare ed è proprio ciò che viene fatto nel dataset riportato in Figura 1. Si procede, perciò, escludendo l'alternativa 1 dal grafico, ottenendo una situazione in cui non è possibile determinare la soluzione domi-

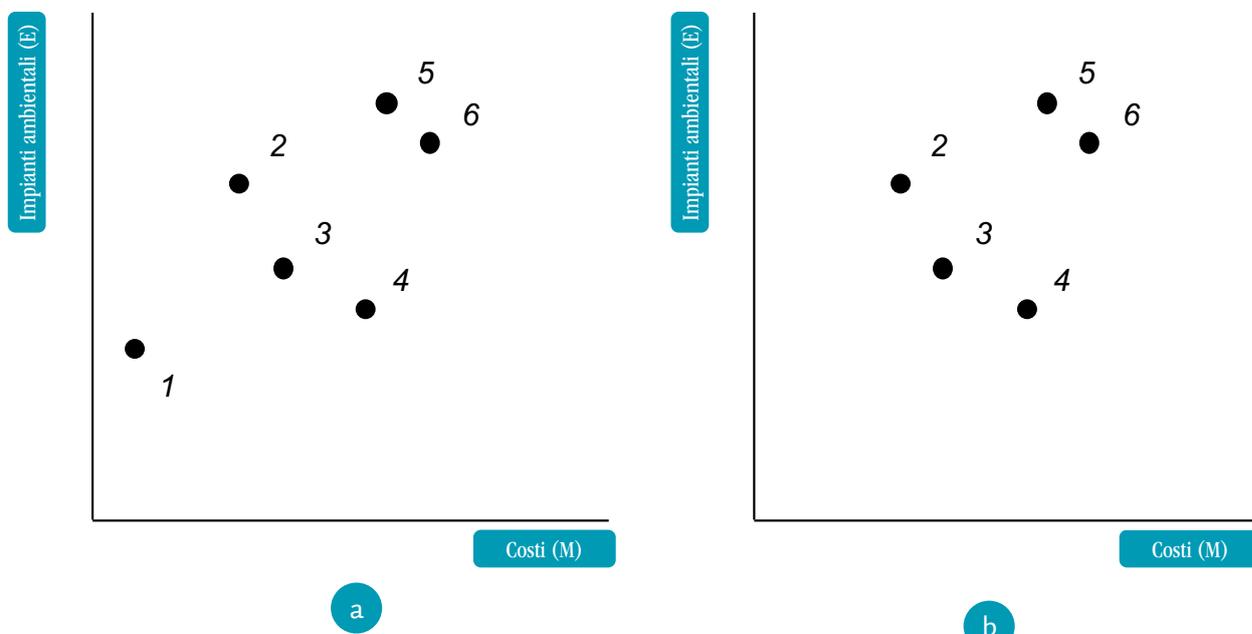


Figura 1. (a) L'alternativa dominante (1) è posta nella posizione più in basso a sinistra del diagramma. (b) Le alternative costituenti il fronte di Pareto (2, 3 e 4) non sono dominate da nessun'altra alternativa (figura originale in Huguet Ferran et al., 2018).

nante (Figura 1b). Le alternative 5 e 6 sono dominate, in quanto caratterizzate da impatti ambientali e costi superiori a quelli caratterizzanti la 2, la 3 e la 4, le quali formano il fronte di Pareto. Si può affermare che le alternative 2, 3 e 4 sono preferibili alle altre, ma non è possibile determinare l'ordine delle preferenze senza risolvere il compromesso tra economia ed ecologia. In questo caso, quindi, il procedimento iterativo consente solo di definire l'ordine parziale delle preferenze. Pertanto, si può affermare che: $1 > 2 \sim 3 \sim 4 > 5 \sim 6$, poiché $(M_1, E_1) < (M_2, E_2) \sim (M_3, E_3) \sim (M_4, E_4) < (M_5, E_5) \sim (M_6, E_6)$.

L'aggiunta di una nuova alternativa caratterizzata da $M_7 < M_2$ e $E_7 > E_5$ non impatta le relazioni esistenti. Infatti, il fronte di Pareto risulta essere costituito dal precedente (2, 3 e 4) con in aggiunta l'alternativa 7 (Figura 2). È sempre possibile affermare che $2 \sim 3 \sim 4 > 5 \sim 6$ e si può anche sostenere che $2 \sim 3 \sim 4 \sim 7$. Tuttavia, non è possibile concatenare le due relazioni ($2 \sim 3 \sim 4 \sim 7 > 5 \sim 6$), in quanto $7 \not> 5 \sim 6$.

L'ottimizzazione vettoriale è un metodo principalmente comparativo e, in quanto tale, non può essere utilizzato come tecnica per attribuire un punteggio a una certa opzione. Consente, tuttavia, di valutare le alternative in base alle prestazioni indipendenti di entrambe le dimensioni, permettendo così di identificare le soluzioni vantaggiose e quelle di compromesso (Simões et al., 2013). Grazie al fatto che non è richiesta la definizione di pesi per esprimere la preferenza

tra le dimensioni e che i decisori sono in grado di interpretare situazioni complesse rapidamente grazie al formato dei risultati, questo metodo è ampiamente utilizzato in ambito scientifico ed economico. Entrambi i settori, infatti, riconoscono l'utilità di rappresentare graficamente le soluzioni ottenute, in quanto facilita la divulgazione delle prestazioni dei sistemi esaminati (Janssen, 1991; Saling et al., 2002; Suh et al., 2005).

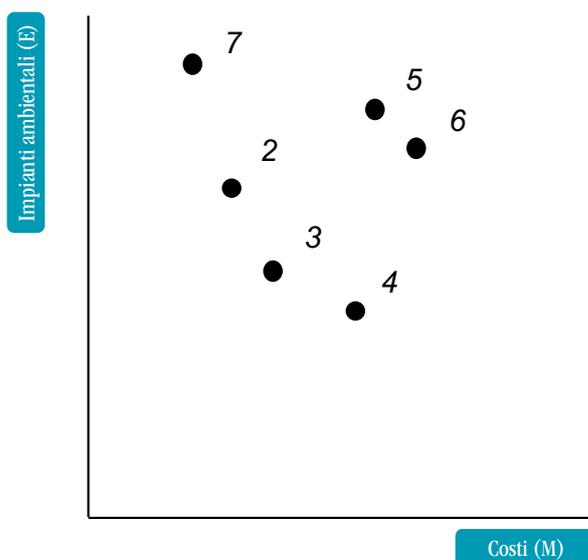


Figura 2. Rappresentazione grafica dell'insieme delle alternative da analizzare in cui si considera anche l'opzione 7, caratterizzata da $M_7 < M_2$ e $E_7 > E_5$ (figura originale in Huguet Ferran et al., 2018).

Il punto di forza di questo approccio risiede nella sua semplicità, dovuta all'assenza di ulteriori elaborazioni degli indicatori ottenuti dall'LCA e dall'LCC. Tuttavia, non consente di integrare realmente le dimensioni analizzate e non permette di determinare l'alternativa migliore nel momento in cui si ha a che fare con un insieme di soluzioni non dominanti.

2.2. Eco-efficienza

La norma ISO 14045 definisce l'eco-efficienza (EE) come “aspetto di sostenibilità che mette in relazione la prestazione ambientale di un sistema di prodotto con il valore del sistema di prodotto” (ISO 14045, 2012). Il concetto di EE può dunque essere riassunto con la seguente relazione (ISO 14045, 2012):

$$EE = \frac{\text{Valore del prodotto}}{\text{Impatto ambientale}} \quad (1)$$

Miah et al. (2017) hanno svolto una revisione della letteratura esistente finalizzata ad approfondire le modalità di applicazione di questa tecnica. È stato osservato che, tra il 2001 e il 2016, il metodo è stato adottato in 19 studi ma con differenze sostanziali in termini della metodologia utilizzata per calcolare l'EE e la modalità con cui i risultati vengono presentati. In particolare, sono emersi dodici indici diversi, ottenuti rispettivamente ricorrendo a formule differenti, e sei tipi di rappresentazioni grafiche. In questo articolo si è scelto di calcolare l'indice EE ponendo al numeratore l'indicatore ambientale e al denominatore quello economico (Equazione 2):

$$EE_i = \frac{E_i}{M_i} \quad (2)$$

Nel caso in cui gli indicatori economici e quelli ambientali siano sottoposti a un processo di normalizzazione prima della determinazione del rapporto, l'indice ottenuto risulta essere adimensionale. In letteratura (*i.e.* Kircher et al., 2007), la scelta migliore è tendenzialmente quella caratterizzata dal rapporto minore, dal momento in cui l'obiettivo principale del decisore è quello di minimizzare gli impatti ambientali per unità monetaria spesa. Tuttavia, questo concetto non può essere sempre applicato, poiché l'interpretazione dei risultati può presentare dei paradossi: di seguito sono riportati due esempi.

Innanzitutto, gli esiti ottenuti con la tecnica dell'eco-efficienza potrebbero non essere coerenti con quanto stabilito tramite l'ottimizzazione vettoriale. Un'alternativa che presenta le prestazioni migliori in entrambe le dimensioni può non rappresentare la scelta preferibile nel momento in cui se ne considera il rapporto. Si prendano in esame queste tre opzioni:

1. $(M_1, E_1) = (4, 6)$; $R_1 = 1,50$;

2. $(M_2, E_2) = (6, 10)$; $R_2 = 1,66$;

3. $(M_3, E_3) = (7, 8)$; $R_3 = 1,14$;

dove con R_i si esprime il rapporto tra l'indicatore ambientale e quello economico dell'alternativa *i-esima*. Nonostante l'opzione 1 sia caratterizzata dagli indicatori ambientali ed economici migliori, il rapporto a essa associato non è né il maggiore né il minore tra quelli ottenuti.

Un ulteriore problema si manifesta quando si decide di invertire il rapporto (R_i), considerando quindi i costi per unità di impatto ambientale. Lo scopo del decisore è di minimizzare i costi per unità di impatto ambientale, portando a scegliere anche in questo caso l'alternativa caratterizzata dall'indice minore e non da quello maggiore, come si potrebbe invece supporre nel momento in cui si sceglie di invertire l'indice. Si conclude che l'interpretazione degli indici necessita sempre di un'analisi specifica del caso esaminato, in modo da poterne definire il criterio di funzionamento. È proprio questa variabilità a costituire uno dei principali ostacoli a una semplice interpretazione dei risultati ottenuti (Huguet Ferran et al., 2018).

L'indice risultante può essere rappresentato in un grafico bidimensionale (Figura 3) ed è proporzionale al coefficiente angolare della retta che collega il punto di coordinate (M_i, E_i) , ovvero la singola alternativa, all'origine del piano cartesiano (Park et al., 2006). La pendenza della retta è funzione del rapporto degli indicatori originali ed è pari alla tangente dell'angolo θ_i , nonché a EE_i ($\tan \theta_i = E_i/M_i = EE_i$). Grazie all'inclinazione si è in grado di stabilire l'ordine delle preferenze delle varie opzioni, dove, secondo il principio “minore è meglio”, l'alternativa migliore è quella a cui corrisponde la pendenza minore.

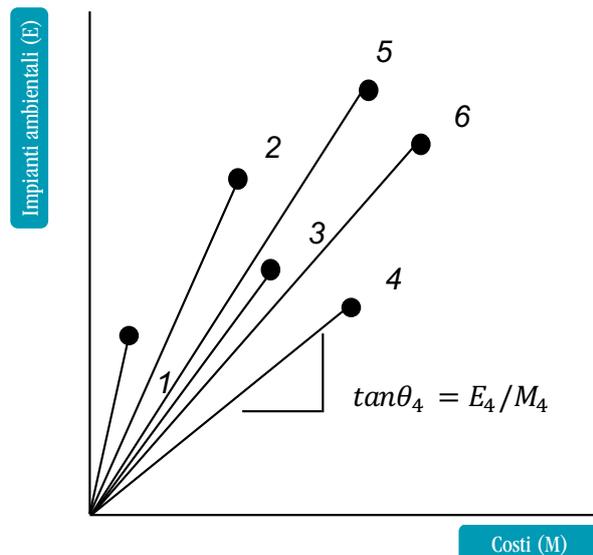


Figura 3. Rappresentazione grafica del metodo dell'eco-efficienza (figura originale in Huguet Ferran et al., 2018).

Se si considera la Figura 3, in cui viene analizzato lo stesso dataset rappresentato in Figura 1, l'opzione migliore risulta essere la 4, in quanto $EE_4 < EE_6 < EE_3 < EE_5 < EE_2 < EE_1$ e quindi $4 > 6 > 3 > 5 > 2 > 1$. Tale risultato è fortemente in contrasto con quanto ottenuto tramite l'ottimizzazione vettoriale, che vede come opzione migliore l'alternativa 1, ovvero quella peggiore considerando l'EE. Questa opposizione è dovuta alle differenze che contraddistinguono i due metodi. In particolare, il metodo dell'eco-efficienza valuta la produttività del sistema analizzato e l'obiettivo principale è di minimizzare il rapporto tra le due dimensioni. L'ottimizzazione vettoriale, invece, tratta la sfera economica e quella ambientale in maniera indipendente ed è svolta con lo scopo di minimizzare le due dimensioni contemporaneamente.

L'eco-efficienza può essere utilizzata per molteplici scopi. Park et al. (2006) hanno applicato il concetto di EE a una lavatrice durante la fase di fine vita, con il fine ultimo di determinare la strategia più idonea volta a migliorarne le prestazioni. In particolare, le alternative a cui corrispondono bassi valori dell'indice presentano un'elevata priorità di riciclo, mentre quelle a cui sono associati valori elevati devono essere migliorate tramite un processo di eco-design. Noto anche come progettazione ecocompatibile, l'eco-design rappresenta *"l'integrazione degli aspetti ambientali nella progettazione del prodotto al fine di migliorarne le prestazioni ambientali nel corso dell'intero ciclo di vita"* (Commissione Europea, 2005). Un uso alternativo del concetto di EE è stato proposto da Zanou et al. (2003) per valutare diverse strategie di gestione volte al miglioramento della qualità dei bacini idrici, in quanto permette di identificare l'alternativa migliore che consente di rispettare i limiti normativi vigenti. In generale, questo metodo è consigliato nel momento in cui si ha la necessità di ottimizzare una dimensione mantenendo l'uso ottimale dell'altra, situazione che si manifesta tipicamente quando si ha a che fare con target specifici, ambientali o economici che siano.

In conclusione, lo scopo principale dell'eco-efficienza non è descrivere le prestazioni complessive di un sistema, dato che rappresenta soltanto la relazione tra i due indicatori, ma quello di valutarne la produttività (Kircher et al., 2007; Verfaillie e Bidwell, 2000). Questa tecnica consente di ottimizzare una dimensione rispetto all'altra, infatti, Rüdener et al. (2005) ne riconoscono le potenzialità di utilizzo sia per la definizione della classifica delle preferenze che per scopi di ottimizzazione. Uno degli svantaggi principali è che non consente di svolgere una reale integrazione degli indicatori ambientali ed economici, poiché ne definisce solamente la relazione. L'interpretazione degli in-

dici è piuttosto complessa e richiede l'analisi specifica di ogni caso esaminato. Infine, è necessario considerare che non permette di risolvere il compromesso tra dimensione economica e ambientale, a meno che non sia accoppiata a ulteriori strumenti quali quello della monetizzazione. L'uso di indicatori ambientali monetizzati, infatti, rende l'eco-efficienza un indicatore diretto del trade-off tra economia e ambiente (Huguet Ferran et al., 2018).

2.3. Metodi Decisionali Multi-Attributo

I Metodi Decisionali Multi-Attributo (MDMA) sono considerati uno strumento in grado di supportare i decisori nell'approfondimento dei loro giudizi e nello svolgimento delle analisi sulle conseguenze legate alla scelta di diverse alternative (Wilkins, 2012). Consentono di determinare l'opzione migliore a partire da un set discreto di alternative e sono ampiamente utilizzati in settori quali quello della pianificazione energetica, della distribuzione delle risorse e dell'elaborazione di politiche (Li et al., 2020).

Esistono più di cinquanta metodi appartenenti ai MDMA (Watrobski et al., 2019), ognuno dei quali è caratterizzato da fondamenti teorici e proprietà tecniche ben distinte. È possibile identificare tre categorie diverse (Baumann et al., 2019):

- metodi elementari, comprendono i metodi d'informazione non preferenziale senza decisore (*i.e.* dominanza) e quelli d'informazione multi-attributo con decisore (*i.e.*: *Weighted Sum Method* (WSM), *Weighted Product Method*) (Wang et al., 2009). La metodologia più utilizzata tra i MDMA è quella del WSM, proprio per la semplicità d'implementazione che la contraddistingue, nonostante non permetta di considerare le potenziali incoerenze associate ai pesi dei diversi attributi;
- metodi a compensazione classica, anche detti della "scuola Americana", basati sull'assegnazione di un valore di utilità per ogni alternativa. Il punteggio totale associato a ciascuna opzione, dato dalla somma delle utilità marginali fissate per i vari attributi esaminati, consente di determinare l'ordine delle preferenze (Figueira et al., 2005). I metodi più utilizzati sono: *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT), *Multi-Attribute Value Theory* (MAVT), *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART), *Analytical Hierarchy Process* (AHP) e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Tra questi, quello adottato più di frequente è l'AHP, scelto solitamente quando si ha la necessità di dover aggregare le preferenze. Tuttavia, la fase di aggregazione rappresenta uno degli svantaggi principali, poiché comporta la perdita delle informazioni originali.

È anche possibile correre il rischio che si verifichi una compensazione assoluta tra i criteri, dal momento in cui buone prestazioni relative a un determinato criterio potrebbero bilanciare quelle peggiori associate ad altri, portando all'adozione di un'alternativa non ottimale (Guitouni e Martel, 1998). Inoltre, a causa delle difficoltà legate alla rappresentazione numerica di informazioni che sono spesso vaghe e imprecise (quali le preferenze), la definizione dei pesi risulta essere un processo piuttosto complesso (Wang et al., 2009);

- metodi a eliminazione, detti anche della “scuola Europea”, basati sull'eliminazione di alternative particolarmente dominanti. Il problema non viene più affrontato definendo un ordine delle preferenze, bensì progettando un sistema relazionale che le riassume (Roy, 2016). In questo caso, per assegnare un'importanza maggiore a un criterio, si ricor-

re all'uso di concetti quali quello di soglia, concordanza o discordanza (Majumder, 2015). I metodi più importanti appartenenti a questa categoria sono: *ELimination and Choice Expressing Reality* (ELECTRE), *Preference Ranking Organization METHOD for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) e *Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments* (NAIADE). I problemi principali a essi associati sono: la dipendenza da definizioni alquanto arbitrarie inerenti a ciò che costituisce l'*outranking*, la modalità con cui vengono definite e manipolate le soglie dei parametri e la mancanza di una base assiomatica (Guitouni e Martel, 1998).

È stata svolta un'indagine nel database Scopus utilizzando le parole chiave “*LCA, LCC, integration, MADM*”, al fine di stabilire quali sono i MDMA utilizzati più frequentemente. Gli studi reperiti, caratteriz-

Tabella 2. Panoramica degli articoli rinvenuti durante la fase di ricerca bibliografica, caratterizzati in base al campo di applicazione e alla tipologia di MDMA utilizzata.

Titolo	Riferimento	Settore di applicazione	Metodo
A Combined Economic and Environmental Performance Framework for Railway Infrastructure Maintenance	Lee et al. (2014)	Infrastruttura ferroviaria	SMART
Multi-objective optimization and multi-criteria analysis models and methods for problems in the energy sector	Antunes e Henriques (2016)	Sistemi energetici	-
An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey	Atilgan e Azapagic (2016)	Sistemi energetici	MAVT
Electre methods	Figueira et al. (2016)	Accademico	ELECTRE
Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues	Zavadskas et al. (2016)	Accademico	PROMETHEE
Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods for Integrated Rehabilitation Prioritization	Tscheikner-Gratl et al. (2017)	Gestione idrica	ELECTRE AHP WSM TOPSIS PROMETHEE
Assessing energy storage technology options using a multi-criteria decision analysis-based framework	Murrant e Radcliffe (2018)	Sistemi energetici	MAUT
Life cycle sustainability assessment analysis of different concrete construction techniques for residential building in Malaysia	Balasbaneh e Sher (2021)	Edilizia	AHP&TOPSIS
AHP-TOPSIS social sustainability approach for selecting supplier in construction supply chain	Marzouk e Sabbah (2021)	Logistica	AHP & TOPSIS
Beyond climate change. Multi-attribute decision making for a sustainability assessment of energy system transformation pathways	Hottenroth et al. (2022)	Sistemi energetici	WSM PROMETHEE TOPSIS
Application of FAHP-TOPSIS Method for Weighting and Prioritizing Resilience Indicators in a Combined Cycle Power Plant	Mousavi et al. (2022)	Industriale	FAHP & TOPSIS
Cohesion of Agricultural Crowdfunding Risk Prevention under Sustainable Development Based on Gray-Rough Set and FAHP-TOPSIS	Xue e Li (2022)	Agricoltura	FAHP & TOPSIS
Assessing retrofit strategies for mosque buildings using TOPSIS	Marzouk et al. (2023)	Edilizia	AHP & TOPSIS

zati in base al campo di applicazione e alla tipologia di MDMA utilizzata per integrare i risultati ottenuti dall'LCA e dall'LCC, sono riassunti in Tabella 2. Gli esiti di quattro ricerche in particolare (Antunes e Henriques (2016), Tscheikner-Gratl et al. (2017), Miah et al. (2017) e Hottenroth et al. (2022)) hanno portato ad approfondire i seguenti strumenti: *i*) WSM; *ii*) AHP; *iii*) TOPSIS; *iv*) AHP&TOPSIS; *v*) FuzzyAHP&TOPSIS (FAHP&TOPSIS). Nei prossimi sottoparagrafi verranno analizzate le caratteristiche di ognuno, in modo da evidenziarne i punti di forza e i limiti.

2.3.1. Weighted Sum Methods (WSM)

Il metodo WSM, noto anche come *Simple Additive Weighting* (SAW), è il più semplice tra i MDMA che ricorrono all'aggregazione diretta. Questa metodologia consente di valutare le alternative in base a un punteggio ottenuto eseguendo la somma pesata di tutti gli attributi associati a ciascuna di esse. I fattori di ponderazione sono fissati in base alle preferenze del decisore ed è proprio in questo modo che viene risolto il compromesso tra economia ed ecologia. Grazie al WSM, le opzioni possono essere valutate considerando sia le prestazioni complessive del sistema che l'importanza relativa delle variabili esaminate.

Per fare sì che tutte le alternative siano di entità paragonabile, i punteggi calcolati devono essere adimensionali. Pertanto, è necessario sottoporre la matrice decisionale (X) a un processo di normalizzazione, il quale è funzione del tipo di attributo considerato, dato che può rappresentare un beneficio o un costo. Il valore normalizzato dell'attributo *j-esimo* dell'alternativa *i-esima* (a_{ij}) si determina applicando la seguente formula (Equazione 3) (Yeh e Willis, 2001):

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}, & \text{se } j \text{ un beneficio}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}, & \text{se } j \text{ un costo}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

dove x_{ij} rappresenta il valore dell'attributo *j-esimo* dell'alternativa *i-esima*. Ne consegue che il punteggio totale rappresentativo di ciascuna alternativa (v_i) può essere determinato applicando la seguente formula (Yeh e Willis, 2001):

$$v_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot a_{ij}); i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

dove w_j è il fattore di ponderazione dell'attributo *j-esimo*.

I punteggi calcolati consentono di definire una classifica delle alternative in maniera completa e inequivocabile (Huguet Ferran et al., 2018). Tuttavia, è necessario considerare che i valori ottenuti dipendono negativamente dai compromessi che si hanno tra le prestazioni economiche e quelle ambientali (Huppés

e Ishikawa, 2005), in quanto portano a un aumento dell'incertezza dei risultati.

Tra i MDMA, il WSM risulta essere il più semplice e il più utilizzato (Park et al., 2006; Diaz-Balteiro et al., 2016), in quanto sia la fase d'implementazione che quella di interpretazione dei risultati non presentano difficoltà intrinseche. Lo svantaggio principale è costituito dalla soggettività relativa della definizione arbitraria dei pesi, poiché comporta una diminuzione dell'affidabilità dei risultati ottenuti.

2.3.2. Analytical Hierarchy Process (AHP)

Il metodo AHP (Saaty, 1980) è comunemente utilizzato nei processi decisionali che richiedono l'integrazione di dati quantitativi, come i valori numerici, e fattori qualitativi meno tangibili, quali i giudizi (Noh e Lee, 2003). Questo strumento permette di determinare i coefficienti di ponderazione associati ai vari fattori analizzati in base alle preferenze dei decisori. Il processo grazie al quale si definiscono i pesi degli attributi si basa sullo svolgimento di confronti a coppie.

L'implementazione del metodo proposto da Zahedi (1986) si rifà alla seguente struttura:

- scomposizione del problema complesso in una serie di elementi più semplici e gestibili con la conseguente definizione di una gerarchia;
- raccolta dei dati di input per tutti gli attributi delle varie alternative, così da definire le basi per lo svolgimento dei confronti a coppie;
- definizione delle matrici dei confronti a coppie per ogni livello della gerarchia;
- aggregazione dei pesi e dei punteggi al fine di determinare l'ordine delle preferenze delle alternative;
- analisi di sensibilità per valutare l'affidabilità e la validità dei risultati ottenuti.

Il passaggio a) del procedimento prevede la definizione di una gerarchia avente la seguente struttura (Figura 4):

- livello I, ovvero l'obiettivo da raggiungere;
- livello II, composto dai criteri, nonché gli attributi grazie ai quali è possibile valutare le alternative (in questo articolo, le dimensioni ambientale ed economica);
- livello III, formato dai sotto-criteri, ovvero i fattori considerati per caratterizzare i criteri.

Per ogni livello della gerarchia, i decisori esprimono le proprie preferenze confrontando ogni fattore che lo costituisce sia con sé stesso che con i restanti criteri. Il confronto a coppie viene svolto ricorrendo all'uso della scala semantica di Saaty (Tabella 3), ovvero una scala di valutazione che va da 1 a 9 in cui il valore numerico risultante è funzione dell'importanza di

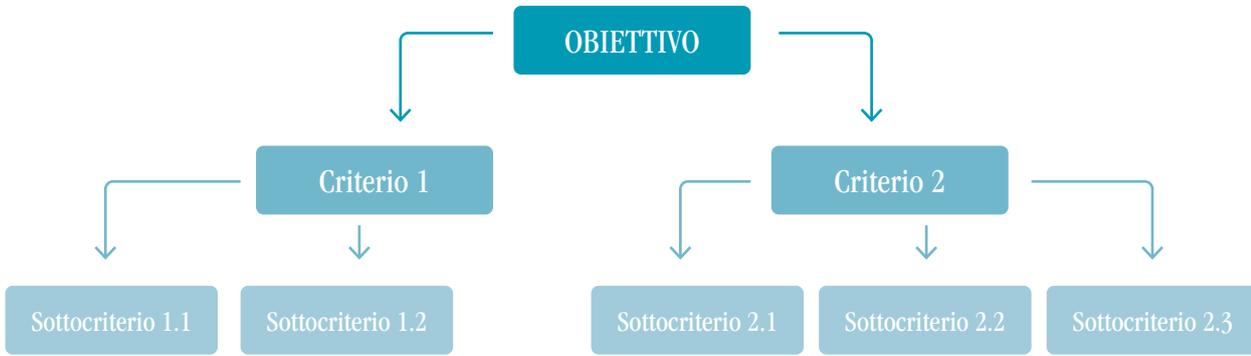


Figura 4. Struttura gerarchica identificata.

un elemento rispetto a un altro. Se due fattori hanno la stessa rilevanza, il risultato del confronto è pari a 1; all'aumentare dell'importanza, si osserva un incremento del valore numerico. In questo modo è possibile convertire informazioni qualitative in informazioni quantitative.

I risultati, ottenuti svolgendo i confronti a coppie di n criteri appartenenti allo stesso livello gerarchico, vengono riportati in una matrice quadrata (A), detta dei confronti a coppie, di dimensioni $n \times n$ avente la seguente struttura:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ii} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ij} \neq 0 \quad (5)$$

dove con a_{ij} si indica l'intensità dell'importanza relativa della componente i -esima rispetto al fattore j -esimo, stabilita tramite la scala semantica di Saaty. Come si può notare dall'Equazione 5, la matrice gode sempre della proprietà di reciprocità ($a_{ji} = 1/a_{ij} \forall i, j$) e gli elementi che costituiscono la diagonale principale sono tutti pari a 1, dato che la componente viene paragonata a sé stessa. Esistono diverse tecniche matematiche utilizzabili per determinare, a partire dalla matri-

ce dei confronti a coppie, i coefficienti di ponderazione associati a ciascun criterio esaminato, tra cui: quella dell'autovalore, della media geometrica e della media aritmetica.

Le valutazioni sono spesso influenzate da fattori quali: la limitata disponibilità delle informazioni, possibili errori compiuti durante l'inserimento dei dati e la soggettività legata alla determinazione dell'importanza di un elemento rispetto a un altro. Per questo motivo è necessario verificare che i pesi stimati in base ai giudizi espressi dai decisori siano accettabili. Il *Consistency Ratio* (CR), calcolato secondo l'Equazione 6, è un parametro che permette di stabilire se le valutazioni svolte sono corrette o meno. Se il CR è inferiore a 0,1, i pesi sono considerati ammissibili. Altrimenti, è necessario apportare modifiche alla matrice dei confronti fino a quando la verifica non risulta soddisfatta (Saaty, 1990).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Come si può notare dall'Equazione 6, il CR è funzione di altri due parametri, ovvero il *Consistency Index* (CI) e il *Random Consistency Index* (RI). Tramite il CI, calcolato secondo l'Equazione 7, è possibile determinare la consistenza della matrice del confronto a coppie. L'RI è invece definito come la media dei CI di diverse matrici reciproche dello stesso ordine generate in maniera casuale. I suoi valori sono tabulati (Tabella 4) e dipendono dall'ordine della matrice analizzata (Saaty, 1990).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

λ_{max} rappresenta l'autovalore massimo della matrice del confronto a coppie. La matrice è perfettamente consistente solo quando il CI è pari a zero, poiché l'incremento della discrepanza tra λ_{max} e n corrisponde a un aumento delle contraddizioni effettuate dai decisori durante la valutazione.

Tabella 3. Scala semantica di Saaty (tabella originale in Saaty, 1980).

Scala	Definizione dei valori
1	I fattori sono egualmente importanti
3	Il primo fattore è più importante del secondo
5	Il primo fattore è molto più importante del secondo
7	Il primo fattore ha un'importanza decisamente maggiore rispetto a quella del secondo
9	Il primo fattore è caratterizzato da una superiorità assoluta rispetto al secondo
2, 4, 6, 8	Valori intermedi

Tabella 4. Valori di RI in funzione dell'ordine della matrice dei confronti esaminata (tabella originale in Saaty, 1990).

Ordine della matrice	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0,58	0,89	1,12	1,26	1,36	1,41

L'ultimo passaggio del procedimento prevede la determinazione dei punteggi globali. La priorità complessiva di una certa opzione si calcola effettuando, in un primo momento, il prodotto tra il peso relativo di ogni elemento della matrice di un certo livello della gerarchia e il peso associato al fattore a esso corrispondente del livello superiore. Una volta determinato il peso complessivo, lo si moltiplica per il corrispondente valore dell'indicatore di una data opzione. Infine, si sommano i punteggi di tutti gli attributi caratterizzanti un'alternativa, in modo da ottenere i punteggi globali associati a ciascuna di esse, i quali sono compresi nell'intervallo [0, 1] (previa normalizzazione). L'alternativa più indicata risulta, perciò, essere quella caratterizzata dal punteggio più elevato.

È opportuno svolgere un'analisi di sensibilità al fine di verificare la robustezza dei risultati, verificando se le variazioni nei pesi dei criteri influenzano gli esiti dello studio. Se ciò accade, è importante specificare le condizioni sotto cui le conclusioni ottenute rimangono valide.

2.3.3. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

Il metodo TOPSIS, introdotto da Hwang e Yoon (1981), si basa sulla creazione di due alternative artificiali e non realizzabili (A^+ e A^-). Queste sono utilizzate come punti di riferimento, in quanto rappresentano rispettivamente la soluzione ideale al problema esaminato e quella ideale-negativa. In particolare, A^+ è costituita dai valori migliori dei vari attributi che caratterizzano le opzioni, mentre A^- è formata dai peggiori. L'obiettivo è scegliere l'alternativa che presenta contemporaneamente la distanza minore da A^+ e quella maggiore da A^- , poiché A^+ massimizza i criteri di beneficio e minimizza quelli di costo, mentre A^- massimizza i criteri di costo e minimizza quelli di beneficio (Behzadian et al., 2012).

Se si considerano m alternative caratterizzate da n attributi, la singola opzione (A_i) può essere rappresentata come:

$$A_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}), i = 1, \dots, m \quad (8)$$

dove x_{ij} esprime la prestazione dell'alternativa i -esima rispetto all'attributo j -esimo.

Ne consegue che il procedimento da adottare per l'implementazione di questo metodo può essere riassunto come segue (Hwang e Yoon, 1981):

- costruzione della matrice da utilizzare durante l'implementazione del TOPSIS, ovvero della matrice decisionale (X) di dimensioni $i \times j$, in cui i rappresenta il numero di alternative ($i=1,2,\dots,m$) e j il numero di attributi che caratterizzano le opzioni ($j=1,2,\dots,n$):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & x_{st} & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

dove x_{ij} corrisponde al valore della prestazione dell'alternativa i -esima rispetto all'attributo j -esimo;

- normalizzazione della matrice decisionale:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

dove a_{ij} è il valore normalizzato dell'alternativa i -esima rispetto all'attributo j -esimo;

- pesatura della matrice decisionale normalizzata previa definizione dei coefficienti di ponderazione associati a ogni attributo:

$$r_{ij} = a_{ij} \cdot w_j, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

dove r_{ij} rappresenta il valore pesato e normalizzato dell'alternativa i -esima rispetto all'attributo j -esimo.

Non è specificata la modalità con cui sono determinati i pesi, possono essere definiti sia in maniera arbitraria che in base al parere dei decisori;

- determinazione della soluzione ideale (A^+) e di quella ideale-negativa (A^-):

$$A^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+\} = \left\{ \left(\max_{j \in I'} r_{ij} \mid j \in I' \right), \left(\min_{j \in I''} r_{ij} \mid j \in I'' \right) \right\} \quad (12)$$

$$A^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-\} = \left\{ \left(\min_{j \in I'} r_{ij} \mid j \in I' \right), \left(\max_{j \in I''} r_{ij} \mid j \in I'' \right) \right\} \quad (13)$$

dove I' è associato ai criteri che costituiscono un beneficio e I'' a quelli che rappresentano dei costi;

- calcolo della distanza dell'alternativa i -esima dalla soluzione ideale (D_i^+) e da quella ideale-negativa (D_i^-);

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

- determinazione del coefficiente di vicinanza relativa dell'alternativa i -esima (C_i^+), il quale rappre-

senta la distanza tra il caso esaminato e le due soluzioni artificiali create:

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i = 1, 2, \dots, m \text{ e } 0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad (16)$$

g) definizione della classifica delle preferenze in ordine decrescente: l'alternativa migliore risulta essere quella a cui corrisponde il valore maggiore di C_i^+ , poiché se $C_i^+ = 1$ allora $A_i = A^+$.

Per poter applicare la metodologia correttamente, è necessario che i valori utilizzati siano numerici, monotoni crescenti o decrescenti e caratterizzati da unità commensurabili (Behzadian et al., 2012). Lo svantaggio principale di questa tecnica, riconosciuto da diversi autori (De Farias Aires e Ferreira (2018), (2019)), risiede nel fatto che può essere soggetta a una variazione dell'ordine delle preferenze nel momento in cui si aggiunge o si elimina un'opzione all'interno del processo decisionale. Pertanto, la valutazione di una certa alternativa dipende dall'analisi di tutte le altre opzioni considerate (Hottenroth et al., 2022). Per risolvere questo problema, Yang (2020) propone di implementare il processo di normalizzazione adottando una prospettiva globale. Questa tecnica, detta NR-TOPSIS, richiede la conoscenza del valore statistico minimo e massimo di ogni attributo da analizzare.

2.3.4. AHP&TOPSIS

Una delle difficoltà principali dei MDMA è la definizione dei coefficienti di ponderazione associati ai diversi attributi. La tecnica dell'AHP può essere considerata una possibile soluzione, in quanto permette di determinare i pesi in base ai giudizi degli esperti del campo di ricerca esaminato (Saaty, 2008). La combinazione di questo metodo con altri MDMA costituisce una buona strategia, poiché, oltre ad aumentare l'accuratezza dell'analisi, consente anche di compensare le carenze associate alla singola tecnica. Il metodo ibrido AHP&TOPSIS, ad esempio, permette di determinare i pesi degli attributi tramite l'AHP e di valutare con il TOPSIS ogni alternativa in funzione dei valo-

ri dei criteri esaminati e della loro importanza. L'applicazione di un metodo ibrido consente di sfruttare i vantaggi associati alle diverse metodologie che lo costituiscono. In particolare, il TOPSIS si contraddistingue per la semplicità d'implementazione, l'universalità e il fatto che per ogni opzione si determina la distanza dalla soluzione ideale, mentre l'AHP consente di ridurre la soggettività indotta dalla componente umana e di verificare l'inconsistenza dei dati (Marzouk e Sabbah, 2021).

2.3.5. Fuzzy AHP&TOPSIS (FAHP&TOPSIS)

Il concetto di insieme fuzzy, sviluppato con l'intento sia di rappresentare numericamente i termini linguistici che di gestire le indecisioni dovute al giudizio umano, ha riscontrato un notevole successo negli ultimi due decenni (Madi et al., 2016). Introdotta da Zadeh (1965) come estensione del concetto classico di insieme, la teoria degli insiemi fuzzy si propone di considerare l'ambiguità propria del linguaggio umano (Zimmermann, 2010). Si distingue dall'approccio classico poiché quest'ultimo valuta l'appartenenza di un elemento a un insieme in termini binari secondo una condizione bivalente, ovvero un elemento può appartenere o no all'insieme considerato. Negli insiemi fuzzy, invece, gli elementi hanno dei gradi di appartenenza.

Nelle applicazioni ingegneristiche, solitamente, le valutazioni linguistiche vengono espresse come numeri fuzzy ricorrendo alla scala di Gumus (Gumus, 2009) (Tabella 5). Caratterizzata da una logica simile a quella proposta da Saaty, questa permette di associare a ogni criterio analizzato una scala di numeri fuzzy in base all'importanza relativa di un elemento rispetto a un altro. Per ogni preferenza si determina, quindi, una terna di numeri naturali consecutivi in cui la cifra centrale corrisponde a quella stabilita con la scala semantica di Saaty, mentre le rimanenti due rappresentano il valore minore possibile e quello maggiore corrispondente ai giudizi espressi. Questa metodologia porta alla definizione di matrici del confronto fuzzy

Tabella 5. Numeri fuzzy corrispondenti ai giudizi espressi (tabella originale in Gumus, 2009).

Numero	Definizione dei valori	Scala del numero fuzzy
1	I fattori sono egualmente importanti	(1, 1, 1)
3	Il primo fattore è più importante del secondo	(2, 3, 4)
5	Il primo fattore è molto più importante del secondo	(4, 5, 6)
7	Il primo fattore ha un'importanza decisamente maggiore rispetto a quella del secondo	(6, 7, 8)
9	Il primo fattore è caratterizzato da una superiorità assoluta rispetto al secondo	(8, 9, 10)
2, 4, 6, 8	Valori intermedi	(1, 2, 3), (3, 4, 5), (5, 6, 7), (7, 8, 9)

dalle quali si determinano dei pesi fuzzy, i quali vanno sottoposti a un processo di *defuzzification* al fine di ottenere coefficienti di ponderazione costituiti da un singolo valore. Il vantaggio associato all'applicazione della teoria degli insiemi fuzzy è rappresentato dalla riduzione dell'incertezza associata ai pesi calcolati, in quanto determinati effettuando la media dei tre valori che costituiscono i coefficienti di ponderazione fuzzy ottenuti.

Nonostante il metodo AHP sia uno dei MDMA più utilizzati per la determinazione dei pesi dei criteri analizzati, è ampiamente criticato per la sua incapacità di gestire l'incertezza dovuta all'associazione di valori numerici ai giudizi dei decisori. Tale limitazione può essere superata con la tecnica FAHP, la quale combina il metodo tradizionale AHP alla teoria degli insiemi fuzzy. Si introduce così una variante del metodo ibrido AHP&TOPSIS, ovvero quella del FAHP&TOPSIS, il cui procedimento è costituito dalle seguenti fasi:

- a) definizione della struttura gerarchica del problema (si veda sottoparagrafo 2.3.2);
- b) costruzione della matrice del confronto fuzzy per ogni livello della gerarchia utilizzando la scala proposta da Gumus (2009) (Tabella 5) per determinare i numeri fuzzy corrispondenti ai giudizi verbali effettuati dai decisori sui vari criteri analizzati;
- c) determinazione dei pesi fuzzy ($\tilde{w}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$) dei criteri svolgendo la media geometrica di ogni riga della matrice del confronto fuzzy;
- d) *defuzzification* dei coefficienti di ponderazione, ovvero conversione dei pesi fuzzy in numeri non-fuzzy (k_i). Questo passaggio è svolto ricorrendo all'approccio del centro dell'area proposto da Chou e Chang (2008):

$$k_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (17)$$

- e) normalizzazione dei pesi determinati per ogni criterio appartenente a un dato livello della gerarchia:

$$w_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (18)$$

- f) determinazione dei pesi complessivi degli attributi che caratterizzano le alternative. Questi sono ottenuti svolgendo il prodotto tra i pesi determinati per il livello II e quelli del livello III della gerarchia (si veda sottoparagrafo 2.3.2);
- g) valutazione delle opzioni tramite l'implementazione del metodo TOPSIS e successiva definizione della classifica delle preferenze (si veda sottoparagrafo 2.3.3).

3. Risultati e discussione

Nei paragrafi precedenti, sono stati presentati e analizzati i principali metodi utilizzati per l'integrazione degli indicatori economici e ambientali. Si riporta di seguito una valutazione complessiva in cui si riassumono i criteri più rilevanti che definiscono le prestazioni di ciascuno.

3.1. Confronto dei metodi d'integrazione

L'ottimizzazione vettoriale, l'eco-efficienza e i MDMA differiscono sia per lo scopo con cui viene svolta l'analisi che per la tipologia dei risultati ottenuti. Pertanto, non è possibile stabilire a priori quale sia il metodo d'integrazione migliore, dato che la scelta è funzione del tipo di informazioni che si vuole determinare. Le caratteristiche principali di ciascuno sono riassunte in Tabella 6.

L'ottimizzazione vettoriale valuta in maniera indipendente entrambi gli indicatori ed è volta all'identificazione delle soluzioni dominanti, permettendo così di determinare le situazioni di vantaggio e quelle di compromesso. Non restituisce un indicatore rappresentativo delle prestazioni complessive del sistema e, a causa dei limiti associati al principio di dominanza, potrebbe portare alla definizione di un ordine delle preferenze solamente parziale. L'eco-efficienza evidenzia il rapporto tra la sfera economica e quella ambientale, fornendo informazioni sulla produttività del sistema analizzato e permettendo di ottimizzare una dimensione rispetto all'altra. Tuttavia, non consente di svolgere una reale integrazione degli indicatori, poiché ne definisce solamente la relazione. I MDMA valutano un certo sistema secondo le preferenze dei decisori e permettono di ottenere dei risultati che ne riflettono le prestazioni complessive.

Per quanto riguarda l'interpretazione dei risultati, l'ottimizzazione vettoriale e i MDMA consentono ai decisori coinvolti di comprendere piuttosto facilmente gli esiti. Tuttavia, è importante considerare che l'uso dei coefficienti di ponderazione può ostacolare la comprensione dei risultati, poiché si è rivelata essere una questione insidiosa in diversi settori (Janssen, 1991). L'interpretazione degli esiti ottenuti con il metodo dell'eco-efficienza non è così banale, dato che la connotazione degli indici non può essere derivata direttamente da quella degli indicatori originali, ma necessita di un'analisi specifica del problema esaminato.

Sia i MDMA che l'eco-efficienza sono metodi compensativi, questo implica che le buone prestazioni in un determinato criterio potrebbero bilanciare quelle peggiori associate ad altri, portando all'adozione di un'alternativa non ottimale. Al contrario, l'ottimizzazione vettoriale è una tecnica non compensativa, in quanto un'alternativa per essere definita dominante

deve presentare delle buone prestazioni sia nella sfera economica che in quella ambientale.

I metodi d'integrazione, per poter essere considerati coerenti, devono mantenere inalterata la classifica delle alternative anche quando si verificano cambiamenti nell'insieme delle opzioni analizzato (Triantaphyllou, 2000). Nel momento in cui i dati da valutare sono sottoposti a normalizzazione interna, ovvero a un processo di trasformazione che ne modifica la scala di misurazione, non è più soddisfatta l'indipendenza dalle alternative irrilevanti, poiché i valori degli indicatori dipendono dall'insieme completo delle opzioni (Norris, 2001; Nardo et al., 2005; Suh et al., 2005). L'ottimizzazione vettoriale e l'eco-efficienza non sono soggette al processo di scalabilità, preservando di conseguenza la classifica delle alternative identificata (Huguet Ferran et al., 2018). Non è possibile affermare lo stesso per i MDMA, i quali sono influenzati dal processo di scalabilità. Qualora si scelga di utilizzare questa metodologia, è necessario che i coefficienti di ponderazione e i fattori di normalizzazione siano congruenti, poiché dipendenti l'uno dall'altro (Norris, 2001). In questo caso, la dipendenza dalle alternative non rilevanti dev'essere affrontata *“tenendo esplicitamente conto delle prestazioni specifiche delle alternative”* durante la definizione dei pesi (Norris, 2001).

3.2. Confronto dei MDMA

Nel paragrafo 2.3 sono stati descritti i MDMA ritenuti più indicati per l'integrazione degli indicatori economici e di quelli ambientali. I metodi analizzati sono accumulati tutti dallo stesso scopo: la valutazione delle prestazioni di un determinato sistema considerando le preferenze dei decisori. Le differenze fra i metodi risiedono nelle modalità con cui l'obiettivo viene raggiunto. Nel seguente paragrafo si riassumono i vantaggi e gli svantaggi associati a ciascuno di loro.

Il WSM è lo strumento più semplice fra tutti, consente di gestire un grande numero di criteri ed è ca-

ratterizzato da un'elevata trasparenza. Per questi motivi risulta essere il MDMA più utilizzato, nonostante permetta di svolgere solo valutazioni semplici. Lo svantaggio principale di questo strumento è la determinazione arbitraria dei coefficienti di ponderazione associati alle variabili, poiché contribuisce a ridurre l'affidabilità dei risultati.

L'AHP è un metodo gerarchico che permette di considerare direttamente le preferenze dei decisori grazie alla definizione, in base allo svolgimento di confronti a coppie, dei pesi degli attributi. Il processo di determinazione dei coefficienti di ponderazione dev'essere svolto con estrema cura, poiché i risultati variano notevolmente in funzione dei pesi applicati. Solo in questo modo si è in grado di determinare dei pesi che rispecchino effettivamente le preferenze dei decisori oppure, secondo un discorso più generale, le politiche in atto. Il livello di complessità del metodo aumenta proporzionalmente ai criteri da considerare, per questo motivo ne è consigliato l'uso solo quando un basso numero di variabili è preso in considerazione. Dal momento che il procedimento garantisce, tramite la determinazione del *Consistency Index*, la consistenza della matrice del confronto, è possibile affermare lo stesso anche per i risultati ottenuti. Il metodo, però, non è trasparente, dato che la fase di aggregazione comporta la perdita delle informazioni originali e la possibilità che si verifichi una compensazione assoluta tra i criteri.

Il metodo TOPSIS fornisce informazioni sulla distanza di una certa opzione dalla soluzione ideale del problema analizzato. Consente di gestire un numero elevato di criteri e di considerare le preferenze dei decisori tramite i coefficienti di ponderazione, ma, a differenza dell'AHP, non è specificata la modalità con cui questi sono determinati. A ragion di ciò, si è scelto di considerare il metodo ibrido AHP&TOPSIS, il quale definisce i pesi in base ai giudizi dei decisori con l'AHP per poi utilizzarli durante il TOPSIS al fine di valuta-

Tabella 6. Caratteristiche principali dei metodi d'integrazione analizzati.

	Ottimizzazione vettoriale	Eco-efficienza	MDMA
Oggetto dell'analisi	Dominanza	Relazione/produttività	Prestazioni complessive
Classifica delle preferenze	Parziale nel caso in cui si abbia a che fare con soluzioni non-dominanti	Completa e inequivocabile	Completa e inequivocabile
Principio di compensazione	No	Si	Si
Interpretazione dei risultati	Semplice	Complessa	Semplice
Indipendenza della classifica definita dalle alternative irrilevanti	Indipendente	Indipendente	Indipendente a patto che i coefficienti di ponderazione siano co-trasformati
Inclusione delle preferenze dei decisori	No	No	Si

re le alternative esaminate. Grazie all'implementazione di un metodo ibrido, è possibile colmare le carenze delle singole tecniche e sfruttare i vantaggi associati a entrambe.

Lo svantaggio principale di tutte le metodologie viste fino a ora è che necessitano di dati esatti per la loro implementazione. Tuttavia, i coefficienti di pesatura utilizzati non sono precisi, poiché definiti in base ai giudizi dei decisori, ovvero secondo un linguaggio che è intrinsecamente impreciso. Perciò si è scelto di analizzare la teoria degli insiemi fuzzy e di applicarla al metodo AHP (FAHP). La tecnica ibrida FAHP&TOPSIS è la più complessa tra le metodologie esaminate, ma è l'unica che permette di includere l'incertezza dei dati all'interno dell'analisi. È per questa ragione che si è scelto di considerarla come lo strumento tra i MDMA analizzati più adatto alla valutazione delle prestazioni complessive di un sistema.

4. Conclusioni

Da anni è ormai possibile stimare i costi e gli impatti ambientali generati da qualsiasi filiera produttiva grazie alle metodologie di LCC e di LCA. Tuttavia, non è ancora stato identificato quale sia il metodo migliore per integrare i risultati ottenuti da queste due analisi, in grado di valutare un sistema considerando contemporaneamente la sfera economica e quella ambientale.

In seguito a una revisione della letteratura esistente, sono state selezionate e approfondite tre tipologie di tecniche d'integrazione: *i*) ottimizzazione vettoriale; *ii*) eco-efficienza; *iii*) MDMA. La prima determina l'opzione dominante in un insieme di alternative senza effettivamente integrare la dimensione economica e quella ambientale. L'eco-efficienza evidenzia il rapporto tra le due sfere, fornendo informazioni sulla produttività del sistema. I MDMA permettono di valutare le prestazioni complessive della filiera esaminata, includendo nell'analisi le preferenze dei decisori.

Le tre metodologie differiscono sia per lo scopo con cui viene condotto lo studio che per la tipologia di risultati ottenuti. Non è possibile stabilire a priori quale sia la tecnica migliore, poiché la scelta dipende dal tipo di informazioni che si vuole ottenere. Tuttavia, a valle delle considerazioni emerse dall'analisi bibliografica, si raccomanda l'utilizzo di uno strumento in particolare, ovvero quello dei MDMA. Questi sono gli unici tra i metodi analizzati in grado di integrare realmente la dimensione economica e quella ambientale di un sistema e di rappresentarne le prestazioni in un unico punteggio. Inoltre, il solo tra i MDMA approfonditi in grado di includere nell'analisi l'incertezza generata dall'uso di un linguaggio impreciso è il metodo FAHP&TOPSIS. Questo strumento restituisce un punteggio compreso tra 0 e 1, dove 1 rappresenta la solu-

zione ideale e 0 lo scenario peggiore, pertanto l'alternativa migliore risulta essere quella caratterizzata dal valore maggiore. Grazie al formato dei risultati è possibile definire in maniera completa e inequivocabile la classifica delle preferenze delle opzioni considerate.

In quest'articolo sono stati investigati prevalentemente gli strumenti degli MDMA appartenenti alla "scuola Americana". Tuttavia, sarebbe molto interessante approfondire anche quelli "della scuola Europea", i quali permettono di modellare ogni preferenza individualmente secondo funzioni matematiche e parametri più indicati. Questi, però, necessitano di un'ampia conoscenza dello strumento e di una grande esperienza di modellazione, a differenza di quelli "della scuola Americana", che sono caratterizzati da una maggiore semplicità d'implementazione. Solamente dopo aver approfondito debitamente anche questa tipologia di strumenti, è possibile stabilire quale sia il metodo più indicato tra i MDMA in grado di rappresentare le prestazioni di un sistema produttivo.

In un contesto in cui l'economia circolare rappresenta una delle soluzioni principali alla riduzione dell'impatto antropico sul pianeta, è necessario investire maggiori risorse in quest'ambito di ricerca, poiché ancora in fase embrionale. I risultati ottenuti potrebbero portare alla definizione di una tecnica standardizzata in grado di determinare le prestazioni di un qualsiasi processo produttivo e di scegliere, a partire da una serie di opzioni aventi la medesima funzione, la soluzione più sostenibile sia dal punto di vista ambientale che economico. Per quanto ricopra già un ruolo importante nella società odierna, l'integrazione delle due dimensioni in un futuro non molto distante sarà indispensabile. ■

Riferimenti bibliografici

- Allacker K. (2010) Sustainable building. In: The Development of an Evaluation Method. Tesi di dottorato, K.U. Leuven.
- Alejandrino C., Mercante I.T. e Bovea M.D. (2022) Combining O-LCA and O-LCC to support circular economy strategies in organizations: Methodology and case study. *Journal of Cleaner Production* 336: 130365.
- Amadei A.M., De Laurentiis V. e Sala S. (2021) A review of monetary valuation in life cycle assessment: State of the art and future needs. *Journal of Cleaner Production* 329: 129668.
- Antunes C.H. e Henriques C.O. (2016) Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Analysis Models and Methods for Problems in the Energy Sector. In: Greco S., Ehrgott M. e Figueira J. (eds) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer, 1067-1166.

- Atilgan B. e Azapagic A. (2016) An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy* 93: 168-186.
- Balasbaneh A.T. e Sher W. (2021) Life cycle sustainability assessment analysis of different concrete construction techniques for residential building in Malaysia. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26: 1301-1318.
- Baumann M., Weil M., Peters J.F., Chibeles-Martins N. e Moniz A.B. (2019) A review of multi-criteria decision-making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107: 516-534.
- Behzadian M., Otaghsara S. K., Yazdani M. e Ignatius J. (2012) A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications* 39(17): 13051-13069.
- Chou S.W. e Chang, Y.C. (2008) The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits. *Decision Support Systems* 46(1): 149-157.
- Commissione Europea (2005) Direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 6 luglio 2005 relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia e recante modifica della direttiva 92/42/CEE del Consiglio e delle direttive 96/57/CE e 2000/55/CE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- Commissione Europea (2019) The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- De Farias Aires R.F. e Ferreira L. (2018) The rank reversal problem in multi-criteria decision making: a literature review. *Pesquisa Operacional* 38(2): 331-362.
- De Farias Aires R.F. e Ferreira L. (2019) A new approach to avoid rank reversal cases in the TOPSIS method. *Computers & Industrial Engineering* 132: 84-97.
- Diaz-Balteiro L., González-Pachón J. e Romero C. (2016) Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: a critical review. *European Journal of Operational Research* 258(2): 607-616.
- Figueira J., Greco S. e Ehrgott M. (2005) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer.
- Figueira J., Mousseau V. e Roy B. (2016) ELECTRE methods. In: Greco S., Ehrgott M. e Figueira J. (eds) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer, 155-185.
- Guitouni A. e Martel J.M. (1998) Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research* 109(2): 501-521.
- Gumus A.T. (2009) Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications* 36(2): 4067-4074.
- Hottenroth H., Sutardhio C., Weidlich A., et al. (2022) Beyond climate change. Multi-attribute decision making for a sustainability assessment of energy system transformation pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 156: 111996.
- Huguet Ferran P., Heijungs R. e Vogtlander J.G. (2018) Critical Analysis of Methods for Integrating Economic and Environmental Indicators. *Ecological Economics* 146: 549-559.
- Huppes G. e Ishikawa M. (2005) A framework for quantified eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology* 9(4): 25-41.
- Huysman S., Sala S., Mancini L., et al. (2015) Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. *Resources, Conservation and Recycling* 95: 68-76.
- Hwang C.L. e Yoon K.P. (1981) *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. New York: Springer.
- ISO 14045 (2012). *Environmental Management - Eco-efficiency Assessment of a Product Systems - Principles, Requirements and Guidelines*.
- ISPRA (2022). *Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico*. Disponibile su: <https://www.isprambiente.gov.it/files2022/publicazioni/rapporti/r363-2022.pdf>.
- Janssen R. (1991) *Multiobjective Decision Support for Environmental Problems*. Tesi di dottorato: Vrije Universiteit Amsterdam.
- Kircher A., Schaltegger S., Tschokohe H., et al. (2007) Eo-efficiency. Combining life cycle assessment and life cycle cost via normalization. *Internal Journal of Life Cycle Assessment* 12: 537-543.
- Lee H.Y., Imam B., Chrystanthopoulos M.K. e Murphy R.J. (2014) *A Combined Economic and Environmental Performance Framework for Railway Infrastructure Maintenance*. London: Asset Management Conference 2014, 1-8.
- Lee C.K., Lee J.Y., Choi Y.H. e Lee K.M. (2016) Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability. *Journal of cleaner production* 112: 1692-1699.
- Li T., Li A. e Guo X. (2020) The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry - A comprehensive analysis of MCDM methods. *Energy* 212: 118694.
- Madi E.N., Garibaldi J.M. e Wagner C. (2016) An exploration of issues and limitations in current methods of TOPSIS and fuzzy TOPSIS. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2098-2105.
- Majumder M. (2015) *Multy Criteria Decision Making. Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations*. Singapore: Springer, 35-47.
- Marler R.T. e Arora J.S. (2004) Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26(6): 369-395.
- Marzouk M. e Sabbah M. (2021) AHP-TOPSIS social sustainability approach for selecting supplier in construction supply chain. *Cleaner Environmental Systems* 2: 100034.

- Marzouk M., El-Maraghy M. e Metawie M. (2023) Assessing retrofit strategies for mosque buildings using TOPSIS. *Energy reports* 9: 1397-1414.
- Miah J.H., Koh S.C.L. e Stone D. (2017) A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. *Journal of Cleaner Production* 168: 846-866.
- Mousavi S.M., Jahadi Naeini M. e Behzadinejad F. (2022) Application of FAHP-TOPSIS Method for Weighting and Prioritizing Resilience Indicators in a Combined Cycle Power Plant. *Archives of hygiene sciences* 11: 103-112.
- Murrant D. e Radcliffe J. (2018) Assessing energy storage technology options using a multi-criteria decision analysis-based framework. *Applied Energy* 231: 788-802.
- Nardo M., Saisana M., Saltelli A., et al. (2005) *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. Paris: OECD publishing.
- Noh J. e Lee K. (2003) Application of Multiattribute Decision-Making Methods for the Determination of Relative Significance Factor of Impact Categories. *Environmental Management* 31: 633-641.
- Norris G.A. (2001) The requirement for congruence in normalization. *Internal Journal of Life Cycle Assessment* 6: 85-88.
- Park P.J., Tahara K., Jeong I.T. e Lee K.M. (2006) Comparison of four methods for integrating environmental and economic aspect in the end-of-life stage of a washing machine. *Resources, Conservation and Recycling* 48(1): 71-85.
- Roy B. (2016) Paradigms and challenges. In: Greco S., Ehr Gott M. e Figueira J. (eds) *Multiple criteria decision analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer, 19-39.
- Rüdener I., Gensch C.O., Griebhammer R. e Bunke D. (2005) Integrated environmental and economic assessment of products and processes: a method for eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology* 9(4): 105-116.
- Saaty T.L. (1980) *Analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty T.L. (1990) How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48(1): 9-26.
- Saaty T.L. (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1): 83-98.
- Saling P., Kicherer A., Dittrich-Krämer B., et al. (2002) Eco-efficiency analysis by BASF: the method. *Internal Journal of Life Cycle Assessment* 7: 203-218.
- Santoyo-Castelazo E. e Azapagic A. (2014) Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production* 80: 119-138.
- Simões C.L., Costa Pinto L.M. e Bernardo C.A. (2013) Environmental and economic assessment of a road safety product made with virgin and recycled HDPE: a comparative study. *Environmental Management* 114: 209-215.
- Suh S., Lee K.M. e Ha S. (2005) Eco-efficiency for Pollution Prevention in Small to Medium-Sized Enterprises. *Journal of Industrial Ecology* 9(4): 223-240.
- Tesfamariam S. e Sadiq R. (2006) Risk-based environmental decision-making using fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 21(1): 35-50.
- Triantaphyllou E. (2000) *Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Comparative Study*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.
- Tscheikner-Gratl F., Egger P., Rauch W., et al. (2017) Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water* 9(2): 68.
- Verfaillie H.A. e Bidwell R. (2000) *Measuring eco-efficiency – a guide to reporting company performance*. Conches-Geneva: World Business Council on Sustainable Development.
- Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F. e Zhao J.H. (2009) Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9): 2263-2278.
- Watrobski J., Jankowski J., Ziemia P., Karczmarczyk A. e Ziolo M. (2019) Generalised framework for multi-criteria method selection. *Omega* 86: 107-124.
- Wilkens I. (2012) *Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen – Von der Theorie zur praktischen Anwendung [Doktor der Ingenieurwissenschaften]*.
- Xue Y. e Li Y. (2022) Cohesion of Agricultural Crowdfunding Risk Prevention under Sustainable Development Based on Gray-Rough Set and FAHP-TOPSIS. *Sustainability* 14(19): 12709.
- Yang W. (2020) Ingenious solution for the rank reversal problem of TOPSIS method. *Mathematical Problems in Engineering* 2020(2): 1-12.
- Yeh C. e Willis R.J. (2001) A validation procedure for multi-criteria analysis: application to the selection of scholarship students. *Asia Pacific Management Review* 6(1): 39-52.
- Zadeh L.A. (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8: 338-353.
- Zahedi F. (1986) The analytic hierarchy process – a survey of the method and its applications. *Interfaces* 16(4): 96-108.
- Zanou B., Kontogianni A. e Skourtos M. (2003) A classification approach of cost effective management measures for the improvement of watershed quality. *Ocean & Coastal Management* 46(11-12): 957-983.
- Zavadskas E.K., Govindan K., Antucheviciene J. e Turskis Z. (2016) Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues. *Econ Res-Ekon Istraživanja* 29(1): 857-887.
- Zimmermann H.J. (2010) *Fuzzy set theory*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2(3): 317-332.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2023 è sostenuta da:



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 3/2023



Veolia Water Technologies Italia S.p.A.



STADLER ITALIA S.r.l.