



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Analisi comparata delle tecniche di supporto alle decisioni

Comparative analysis of decision support techniques

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Maurizio Bevilacqua

Tesi di Laurea di:

Giorgia Colangeli

Matricola **1096560**

ANNO ACCADEMICO 2021/202

SOMMARIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUZIONE | 4 |
| CAPITOLO 1: TECNICHE DI SUPPORTO ALLE DECISIONI | 6 |
| 1.1 DEFINIZIONE DI PROCESSO DECISIONALE E MODELLO DECISIONALE | 6 |
| 1.2 MULTI-CRITERIA DECISION AID (MCDA): CONFRONTO CON ANALISI MONOCRITERIO (ANALISI ABC)..... | 7 |
| 1.2.1 <i>ELEMENTI COSTITUTIVI DELL' ANALISI MULTI-CRITERIA</i> | 10 |
| 1.2.2 <i>FASI PRINCIPALI DELL' ANALISI MULTI-CRITERIA</i> | 12 |
| CAPITOLO 2: METODI DI ANALISI MULTI-CRITERIA | 13 |
| 2.1 METODI MCDM: ELEMENTI BASE E CLASSIFICAZIONE..... | 16 |
| 2.1.1 <i>MULTI-ATTRIBUTE UTILITY THEORY (MAUT)</i> | 18 |
| 2.1.2 <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)</i> | 20 |
| 2.1.3 <i>FUZZY SET THEORY</i> | 23 |
| 2.1.4 <i>ANALYTIC NETWORK PROCESS (ANP)</i> | 28 |
| 2.1.6 <i>SIMPLE MULTI-ATTRIBUTE RATING TECHNIQUE (SMART)</i> | 35 |
| 2.1.7 <i>TECHNIQUE FOR ORDER OF PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION (TOPSIS)</i> | 37 |
| 2.1.8 <i>CONCORDANCE AND DISCORDANCE ANALYSES BY SIMILARITY TO IDEAL DESIGNS (CODASID)</i> | 40 |
| 2.1.9 <i>ELIMINATION ET CHOIX TRADUISANT LA REALITÉ (ELECTRE)</i> | 41 |
| 2.1.10 <i>PREFERENCE RANKING ORGANIZATION METHOD FOR ENRICHMENT EVALUATIONS (PROMETHEE)</i> | 44 |
| CAPITOLO 3: CASI DI APPLICAZIONE | 47 |
| 3.1 INTRODUZIONE AI CASI STUDIO DI APPLICAZIONE DEI METODI MCDM | 47 |
| 3.1.1 <i>CASO STUDIO DEL PROGETTO "RACCORDO": CONNESSIONI FERROVIARIE TRA IL PORTO DI LIVORNO, INTERPORTO DI GUASTICCE,</i> | |

| | |
|---|-----------|
| <i>LINEA PISA-COLLESALVETTI-VADA E LINEA FIRENZE-PISA</i> | <i>49</i> |
| <i>3.1.2 CASO STUDIO LETTONIA: SETTORE DELLE ENERGIE RINNOVABILI. CONFRONTO TRA METODI.....</i> | <i>56</i> |
| CAPITOLO 4: ANALISI COMPARATA DEI METODI..... | 65 |
| CAPITOLO 5: CONCLUSIONE | 69 |
| SITOGRAFIA..... | 73 |

INTRODUZIONE

L'analisi multi-criteria è una metodologia moderna nata alla fine degli anni '60 per risolvere problemi di natura decisionale. Nella vita quotidiana è consuetudine trovarsi di fronte a scenari che prevedono di effettuare delle scelte, di prendere delle decisioni.

In particolare, lo scopo principale dell'analisi multi-criteria è supportare il *decision maker* (soggetto che deve prendere una decisione) nel processo decisionale.

Questa tecnica nasce con l'obiettivo di colmare le carenze dell' analisi costi-benefici (ABC). L'analisi multi-criteria dunque, si sostituisce ad una tecnica di analisi che ingloba tutti gli aspetti multidimensionali in un unico criterio di valutazione, ossia la "funzione obiettivo" e, che si focalizza esclusivamente sull'ambito monetario.

Di contro, infatti, l'analisi multi-criteria permette di poter valutare le possibili alternative di un problema decisionale considerando più criteri simultaneamente.

L'analisi multi-criteria si presenta dunque, come una tecnica non-monetaria e in grado di valutare sia aspetti tangibili che intangibili di un determinato contesto decisionale, risulta più sensibile alle caratteristiche multidimensionali delle casistiche reali.

Tuttavia, un metodo di valutazione non va mai considerato come un algoritmo che fornisca automaticamente la soluzione voluta, piuttosto come un aiuto che permetta al

decision maker di effettuare un'analisi sistematica delle alternative e che indirizzi il decisore verso la scelta "più giustificata" e non "ottima".

Il presente elaborato propone uno studio dei metodi di analisi multi-criteria al servizio della letteratura scientifica per il sostegno di attività decisionali ed una conseguente comparazione tra metodi.

Nello specifico, la suddetta dissertazione si articola in cinque capitoli.

Nel primo capitolo viene illustrata una descrizione dettagliata riguardante la tecnica di analisi multi-criteria, il confronto della stessa con la tecnica di analisi costi-benefici monocriterio, gli elementi costitutivi e le fasi principali che la caratterizzano.

Nel secondo capitolo si prosegue con la classificazione dei principali metodi di analisi multi-criteria, ciascuno dei quali viene opportunamente esaminato attraverso lo studio delle fasi che lo costituiscono.

Nel terzo capitolo, mediante una breve trattazione di casi applicativi, si perviene a conoscenza del "modo" e degli ambiti in cui tali metodi vengono proiettati nella realtà attraverso il loro utilizzo. In particolare, sono esaminati due casi di applicazione riguardanti rispettivamente un caso studio italiano ed un caso studio lettone.

Nel quarto capitolo si giunge ad una comparazione tra i metodi già analizzati nel secondo capitolo, andando ad evidenziare i punti salienti di ciascuno di essi con il fine di far luce su analogie e differenze degli stessi.

Nel quinto capitolo, si termina con delle considerazioni fatte sulle tecniche di analisi multi-criteria, basate sull'illustrazione di vantaggi e svantaggi.

In aggiunta, nello stesso capitolo conclusivo, si mostra come la ricerca attuale presenti una revisione della letteratura del Multi Criteria Decision-Making (MCDM) verso la selezione del metodo di mining (MMS)

CAPITOLO 1: TECNICHE DI SUPPORTO ALLE DECISIONI

1.1 DEFINIZIONE DI PROCESSO DECISIONALE E MODELLO DECISIONALE

Una *decisione* è una scelta tra più alternative (due, parecchie, molte o infinite) fatta in base a delle preferenze e a delle priorità. Etimologicamente, “decidere” deriva dal latino: *de* (suffisso che indica un allontanamento) e *caedere* ossia “tagliare”, significa quindi “tagliar via qualcosa”. Dunque con decisione definiamo il processo di scelta, di selezione, di un’alternativa rispetto ad un’altra in base a dei criteri prestabiliti.

Per *problema decisionale* nell'ambito della matematica si intende un problema di scelta in cui si deve prendere una decisione tra un elevato numero di soluzioni (ammissibili) alternative, sulla base di uno o più criteri. Si parla di problemi decisionali soprattutto all'interno del campo della matematica applicata e, più nello specifico, della ricerca operativa. Effettuare una scelta corrisponde a: considerare da diversi punti di vista il problema che si è tenuti a risolvere, confrontare tra loro le conseguenze che ogni azione intrapresa potrebbe comportare e decidere quale sia la migliore strada da percorrere; ciò significa quindi che l'atto dello scegliere è strettamente legato ad una pluralità di aspetti da tenere sotto controllo che vengono sommariamente denominati *criteri*.

Un *modello decisionale* è un costrutto analitico che individua gli elementi essenziali di un processo: i/il decisore, i suoi attributi cognitivi, le attività di ricerca delle soluzioni, le modalità ed i criteri della scelta. Si parla, quindi, di *processi decisionali* in relazione a tutto quello che succede dal momento in cui nasce un problema al momento in cui viene definita la soluzione. I modelli decisionali si caratterizzano rispetto a:

- *Incertezza*: i modelli decisionali si dicono di tipo *deterministico* se non è presente incertezza; viceversa, in presenza di incertezza, si definiscono modelli decisionali di tipo *stocastico*.
- *Numero di obiettivi considerati*: i modelli decisionali si dicono *monocriterio* (o *mono-obiettivo*) se si ha un solo obiettivo; viceversa, in presenza di più obiettivi si hanno modelli decisionali *multicriterio* (o *multi-obiettivo*).
- *Numero di decisori*: i modelli decisionali possono essere caratterizzati da uno o più decisori.

1.2 MULTI-CRITERIA DECISION AID (MCDA): CONFRONTO CON ANALISI MONOCRITERIO (ANALISI ABC)

“L’analisi multicriteri MCDA (Multi Criteria Decision Aid) è una procedura di comparazione a criteri multipli che ha come scopo quello di contribuire allo sviluppo di un processo di apprendimento che alimenta lo stesso processo decisionale.”

(Las Casas 1992)

L’Analisi multi-criteria (MCDA: Multi Criteria Decision Aid) è una tecnica di valutazione nata alla fine degli anni '60, partendo dalla consapevolezza dei limiti posti dall' Analisi Costi Benefici (ABC) per risolvere problemi decisionali. L’analisi ABC è una tecnica di valutazione monocriterio che esprime il giudizio di convenienza in funzione del solo criterio monetario. Quest’ultima, infatti, focalizza la sua attenzione solo sugli impatti economici di un progetto.

Per molti anni l'unica strada percorsa per risolvere problemi decisionali è stata quella di considerare i sistemi come fossero monocriterio e quindi come se si potessero accorpate tutti gli aspetti multidimensionali in un unico obiettivo o in un'unica scala di misura (massimizzo o minimizzo un’unica funzione obiettivo). Questo tipo di metodologia ancora oggi rimane valida sia nei testi di finanza che in quelli di ricerca operativa: ideato un generico indice di profitto (o di costo) che rappresenti l'utilità di un soggetto, si richiede semplicemente di massimizzare (o minimizzare) tale singolo obiettivo. Tale modo di procedere non solo è riduttivo ma, in un certo senso, “contro natura” in quanto sottovaluta l’impatto di svariati aspetti sul processo decisionale. Quest’ultimo è motivo per il quale, negli ultimi trent'anni, una nuova filosofia di approccio a tale tipo di problematiche ha attirato l'attenzione di ricercatori e professionisti: il *Multi Criteria Decision Making (MCDM)*.

Tale approccio nasce inoltre dal fatto che negli ultimi anni si è sviluppata una maggiore attenzione nei confronti della qualità della vita, e ciò ha ulteriormente complicato la valutazione dei possibili benefici di un progetto estendendola anche ai benefici intangibili, oltre che ai benefici tangibili. Proprio la necessità di non limitare la valutazione al semplice ambito monetario, ha portato ad affiancare all'analisi costi-benefici classica nuove forme di valutazione, più sensibili alle caratteristiche multidimensionali e multiobiettivo dei progetti.

L'analisi multi-criteria è infatti, un metodo non monetario e multicriterio per esaminare la convenienza di progetti caratterizzati da un rilevante impatto di tipo *ambientale, sociale ed economico* nel contesto in cui vengono realizzati.

Un metodo di valutazione non va mai inteso come un algoritmo che fornisca automaticamente la soluzione voluta, quanto piuttosto come un aiuto che permetta al decision maker un'analisi sistematica delle alternative e che guidi il decisore verso la decisione, di cui avrà comunque tutta la responsabilità.

Con l'acronimo MCDM (oppure MCDA: Multicriteria Decision Aid) viene indicata un'intera serie di strumenti evoluti allo scopo di permettere al decision Maker ,colui che è tenuto a produrre delle scelte, di risolvere, in modo coerente e complesso, problemi decisionali caratterizzati da svariati attributi, spesso contraddittori, tenendo conto di essi e del loro grado di importanza. I metodi MCDA possono essere utilizzati in ogni campo che può definire un problema, alternative e criteri.

Il primo fattore a cui bisogna prestare attenzione quando si trattano questo tipo di problemi è che non esiste, in generale, alcuna decisione ,o soluzione, che sia simultaneamente la migliore da tutti i punti di vista; perciò, al contrario dei metodi monocriteriali, non è corretto utilizzare la parola “ottimizzazione” (punto cardine dell'Analisi Costi Benefici) in tale contesto : in contrasto con le altre tecniche della ricerca operativa, i metodi *multicriteria* non ricercano la soluzione “oggettivamente migliore” ma la soluzione “giustificata e soddisfacente”.

Ogni alternativa (o soluzione) può presentare vantaggi e svantaggi rispetto alle altre alternative (soluzioni).

L'analisi multi-criteria parte, infatti, dal presupposto che nel caso in cui si vogliano prendere in considerazione tutti gli aspetti che caratterizzano un determinato contesto (aspetti tangibili e intangibili), allora il problema della determinazione di una soluzione “ottima” in un problema decisionale non può essere risolto utilizzando un solo criterio o un' unica funzione obiettivo.

I Multi-Criteria Decision Methods rappresentano un superamento di alcuni limiti della tecnica di programmazione lineare (PL), una tecnica utilizzata nella ricerca operativa che si occupa della soluzione di problemi complessi caratterizzati da una sola funzione obiettivo da ottimizzare (minimizzare costi o massimizzare profitti).

Secondo Herbert Simon, “*non é l'alternativa "migliore" che deve essere raggiunta (anche perché potrebbe essere oggettivamente impossibile raggiungerla), ma devono essere invece identificate alternative che "soddisfano" un certo numero di standard esplicitamente definiti*”.

Esistono molti metodi che possono essere utilizzati per risolvere i problemi e possono essere organizzati in base a diversi parametri. Ciascun metodo MCDA ha il proprio modello di calcolo mediante il quale le alternative vengono accodate e non è possibile affermare che l'utilizzo di metodi specifici con gli stessi dati di input porti allo stesso risultato finale.

La particolarità dell'analisi multi-criteria consiste nella formulazione di un giudizio di convenienza di un intervento in funzione di più criteri di riferimento, esaminati in maniera autonoma o interattiva.

Nell'analisi multi-criteria vengono messe in luce tutte le informazioni, tutte le conseguenze e soprattutto tutte le prospettive collegate ad una possibile scelta nel soddisfacimento dei criteri prestabiliti, o meglio viene considerata quella che prende il nome di *multidimensionalità*.

La valutazione si sviluppa in due tempi successivi, seppur complementari:

- Individuazione delle alternative che hanno una rilevanza oggettiva.
- Stima delle alternative: dare un ordinamento alle diverse alternative.

1.2.1 ELEMENTI COSTITUTIVI DELL' ANALISI MULTI-CRITERIA

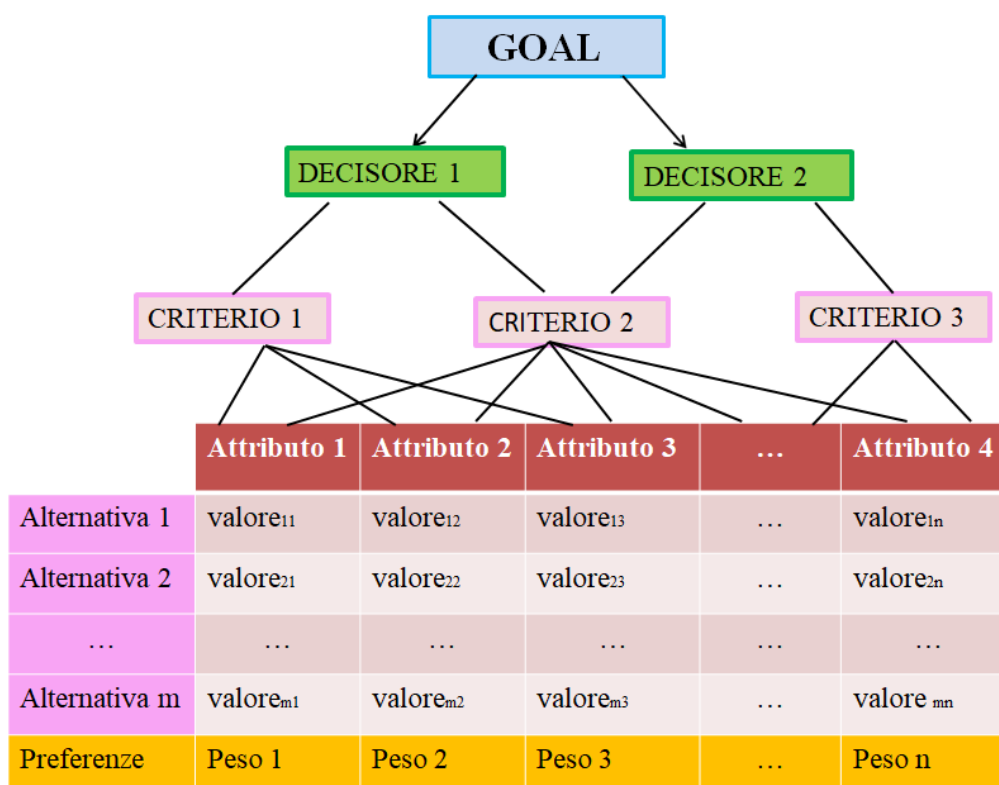


Figura 1. Elementi costitutivi dell' analisi multi-criteria

Gli elementi costitutivi della Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) sono:

- **GOAL** (o un insieme di goal): rappresenta l'obiettivo (o gli obiettivi) che si vogliono raggiungere.
- **DECISORE** (o più decisori): soggetti "politici" interessati alla valutazione. I decisori, sulla base di un insieme di criteri rispetto ai quali le alternative decisionali vengono valutate, esprimono le proprie *preferenze* riguardo le modalità di raggiungimento del goal (o dei goals). Le preferenze vengono espresse in termini di pesi assegnati ai criteri di valutazione.
- **CRITERI DI VALUTAZIONE**: standard di giudizio o regole per testare la desiderabilità delle alternative decisionali. I criteri sono mezzi sulla base dei quali i decisori valutano le alternative.
- **ATTRIBUTI**: utili per caratterizzare in modo dettagliato il criterio tanto da farlo divenire misurabile qualitativamente e/o quantitativamente. Possono essere paragonati a degli indicatori.
- **ALTERNATIVE**: rappresentano gli oggetti della valutazione e della scelta . Devono seguire un ordine.

- **PUNTEGGI-VALORI (outcomes/scores):** costituiscono gli elementi della matrice di valutazione. Indicano il valore (o punteggio) di ciascuna alternativa rispetto ad ogni attributo. In particolare, esprimono il valore dell'alternativa m-esima rispetto all'attributo n-esimo. Ogni decisore costruisce la propria matrice di valutazione.
- **VETTORE DEI PESI:** riporta le preferenze dei decisori espresse in termini numerici. E' un indicatore.

Riassumendo, la struttura generale di una tecnica di analisi multi-criteria è, dunque, definita da:

- un set finito o infinito di **n-alternative (o azioni)** che classificano rispettivamente problemi di *Multi- Attribute Decision Analysis* (multi-attributo) e problemi di *Multi-Objectives Decision Analysis* (multi-obiettivo);
 $A = \{ a_1, a_2, \dots, a_n \}$
- un insieme di **k-criteri** $C = \{ c_1, c_2, \dots, c_k \}$ basati sugli effetti delle n alternative. Tali criteri possono essere conflittuali fra loro in quanto potrebbero portare un'alternativa a raggiungere un determinato obiettivo e al contempo allontanarla da un altro obiettivo;
- un insieme di **attributi** che misurano quantitativamente e/o qualitativamente i k-criteri;
- almeno un **decision maker**.

Le n-alternative e i k-attributi vanno a generare la cosiddetta *matrice decisionale*:

| Alternative designs | Attributes | | | |
|---------------------|------------|----------|---------|----------|
| | y_1 | y_2 | \dots | y_k |
| a_1 | y_{11} | y_{12} | \dots | y_{1k} |
| a_2 | y_{21} | y_{22} | \dots | y_{2k} |
| \dots | \dots | \dots | \dots | \dots |
| a_n | y_{n1} | y_{n2} | \dots | y_{nk} |

Figura 2. Matrice decisionale

1.2.2 FASI PRINCIPALI DELL' ANALISI MULTI-CRITERIA

Le fasi principali di una tecnica di analisi multi-criteria sono:

- definizione del contesto decisionale e degli **obiettivi** (SMART: Specific, Measurable, Accepted, Realistic, Timely);
- identificazione delle differenti opzioni per raggiungere gli obiettivi;
- identificazione degli **attori** coinvolti;
- definizione dei **criteri**;
- identificazione degli **attributi (indicatori)** che condurranno alla comparazione delle alternative;
- misurazione degli **attributi**;
- assegnazione dei **pesi**;
- costruzione della matrice dei pesi (**matrice decisionale**) , dove ogni riga contiene il valore pesato di ogni attributo rispetto ad ogni alternativa;
- **aggregazione dei dati**, analisi dei risultati (elaborazione matematica della matrice);
- **scelta** e decisione, se utilizziamo la somma pesata, la soluzione preferita sarà quella che ottiene il maggior punteggio;
- **Analisi di sensitività.**

CAPITOLO 2: METODI DI ANALISI MULTI-CRITERIA

Esiste un'estesa e consolidata letteratura sulla Analisi Multicriteri, all'interno della quale è possibile trovare un ventaglio molto ampio di tecniche e metodologie (Figueira et al., 2005).

L'analisi multi-criteria utilizza diversi metodi che derivano da varie teorie e metodologie scientifiche.

I metodi MCDA (Multi-Criteria Decision Aid) possono essere utilizzati in ogni campo che può definire un problema, alternative e criteri.

Un tale insieme di metodi permette di aggregare i diversi criteri di valutazione con lo scopo di selezionare una o più alternative(o azioni).

I singoli metodi sono molto diversi tra loro e sono strutturati in funzione del background teorico al quale si ricollegano. In effetti, l'eterogeneità dei metodi si presta alla risoluzione dei più svariati problemi, e tale eterogeneità è direttamente proporzionale alla stessa eterogeneità delle multiformenti problematiche riscontrabili nella realtà.

Tra le teorie scientifiche che hanno favorito lo sviluppo della moderna teoria multicriteriale e, con essa tutti i metodi di analisi, vi sono:

- La TEORIA DELL'UTILITÀ

Secondo tale teoria viene definita l'"utilità" come *"indice cardinale delle preferenze del consumatore in un ambito di incertezza del risultato ed ha come obiettivo quello di determinare i fattori per cui l'individuo deciderà in quali attività, ad esempio, investire la liquidità che ha a disposizione"*.

Questa teoria fu proposta nel 1947 da Von Neuman e Morgenstern ed è stata largamente applicata come modello del comportamento economico fino all'arrivo della Teoria del Prospetto proposta negli Anni Settanta da Tversky e Kahneman.

La teoria dell'Utilità è basata su modelli matematici e considera la *razionalità* come base del comportamento umano: gli individui preferiscono sempre avere una ricchezza maggiore che una minore.

Fornisce dei criteri in base ai quali si possono valutare i comportamenti degli individui e formula alcuni assiomi di utilità. In particolare studia le preferenze individuali dei consumatori sottoposti a condizioni di rischio, o meglio associa una *probabilità di realizzazione* a ciascun possibile evento che potrebbe verificarsi senza conoscere ciò che avverrà.

E' ragionevole assumere che gli individui scelgano tra varie combinazioni rischiose sulla base dei rispettivi valori di utilità attesa.

La teoria dell'utilità è responsabile dei primi sviluppi della moderna teoria multicriteriale.

Nello specifico le evoluzioni di tale teoria nel campo dell'economia classica ed il suo coinvolgimento nell'analisi costi-benefici hanno permesso la nascita della *teoria dell'utilità multiattributi*, particolarmente influente per le tecniche di analisi multi-criteria.

Questa teoria ad esempio rappresenta lo sviluppo del metodo MAUT, che sarà analizzato nel sotto-paragrafo successivo.

- **La TEORIA DEL BENESSERE SOCIALE**

E' alla base del Principio di Pareto che sostiene la tesi dell'utilitarismo e dunque del pensiero liberale dove "a contare sono le preferenze individuali e la non interferenza dello Stato sulle azioni dell'individuo": l'individuo è tanto più libero quanto più lo Stato omette di regolarne la vita.

Il Benessere sociale si focalizza sulla qualità della vita di una società e dipende dal grado di soddisfazione dei bisogni materiali (tangibili) e immateriali (intangibili) che caratterizzano una collettività.

I bisogni individuali e collettivi vengono soddisfatti per mezzo dell'attività economica che si occupa di ottimizzare le risorse per il soddisfacimento dei bisogni umani facendo da "ponte" tra risorse scarse in natura e bisogni che invece sono illimitati.

La teoria dei bisogni è stata particolarmente approfondita da Maslow che ha posto i bisogni in progressione gerarchica iniziando dai bisogni di ordine inferiore ai bisogni di ordine superiore .

Questa teoria rappresenta ad esempio lo sviluppo del metodo di analisi ELECTRE.

- La TEORIA DELLE MISURAZIONE PSICOFISICA

E' stata proposta da Fechner-Weber (1860) ed afferma *che «perché l'intensità di una sensazione cresca in progressione aritmetica, lo stimolo deve crescere in progressione geometrica».*

Questa teoria è stata di fondamentale importanza per elaborare il concetto economico di utilità marginale decrescente, secondo il quale *“l'incremento di utilità fornito da un bene è minore mano a mano che la quantità di tale bene è posseduta in misura maggiore”.*

Essa effettua una modellazione matematica delle valutazioni sensitive umane.

Nel campo dell'analisi multi-criteria ci ha permesso di introdurre il concetto di *semiordine* che consente la rappresentazione di situazioni in cui l'indifferenza non è transitiva a causa di fenomeni di soglia percettiva.

2.1 METODI MCDM: ELEMENTI BASE E CLASSIFICAZIONE

I metodi di analisi multi-criteria nascono con l'obiettivo di supportare il decisore, o policy maker, nelle scelte da effettuare relativamente alla risoluzione di problemi decisionali.

I metodi MCDM si occupano di affrontare problemi decisionali in cui sono coinvolti più criteri da prendere in considerazione. Di norma tali problemi non presentano un' unica soluzione ottimale ma prevedono di scegliere la soluzione più "giustificata" in relazione ai criteri presi in considerazione.

Ogni metodo presenta come fasi iniziali la stima delle alternative a disposizione e la determinazione dei criteri sulla base dei quali valutare poi le alternative.

Tuttavia, ciascun metodo applica diverse procedure per la valutazione delle suddette alternative.

Lo scopo principale di ogni metodo è quello di stabilire quale sia l'alternativa relativamente migliore, o "più preferita" dai decision makers.

I metodi presentano caratteristiche e applicazioni differenti, a tal proposito sono state effettuate delle classificazioni degli stessi sulla base di diverse considerazioni.

Una delle possibili classificazioni che la letteratura scientifica ha ritenuto accettabile è quella che prende il nome di "suddivisione per famiglie" dei metodi.

Nello specifico si vanno a considerare tre grandi famiglie di metodi:

- Metodi della nota teoria dell'utilità multi-attributo
- Metodi outranking
- Metodi interactive

La prima famiglia di metodi è di origine americana e ingloba tutti quei metodi che aggregano i diversi punti di vista in un'unica funzione conseguentemente ad una ottimizzazione.

Il procedimento che caratterizza questi metodi consiste nello studio matematico delle condizioni e della particolare funzione di aggregazione e la realizzazione della costruzione del metodo.

A questa famiglia di metodi appartengono AHP, ANP, MAUT, ...

La seconda famiglia di metodi, di origine francese, riguarda gli outranking methods, ovvero i metodi del “superamento di grado”.

I suddetti metodi si basano su una logica di costruzione di relazione binaria tra coppie di elementi, in particolare relazioni di concordanza e discordanza.

A questa famiglia di metodi appartengono il metodo ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS, CODASID, FUZZY...

La terza famiglia di metodi è la più recente, rappresenta nuovi filoni di ricerca e sperimentazione ed è composta da metodi che alternano fasi di calcolo e fasi interattive.

2.1.1 MULTI-ATTRIBUTE UTILITY THEORY (MAUT)

Il metodo MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), tradotto “ Teoria dell’Utilità Multi-Attributo”, parte dall’ipotesi secondo cui *“il decisore è in grado di articolare le sue preferenze con relazioni di **preferenza** o **indifferenza** e che preferirà sempre la soluzione che massimizza il suo benessere”*.

Formalmente il metodo MAUT è una tecnica per supportare il processo decisionale quando un decisore deve scegliere tra un numero limitato di alternative disponibili e viene anche utilizzata per esplorare le preferenze degli intervistati in modo generale per prevedere preferenze e scelte (Jansen, S. J. , anno 2011. The multi-attribute utility method. Springer, Dordrecht.).

Il MAUT nasce grazie a Keeney e Raiffa, dopo la pubblicazione del loro libro di riferimento nel 1976. La valutazione generale di un’alternativa si definisce come una somma ponderata dei suoi valori nel rispetto degli attributi. La tecnica richiede che il decisore valuti le alternative rispetto ad ogni attributo separatamente. I valori e i pesi delle alternative sono combinati e mediante un modello si genera una valutazione complessiva per ciascuna alternativa (funzione di utilità).

Il metodo MAUT è uno dei metodi più utilizzati tra le tecniche di analisi multi-criteria per generare un ordine tra le alternative.

Definizione della sequenza di passi per l’applicazione del metodo:

1. Definire le alternative e gli attributi relativi alle alternative;
2. Valutare ogni alternativa rispetto a ciascun attributo separatamente e calcolare la funzione d’utilità di ogni attributo;
3. Assegnare i pesi relativi a ciascun attributo;
4. Aggiungere alle alternative il peso di ciascun attributo generando così la funzione di utilità di ogni alternativa $U(x)$;
5. Utilizzo di relazioni di preferenza e indifferenza per valutare tutte le alternative ed ordinarle;
6. Studio di una funzione di utilità ottimale $U^*(x)$;
7. Analisi di sensibilità.

La **funzione di utilità** di ciascuna alternativa è pari alla somma delle funzioni di utilità dei suoi attributi con pesi associati.

La funzione di utilità per la generica alternativa x è definita da:

$$U(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i(x_i)$$

X = alternativa

W_i = peso associato all' i -esimo attributo

$U_i(x_i)$ = funzione di utilità marginale dell' i -esimo attributo

X_i = attributo i

Le relazioni di preferenza e indifferenza si esprimono come:

$$U[x(a)] > U[x(b)] \Leftrightarrow aPb$$

$$U[x(a)] > U[x(b)] \Leftrightarrow aIb$$

Dove con “P” indichiamo una relazione di preferenza e con “I” una relazione di indifferenza tra le alternative.

2.1.2 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

Il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process) è una delle tecniche di analisi multi-criteria sviluppata dal matematico sovietico e professore alla Wharton School of Business Thomas Lorie Saaty tra il 1971 e il 1975.

L'AHP ci consente di selezionare la migliore alternativa tra un insieme discreto di alternative ed è il metodo più usato all'interno dell'ambito del decision making.

Il metodo si basa su valori e giudizi, sia quantitativi che qualitativi, di individui e di gruppi, che vengono definiti in base a una **struttura gerarchica multilivello** al fine di ottenere delle priorità. Nello specifico le valutazioni, oggettive e soggettive, vengono convertite in valori numerici con lo scopo di assegnare una priorità alle singole alternative.

Le particolarità di questo approccio sono: la flessibilità, la capacità di misurare criteri intangibili e l'applicabilità nella risoluzione di problemi complessi.

L'AHP consiste in una procedura sistematica di rappresentazione gerarchica del problema decisionale che ci permette di decomporre tale problema iniziale, di consueto complesso e non strutturato, in una gerarchia più semplice da comprendere e analizzare, una struttura detta appunto "gerarchica multilivello".

La struttura gerarchica è così definita:

- al massimo livello, nella radice, vi è l'**obiettivo** finale (goal) che il decision maker intende perseguire;
- nei livelli intermedi vi sono i **criteri** e possibili **sotto-criteri** decisionali, cioè gli **attributi** sulla base dei quali si valuta l'utilità delle alternative nel raggiungere l'obiettivo prestabilito;
- nei livelli estremi, nelle foglie, vi sono le **alternative**, opzioni a disposizione del decision maker.

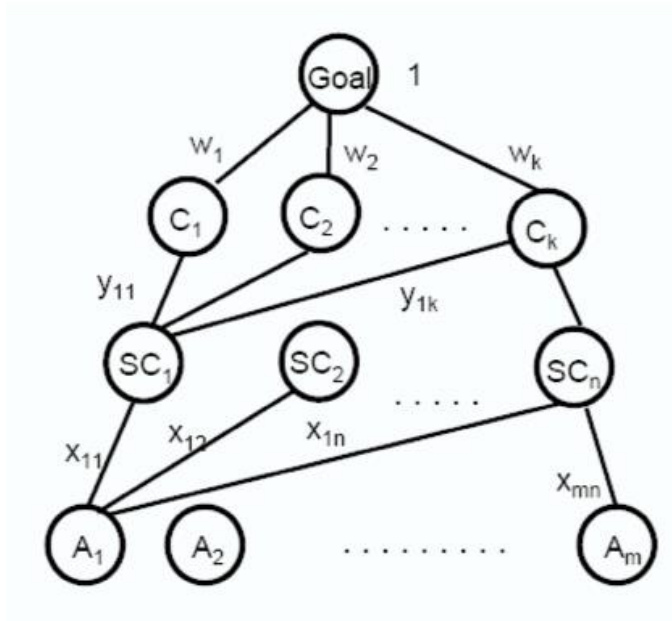


Figura 3. Struttura gerarchica multilivello

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Determinazione di una gerarchia degli attributi mediante la struttura gerarchica multilivello.
2. Creazione di una matrice di confronto binario, detta **matrice dei confronti a coppie**, positiva e reciproca, unitaria sulla diagonale principale, con la quale avviene una comparazione tra tutti gli attributi presenti in un determinato livello e tutti quelli stanti al livello immediatamente superiore.

In particolare i giudizi sono soggettivi, assegnati dal decisore e trasformati in numeri mediante la scala dei rapporti di Saaty (inventore del metodo AHP).

La scala dei rapporti permette di tramutare i giudizi in punteggi compresi tra 1 e 9, in cui 1 sta ad indicare l'uguaglianza tra due criteri e 9 la massima importanza di un criterio rispetto all'altro.

I numeri assegnati dal decisore nelle comparazioni costituiscono gli elementi della matrice dei confronti a coppie.

Nel costruire la matrice si inseriscono al di sopra della diagonale principale i valori generati dal confronto a coppie e nella parte inferiore appariranno i reciproci di tali valori.

In caso di più decisori il giudizio finale è calcolato tramite media ponderata dei giudizi di tutti i decisori.

Per determinare le priorità locali tutti gli elementi decisionali presenti in un livello gerarchico sono comparati tra di loro a coppie, mediante un rapporto di preferenza. Le priorità globali sono invece calcolate applicando il principio di composizione gerarchica, moltiplicando i pesi locali di ogni elemento della matrice per i pesi locali del nodo genitore e si sommano i prodotti risultanti.

| Valore | Definizione | Descrizione |
|------------------|---|--|
| 1 | Uguale importanza | I due attributi contribuiscono in egual misura alla definizione del problema |
| 3 | Debole importanza di un indice rispetto all'altro | L'esperienza e l'opinione del DM depone leggermente in favore di un attributo rispetto all'altro |
| 5 | Importanza forte o elemento essenziale | L'esperienza e l'opinione del DM depone fortemente in favore di un attributo rispetto all'altro |
| 7 | Importanza dimostrata | Un attributo è fortemente da favorire e la sua dominanza è dimostrata dalla pratica |
| 9 | Importanza assoluta | La comprovata importanza di un attributo rispetto agli altri è la più alta in assoluto |
| 2, 4, 6, 8 | Valori intermedi rispetto ai due giudizi adiacenti | Quando si ritiene necessario adottare un compromesso |
| Valori reciproci | Se l'attributo i è già stato valutato nei confronti dell'attributo j , quest'ultimo assumerà il valore reciproco quando confrontato con i . | |

Figura 4. Scala dei rapporti di Saaty (1980)

3. Determinazione del **priority vector**.

Se la matrice è perfettamente consistente (nel caso ideale), dunque ha rango unitario, l'unico autovalore non nullo è uguale ad n ordine della matrice e il priority vector che ci fornisce i pesi degli elementi confrontati è l'**autovettore** corrispondente all'autovalore n . Di contro, se la matrice non è consistente bisogna calcolare tale autovettore con metodo appropriato.

4. Tra le varie unità di un livello si individua l'elemento più vantaggioso in quello che presenta il valore maggiore del peso relativo.

2.1.3 FUZZY SET THEORY

“La teoria degli insiemi fuzzy è un approccio di ricerca che può affrontare problemi relativi a giudizi ambigui, soggettivi e imprecisi e può quantificare l'aspetto linguistico dei dati disponibili e le preferenze per il processo decisionale individuale o di gruppo (Shan et al., 2015a).”

Il metodo fuzzy utilizza una logica che permette di affrontare le incertezze all'interno dei problemi decisionali dovute ad *ambiguità* e *vaghezza*.

Per ambiguità si intende l'incertezza dovuta alla possibile e plausibile selezione di più opzioni all'interno di un insieme di alternative, problema che non può essere risolto definitivamente utilizzando un metodo che prevede un numero finito di passi.

Per vaghezza si intende un'estensione poco chiara o imprecisa di un concetto.

La differenza fondamentale tra ambiguità e vaghezza è che concetti ambigui possono essere interpretati da affermazioni specifiche o distinte, mentre è praticamente impossibile formare interpretazioni specifiche su concetti vaghi e dunque poco chiari.

Uno dei principali vantaggi dell'ottimizzazione fuzzy è che ci consente di gestire un'ampia gamma di incertezze nella struttura del problema, come la variabilità nel livello di aspirazione del decisore riguardo agli obiettivi, la variabilità nella gamma di coefficienti di funzioni obiettivo e vincoli e l'incertezza nel livello di soddisfazione dei vincoli, in contrasto con l'approccio di ottimizzazione robusta, che cattura l'incertezza solo nei parametri. A causa della necessità di trattare informazioni derivanti dalla percezione computazionale, cioè incerte, imprecise, vaghe, ambigue o senza confini netti, per primo Zadeh (1965), sviluppò un approccio matematico e lo chiamò Fuzzy Set Theory (FST), (Şebnem Yılmaz Balaman, in Processo decisionale per le catene di produzione basate sulla biomassa, 2019).

E' possibile stimare due classi di approccio della logica fuzzy: classe di **programmazione flessibile fuzzy** e classe di **programmazione probabilistica fuzzy**.

I modelli di programmazione flessibile fuzzy contengono *obiettivi flessibili* e *vincoli morbidi* che rappresentano la flessibilità dei valori target delle funzioni obiettivo e l'elasticità dei vincoli (Inuiguchi e Ramik, 2000).

Lo svantaggio principale delle classi di programmazione flessibile fuzzy è rappresentato dal fatto che non è possibile avere ambiguità nei coefficienti delle funzioni obiettivo e dei vincoli, tuttavia è ammessa vaghezza relativa alle aspirazioni e ai vincoli dei decisori.

Tale svantaggio delle classi di programmazione flessibile fuzzy si tramuta in un vantaggio per le classi di programmazione probabilistica fuzzy, infatti queste ultime consentono di trattare coefficienti ambigui nelle funzioni obiettivo e nei vincoli.

In particolare, la difficoltà nel determinare il valore esatto dei parametri del modello viene risolta dalla programmazione probabilistica fuzzy utilizzando le distribuzioni di probabilità per modellare i parametri fuzzy sulla base di dati disponibili limitati, nonché conoscenze ed esperienze dei decisori.

Questa teoria è stata applicata a molti campi dell'ingegneria e della scienza. Alcuni esempi in cui FST è stato utilizzato con successo sono i sistemi di controllo, i sistemi basati sulla conoscenza, l'elaborazione delle immagini, ingegneria energetica, automazione industriale, robotica, elettronica di consumo, intelligenza artificiale/sistemi esperti, gestione e ricerca operativa.

L'FST è stato applicato a molti campi della ricerca operativa come la teoria delle decisioni, la gestione dei progetti, il controllo dell'inventario, la programmazione, la gestione della catena di approvvigionamento, la teoria delle code, la manutenzione e l'affidabilità e il controllo di qualità, (Şebnem Yılmaz Balaman , in Processo decisionale per le catene di produzione basate sulla biomassa , 2019).

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Determinare se gli approcci di modellazione fuzzy sono convenienti al problema. Qualora le informazioni sul sistema sono identificate in modo approssimativo o mancano informazioni sul problema, il problema può essere gestito utilizzando FST.
2. Definire i valori dei parametri del problema e i loro intervalli.
3. Identificare una funzione di appartenenza utilizzando gli intervalli per ciascun parametro. Il numero di funzioni di appartenenza è determinato dal decisore, in base al numero di parametri incerti/imprecisi inclusi nel problema.
4. Sviluppare la rappresentazione del sistema gestito utilizzando le funzioni di appartenenza che mostrano il livello di soddisfazione dei parametri del sistema.

Definizione di alcune peculiarità per l'applicazione del metodo:

CONCETTO DI INSIEME

Secondo la logica classica, un insieme è definito come “*qualunque aggregato (o collezione) di oggetti per il quale sia sempre possibile decidere se un generico oggetto appartiene oppure no all'aggregato stesso*”.

La funzione di appartenenza di un insieme è una funzione booleana che può assumere solo due valori:

- 1 = l'oggetto appartiene all'insieme
- 0 = l'oggetto non appartiene all'insieme

CONCETTO DI INSIEME FUZZY

Un insieme fuzzy è anche detto insieme sfocato o sfumato ed un insieme di tale genere rappresenta un'estensione della teoria classica degli insiemi, infatti gli insiemi nitidi sono sottoinsiemi degli insiemi fuzzy.

“L'Insieme Fuzzy corrisponde ad un insieme di oggetti nel quale non c'è un confine ben preciso o definito tra gli oggetti che vi appartengono e quelli che non vi appartengono”.

Un insieme fuzzy è caratterizzato da una **funzione di grado di appartenenza**, che mappa gli elementi di un universo in un intervallo reale continuo $[0,1]$, in cui il valore 0 indica che l'elemento non è *per niente* incluso nell'insieme sfocato, il valore 1 indica che l'elemento è *certamente* incluso nell'insieme (questi due valori corrispondono alla teoria classica degli insiemi), mentre i valori tra zero e uno indicano il grado di appartenenza dell'elemento all'insieme sfocato in questione.

FUNZIONE DI APPARTENENZA

Le funzioni di appartenenza vengono utilizzate per formulare numeri fuzzy.

Lai e Hwang (1994) hanno affermato che *il grado di una funzione di appartenenza indica un grado soggettivo di soddisfazione all'interno di determinate tolleranze.*

Una funzione di appartenenza, solitamente indicata con " μ ", associa ogni punto in un insieme fuzzy con un numero reale nell'intervallo chiuso $[0, 1]$. Indica il grado di appartenenza di un elemento in un insieme fuzzy .

$$\mu_F(x; l, m, n, u) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & ; l < x \leq m \\ 1 & ; m < x \leq n \\ \frac{u-x}{u-n} & ; n < x \leq u \\ 0 & ; otherwise \end{cases}$$

Figura 5. Funzione di appartenenza trapezoidale(Şebnem Yılmaz Balaman , in *Processo decisionale per le catene di produzione basate sulla biomassa* , 2019).

$$\mu_F(x; l, m, u) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & ; l < x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & ; m < x \leq u \\ 0 & ; otherwise \end{cases}$$

Figura 6. Funzione di appartenenza triangolare(Şebnem Yılmaz Balaman , in *Processo decisionale per le catene di produzione basate sulla biomassa* , 2019).

2.1.4 ANALYTIC NETWORK PROCESS (ANP)

L'Analytic Network Process – ANP (Saaty, 2005) si caratterizza come uno sviluppo generalizzato, un'implementazione dell'Analytic Hierarchy Process – AHP (Saaty, 1980; Saaty et al., 1990). La differenza principale tra l'ANP e l'AHP è rappresentata dall'approccio strutturale con cui viene modellato il problema decisionale.

La struttura gerarchica di tipo lineare generata con il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process) non è in grado di riflettere la complessità dei problemi reali, dunque il metodo ANP permette di passare ad una struttura più dinamica che rispecchia meglio le complesse interazioni riguardanti le diverse componenti di un sistema nella realtà.

Il metodo ANP favorisce la rappresentazione di un problema decisionale come un *network* (rete) di elementi organizzati in gruppi secondo rapporti di influenza, mentre nell'AHP le relazioni di dipendenza tra gli elementi dei diversi livelli decisionali sono unidirezionali lungo la gerarchia e non esistono dipendenze. Tuttavia tali limitazioni del metodo AHP vengono risolte dal metodo ANP. In tal modo si genera una struttura non lineare che presenta relazioni di *interdipendenza* e *retroazioni* (o feedback). Considerando l'esistenza di retroazioni le alternative possono dipendere dai criteri, come in una gerarchia, e al contempo i criteri medesimi possono dipendere dalle alternative e dagli altri criteri considerati, (M. Bottero, E. Cinnaghi, V. Ferretti).

L'ANP è un metodo particolarmente efficace per la risoluzione di problemi complessi grazie al suo approccio dinamico e alla capacità di modellare le varie relazioni esistenti tra le componenti di un problema.

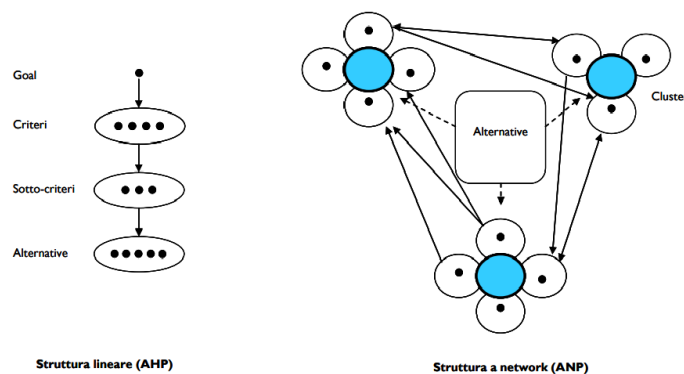


Figura 7. Flusso di dipendenze secondo la struttura lineare e la struttura a network, Saaty, 2005 (Marta Bottero Isabella M. Lami Patrizia Lombardi, Analytic Network Process)

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Strutturazione del problema e costruzione del modello decisionale;
il problema decisionale viene suddiviso in parti elementari (i **nodi**), tali parti sono poi raggruppate in **clusters** cioè serie omogenee di elementi con lo scopo di formare una rete (o network) caratterizzata da dipendenze, interazioni e feedback tra i suddetti elementi.
2. Creazione delle matrici di confronto a coppie;
i confronti a coppie si applicano su due livelli: il livello dei clusters e il livello dei nodi.
La creazione delle matrici di confronto a coppie segue un andamento analogo a quello descritto nel metodo AHP ed utilizza la scala dei rapporti di Saaty (vedi sotto-paragrafo 2.1.2 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP))
3. Costruzione delle supermatrici;
le supermatrici consentono di evidenziare e gestire feedback e dipendenze.
Si utilizzano tre tipologie di sottomatrici: *supermatrice iniziale*, *supermatrice pesata*, *supermatrice limite*.
La supermatrice iniziale è non pesata ed è composta dai vettori priorità generati dal confronto a coppie.
La supermatrice pesata si ottiene moltiplicando i valori della supermatrice iniziale per la matrice ottenuta al livello del confronto tra i clusters.
La supermatrice limite si ottiene moltiplicando la supermatrice pesata per sé stessa un numero di volte tendente a infinito; le sue colonne contengono il vettore delle priorità degli elementi dell'analisi.
4. Aggregazione dei risultati e analisi di sensitività;
per l'aggregazione delle priorità di ciascuna alternativa sono disponibili diverse formule specifiche (Saaty, 2003, 2006; Wijnmalen, 2007).
L'analisi di sensitività permette di valutare la robustezza del modello decisionale.

(La valutazione della sostenibilità di un'infrastruttura stradale attraverso l'Analytic Network Process Marta Bottero, Elisabetta Cinnaghi, Valentina Ferretti, Politecnico di Torino)

2.1.5 ADDITIVE RATIO ASSESSMENT (ARAS)

Il metodo ARAS (Additive Ratio Assessment) è una delle tecniche di analisi multicriterio più recenti sviluppata da Edmundas Kazimieras Zavadskas nel 2010.

Il tipico problema MCDM riguarda il compito di classificare un numero finito di alternative decisionali, ciascuna delle quali è esplicitamente descritta in termini di diversi criteri decisionali che devono essere presi in considerazione simultaneamente. Secondo il metodo ARAS, un valore di funzione di utilità che determina l'efficienza relativa complessa di un'alternativa fattibile è direttamente proporzionale all'effetto relativo dei valori e dei pesi dei principali criteri considerati in un progetto.

(A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making, Edmundas Kazimieras Zavadskas, June 2010)

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Sviluppo della matrice decisionale iniziale;

Il problema da risolvere è rappresentato dalla seguente DMM (Developing Decision Matrix) di preferenze .

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \cdots & x_{0j} & \cdots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; \quad j = \overline{1, n},$$

Figura 8. Matrice decisionale

m = numero di alternative

n = numero di criteri

x_{ij} = valore che rappresenta il valore della prestazione dell'alternativa i in termini del criterio j

x_{0j} = valore ottimale del criterio j

Se il valore ottimale del criterio j è sconosciuto, allora:

$$x_{0j} = \max_i x_{ij}, \text{ if } \max_i x_{ij} \text{ è preferibile;} \\ x_{0j} = \min_i x_{ij}^*, \text{ if } \min_i x_{ij}^* \text{ è preferibile.}$$

I valori delle prestazioni x_{ij} e i pesi dei criteri w_j sono le voci della DMM.

Il sistema di criteri così come i valori e i pesi iniziali dei criteri è determinato da esperti. Le informazioni possono essere corrette dal decision maker tenendo conto dei suoi obiettivi. Lo scopo della fase successiva è ricevere valori ponderati adimensionali dai criteri comparativi.

Per evitare le difficoltà causate dalle diverse dimensioni dei criteri, viene utilizzato il **rapporto con il valore ottimale**.

Esistono varie teorie che descrivono il rapporto rispetto al valore ottimale. Tuttavia, i valori sono mappati sull'intervallo $[0; 1]$ o nell'intervallo $[0; \infty]$ applicando la normalizzazione della DMM.

2. Normalizzazione della matrice decisionale;

I valori iniziali di tutti i criteri vengono normalizzati definendo i valori \bar{x}_{ij} della matrice decisionale normalizzata \bar{X} .

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{01} & \cdots & \bar{x}_{0j} & \cdots & \bar{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{i1} & \cdots & \bar{x}_{ij} & \cdots & \bar{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \cdots & \bar{x}_{mj} & \cdots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}.$$

I criteri, i cui valori preferibili sono massimi, sono normalizzati come segue:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}}.$$

I criteri, i cui valori preferibili sono minimi, sono normalizzati applicando la procedura in due fasi:

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ij}^*}; \quad \bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}}.$$

3. Normalizzazione pesata della matrice decisionale;

La matrice normalizzata pesata è definita da \hat{X} ed è possibile valutare i criteri con pesi $0 < w_j < 1$.

I valori del peso w_j sono solitamente determinati dal metodo di valutazione esperto. La somma dei pesi w_j sarebbe limitata come segue:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 .$$

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \dots & \hat{x}_{0j} & \dots & \hat{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{i1} & \dots & \hat{x}_{ij} & \dots & \hat{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \dots & \hat{x}_{mj} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} ; \quad i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n} .$$

I valori ponderati normalizzati di tutti i criteri sono calcolati come segue

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} w_j ; i = \overline{0, m} ,$$

dove w_j è il peso, ossia l'importanza, del criterio j e x_{ij} è la valutazione normalizzata del criterio j .

4. Determinazione della funzione ottimale per la i -esima alternativa;
il compito seguente è quello di determinare i valori della funzione di ottimalità:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} ; i = \overline{0, m} ,$$

S_i = valore della funzione di ottimalità della i -esima alternativa

Il valore più grande è il migliore mentre il valore minimo è il peggiore. Tenendo conto del processo di calcolo, la funzione di ottimalità S_i ha una relazione diretta e proporzionale con i valori x_{ij} e i pesi w_j dei criteri indagati. Dunque, maggiore è il valore della funzione di ottimalità S_i , quanto più efficace l'alternativa.

Le priorità delle alternative possono essere determinate in base al valore S_i , di conseguenza è conveniente valutare e classificare le alternative decisionali quando si utilizza questo metodo.

5. Calcolo del grado di utilità

Il grado di utilità alternativa è determinato dal confronto della variante analizzata con quella idealmente migliore S_0 .

Di seguito si riporta l'equazione utilizzata per il calcolo del grado di utilità K_i di un'alternativa i :

$$K_i = \frac{S_i}{S_0}; i = \overline{0, m},$$

dove S_i e S_0 sono i valori del criterio di ottimalità.

I valori calcolati K_i sono nell'intervallo $[0, 1]$ e possono essere ordinati in una sequenza crescente, che è l'ordine di precedenza desiderato.

L'efficienza relativa complessa dell'alternativa ammissibile può essere determinata in base ai valori della funzione di utilità.

(A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making, Edmundas Kazimieras Zavadskas, June 2010)

2.1.6 SIMPLE MULTI-ATTRIBUTE RATING TECHNIQUE (SMART)

Il metodo SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique), tradotto “semplice tecnica di valutazione multi-attributo”, è un sistema di supporto alle decisioni completo che combina le capacità di un computer in servizi interattivi con elaborazione o manipolazione di dati o modelli che utilizzano regole non strutturate.

Il metodo prende in considerazione aspetti qualitativi e quantitativi e grazie all’informatizzazione cerca di risolvere eventuali carenze di altre tecniche di analisi.

La tecnica SMART viene applicata assegnando valori di peso a ciascun criterio del problema decisionale al fine di mostrare quanto siano importanti determinati criteri rispetto ad altri.

Definizione della sequenza di passi per l’applicazione del metodo:

1. Determinazione del numero di criteri utilizzati.
2. Assegnazione dei pesi a ciascun criterio utilizzando l'intervallo 1-100 , generando un ordine di priorità.
3. Calcolo della normalizzazione di ciascuno dei criteri confrontando i pesi dei criteri per il numero di criteri ponderati.

La normalizzazione è descritta dalla formula seguente

$$= \frac{w_j}{\sum w_j}$$

w_j = valore del peso del criterio

$\sum w_j$ = valore del peso totale di tutti i criteri

4. Aggregazione dei valori di ogni criterio alle alternative
5. Determinazione del valore dell'utilità per convertire il valore di ciascun criterio nel valore dei criteri dei dati grezzi.

Il valore di utilità è descritto da:

$$u_i(a_i) = \frac{c_{out} - c_{min}}{c_{max} - c_{min}}$$

$u_i(a_i)$ = valore di utilità del criterio t_{0-1} rispetto al criterio $t_0 - I$

c_{max} = valore del criterio minimo

c_{min} = valore del criterio massimo

c_{out} = valore del criterio $t_0 - I$

L'importanza di tali valori è:

$$c_{out} \ i = u_i(a_i), 1 = 0 ; 2 = 0.5 ; 3 = 1$$

6. Determinazione del valore finale di ciascun criterio spostando i valori ottenuti dal valore normalizzato dei criteri dei dati grezzi con i criteri del valore normalizzato del peso.

(International Journal of Scientific Research in Science and Technology, Study of the Simple Multi-Attribute Rating Technique For Decision Support Risawandi , Robbi Rahim², University of Malikussaleh, Jl.Cot Teungku Nie-Reulet, North Aceh, Aceh, Indonesia Departement of Computer Engineering, Medan Institute of Technology, Jalan Gedung Arca No.52, Medan, Indonesia)

2.1.7 TECHNIQUE FOR ORDER OF PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION (TOPSIS)

Il metodo TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) è stato sviluppato da Hwang e Yoon nel 1981 (Hwang & Yoon, 1981).

Lo scopo di questo metodo consiste nello scegliere, come migliore alternativa, quella che si trova più vicino (minor distanza geometrica) alla soluzione ottimale e più distante (maggior distanza geometrica) dalla soluzione peggiore (Tzeng & Huang, 2011).

Il TOPSIS è un metodo di aggregazione **compensativa** che confronta un insieme di alternative, normalizza i punteggi per ogni criterio e calcola poi la distanza geometrica tra ogni alternativa e l'alternativa ideale. Essendo un metodo compensativo, inoltre, permette di attuare dei “compromessi” tra criteri: un basso risultato in un criterio sarà compensato (e negato) da un buon risultato in un altro criterio.

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Costruzione della matrice decisionale normalizzata;

Gli elementi di tale matrice sono rappresentati da:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k.$$

y_{ij} = valore dell'attributo j per l'alternativa i

2. Determinazione della matrice decisionale normalizzata pesata;

Gli elementi della matrice sono:

$$x_{ij} = w_j z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k$$

w_j = peso del j-esimo attributo

3. Definizione di un punto di ottimo ideale a^* ed uno pessimo a^- ;

$$\begin{aligned} a^* &= \{(\max_i x_{ij} \mid j \in J), (\min_i x_{ij} \mid j \in \hat{J}) \mid i = 1, \dots, n\} \\ &= \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^- &= \{(\min_i x_{ij} \mid j \in J), (\max_i x_{ij} \mid j \in \hat{J}) \mid i = 1, \dots, n\} \\ &= \{x_1^-, x_2^-, \dots, x_k^-\} \end{aligned}$$

J = insieme degli indici da massimizzare (vantaggi, profitti)

\hat{J} = insieme degli indici da minimizzare (costi)

4. Calcolo delle distanze geometriche dell'alternativa da:

- **ideal point a^*** (ovvero l'alternativa ideale)

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^*)^2} \quad i = 1, \dots, n$$

- **negative ideal point a** – (ovvero l'opposto di a*)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^-)^2} \quad i = 1, \dots, n$$

5. Calcolo della vicinanza relativa (relative closeness) di ogni design dall'ideal point;

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad i = 1, \dots, n$$

6. Ordinamento delle alternative in base alla grandezza C_i^* dalla migliore alla peggiore;

In particolare se $C_i^* > C_j^*$ allora l'alternativa a_i supera di grado l'alternativa a_j .

2.1.8 CONCORDANCE AND DISCORDANCE ANALYSES BY SIMILARITY TO IDEAL DESIGNS (CODASID)

Il metodo CODASID (COncordance and Discordance Analyses by Similarity to Ideal Designs) è, analogamente al metodo TOPSIS (vedi sotto-paragrafo 2.1.7), un algoritmo che si fonda sulla logica del “superamento di grado”.

Lo scopo del metodo è di individuare le alternative migliori attraverso l'estensione del concetto di dominanza sulla base dei giudizi di preferenza espressi dal decision maker.

Il metodo prevede confronti binari tra le alternative e l'utilizzo di tre indici specifici che esprimono la dominanza di una soluzione rispetto all'altra.

Gli indici sono:

- *preference concordance index;*
- *evaluation concordance index;*
- *discordance index;*

Tali indici stime diverse e non dipendenti tra loro delle caratteristiche di ogni design, in maniera tale da creare un nuovo spazio nel quale avanzare con la ricerca dell'alternativa migliore.

Attraverso, poi, la programmazione lineare ed un processo iterativo che permette di sistemare i pesi dei tre indici considerati avviene l'unione di tutte le informazioni.

Infine, similmente al metodo TOPSIS, si termina effettuando la misura della distanza tra ogni alternativa differente e due design ideali all'interno del nuovo spazio di ricerca delle soluzioni, che rappresenteranno rispettivamente la migliore e la peggiore scelta effettuabili.

2.1.9 ELIMINATION ET CHOIX TRADUISANT LA REALITÉ (ELECTRE)

Il metodo ELECTRE (ELimination Et Choix TRaduisant la REalità), tradotto “eliminazione e scelta che esprimono la realtà”, è stato sviluppato per la prima volta da Bernard Roy, professore dell’Università Dauphine di Parigi a partire dalla fine degli anni ’60, con lo scopo di generare un metodo decisionale il più aderente possibile alla realtà.

Tuttavia non è corretto parlare di “metodo” ,piuttosto bisogna parlare di “famiglia di metodi” in quanto esistono molte varianti del metodo ELECTRE che prendono il nome di ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS, ELECTRE TRI...

Le varianti di tale metodo però, non saranno oggetto di trattazione.

Tratteremo il metodo originario e non derivato che viene indicato come ELECTRE I.

L’ELECTRE I segue un approccio basato sull’analisi di coppie di alternative attraverso indicatori sintetici di *concordanza* e *discordanza*.

In particolare il metodo costruisce una relazione di preferenza (outranking) tra le alternative.

Una relazione di preferenza è definita come:

“Date due alternative distinte A_h e A_k , A_h è preferibile ad A_k secondo il criterio j se

$c_{hj} \geq c_{kj}$, e si esprime come $A_h P_j A_k$ ”

In particolare, se A_h è preferibile ad A_k allora si dice che A_k è dominata da A_h .

Definizione della sequenza di passi per l'applicazione del metodo:

1. Costruzione della **matrice di concordanza** e della **matrice di discordanza** ;
Per ogni coppia (A_h, A_k) con $h, k=1, \dots, m$ e $h \neq k$ si definiscono $[C_{hk}]$ matrice di concordanza e $[D_{hk}]$ matrice di discordanza, i cui elementi sono indicati come:

$$c_{hk} = \frac{\sum_{j: A_h P_j A_k} w_j}{\sum_j w_j} \quad d_{hk} = \max_{j: A_k P_j A_h} \left\{ \frac{c_{kj} - c_{hj}}{\max_{u,v} |c_{uj} - c_{vj}|} \right\}$$

La matrice di concordanza tiene conto del peso dei **criteri per i quali h è preferibile a k**, mentre la matrice di discordanza tiene conto del **criterio che si oppone maggiormente alla preferenza di h su k**.

2. Calcolo della matrice F (**matrice di dominanza di concordanza**) e della matrice G (**matrice di dominanza di discordanza**);

- elementi della matrice F:

$$f_{hk} = \begin{cases} 1 & \text{se } c_{hk} \geq c_0 \\ 0 & \text{se } c_{hk} < c_0 \end{cases}$$

$c_0 < 1$ = soglia per l'indice di concordanza

- elementi della matrice G:

$$g_{hk} = \begin{cases} 1 & \text{se } d_{hk} \leq d_0 \\ 0 & \text{se } d_{hk} > d_0 \end{cases}$$

$d_0 < 1$ = soglia per l'indice di discordanza

3. Calcolo della **matrice di dominanza aggregata**;

La matrice di dominanza aggregata viene definita E ed i suoi elementi e_{hk} .

Questa matrice permette un ordinamento parziale delle alternative.

Gli elementi di tale matrice sono dati dal prodotto tra gli elementi f_{hk} e g_{hk} .

Esempio di una matrice di dominanza aggregata:

| e_{hk} | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| A_1 | - | 0 | 1 | 1 |
| A_2 | 0 | - | 0 | 0 |
| A_3 | 0 | 0 | - | 0 |
| A_4 | 0 | 0 | 0 | - |

Figura 9. Matrice di dominanza aggregata

Se $e_{hk} = 1$ allora A_h è preferita ad A_k .

(Fonte: <http://www.dia.uniroma3.it/~pacciare/CORSI/MSDM/Lucidi4.pdf>)

2.1.10 PREFERENCE RANKING ORGANIZATION METHOD FOR ENRICHMENT EVALUATIONS (PROMETHEE)

Il metodo PROMETHEE è stato creato dal professor Jean-Pierre Brans nel 1982.

A quel tempo includeva solo le classifiche di base PROMETHEE I e II. Subito dopo Bertrand Mareschal iniziò a lavorare con Jean-Pierre Brans allo sviluppo del metodo. Le estensioni PROMETHEE III (ordine di intervallo) e IV (continuo) furono proposte nel 1983.

A quel tempo fu implementato un primo programma per computer (mainframe). Tra il 1984 e il 1989 si sono verificate due importanti pietre miliari: il metodo GAIA è stato creato come estensione descrittiva di PROMETHEE e il software (MS-DOS) PROMCALC è stato messo a disposizione degli utenti di PROMETHEE.

Negli anni '90 sono stati creati ulteriori strumenti basati su PROMETHEE: PROMETHEE V ha fornito una soluzione per la selezione multicriterio vincolata di un sottoinsieme di azioni mentre PROMETHEE VI ha introdotto la nozione di "cervello decisore" in GAIA, (Preference Ranking Organization Method Of Enrichment Evaluation (Promethee) BY ,S.C.Deshmukh ,BVDU, COE Pune).

Il metodo PROMETHEE è un sistema di aiuto alla decisione multicriterio che permette di generare un surclassamento tra diverse alternative, ovvero di dimostrare una schiacciante superiorità di un'alternativa rispetto ad un'altra.

Saranno argomento di trattazione le fasi principali del metodo PROMETHEE, mentre le varie implementazioni di tale metodo che permettono di giungere a risultati migliori non saranno analizzate.

Definizione della sequenza dei passi fondamentali per l'applicazione del metodo:

1. Rappresentazione della tabella di valutazione;

Considerando un insieme di alternative $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, allora $f_j(a)$ rappresenta la funzione di valutazione di una soluzione a rispetto al criterio f_j .

| | $f_1(\cdot)$ | $f_2(\cdot)$ | ... | $f_j(\cdot)$ | ... | $f_k(\cdot)$ |
|-------|--------------|--------------|-----|--------------|-----|--------------|
| a_1 | $f_1(a_1)$ | $f_2(a_1)$ | ... | $f_j(a_1)$ | ... | $f_k(a_1)$ |
| a_2 | $f_1(a_2)$ | $f_2(a_2)$ | ... | $f_j(a_2)$ | ... | $f_k(a_2)$ |
| A_i | $f_1(a_i)$ | $f_2(a_i)$ | ... | $f_j(a_i)$ | ... | $f_k(a_i)$ |
| A_n | $f_1(a_n)$ | $f_2(a_n)$ | ... | $f_j(a_n)$ | ... | $f_k(a_n)$ |

Figura 10. Tabella di valutazione generica. Fonte: Preference Ranking Organization Method Of Enrichment Evaluation (Promethee) BY ,S.C.Deshmukh ,BVDU, COE Pune

2. Arricchimento della struttura delle preferenze;

Si definisce la funzione di preferenza $P_j(a,b)$ come una funzione che fornisce il grado di preferenza della soluzione a rispetto alla soluzione b per un determinato criterio f_j .

Considerando che tale funzione sia normalizzata e che essa sia una funzione della deviazione $d = f(a)-f(b)$ allora avremo:

- $0 \leq P_j(a,b) \leq 1$;
- $P_j(a,b) = 0$ se $d \leq 0$, relazione di indifferenza;
- $P_j(a,b) \approx 0$ se $d < 0$, relazione di preferenza debole;
- $P_j(a,b) \approx 1$ se $d \gg 0$, relazione di preferenza forte;
- $P_j(a,b) = 1$ se $d \gg \gg 0$, relazione di preferenza rigorosa;

Il metodo richiede che ad ogni criterio sia associato un criterio generalizzato. Il criterio generalizzato associato a $f(\cdot)$ è quindi definito dalla coppia $(f(\cdot), P(\cdot, \cdot))$.

3. Arricchimento della relazione di dominanza;

Viene costruita una relazione di **surclassamento** valutata che tiene conto di tutti i criteri.

I valori p e q indicano rispettivamente le soglie di **indifferenza** e di **preferenza**.

- se la differenza tra le valutazioni di a e b è *minore di q* non è significativa, e la preferenza di a su b è quindi pari a zero.
- se la differenza tra le valutazioni di a e b è *maggiore di p* è considerata molto significativa, e la corrispondente preferenza è quindi pari a uno.

E' possibile, a tal proposito, caratterizzare un indice di preferenza multicriterio $\pi(a,b)$ di a su b , che tiene conto di tutti i criteri:

$$\pi(a,b) = \sum w_j \cdot P_j(a,b) \text{ con } j=1, \dots, k$$

w_j = peso associato ad ogni criterio j

4. Definizione dei flussi di surclassamento;

- Flusso di surclassamento positivo: esprime fino a che punto un'alternativa supera tutte le altre.

Si esprime come

$$\Phi^+(a) = 1/n - 1 \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(a, b)$$

- Flusso di surclassamento negativo: esprime fino a che punto un'alternativa è superata da tutte le altre.

Si esprime come

$$\Phi^-(a) = 1/n - 1 \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(b, a)$$

CAPITOLO 3: CASI DI APPLICAZIONE

3.1 INTRODUZIONE AI CASI STUDIO DI APPLICAZIONE DEI METODI MCDM

I metodi multi-criteria presentano numerose applicazioni sia nella vita quotidiana che in contesti finanziari, politici, medici, ingegneristici, aziendali, ambientali, riguardanti la sostenibilità e l'energia, ecc...

Tali metodi permettono di trattare un processo decisionale contraddistinto da molteplici criteri contrastanti fra loro. Tra i criteri che generalmente si trovano in disaccordo all'interno di un contesto decisionale, i più noti sono : il criterio di costo (generalmente bisogna minimizzare i costi) e il criterio della qualità (generalmente si vuole massimizzare a qualità). E' alquanto difficile ottenere un'alta qualità a costi bassissimi.

Una corretta struttura del problema complesso che viene preso in esame dal decisore e la considerazione di più criteri di valutazione porta il decision maker ad una soluzione (decisione) più accurata e informata.

A tal proposito il seguente capitolo passa in rassegna due differenti casi di applicazione di alcuni dei metodi di analisi multi-criteria. Talvolta per un caso studio viene anche mostrata l'applicazione di più di un singolo metodo MCDA con lo scopo di esaltare le possibili differenze tra i metodi e confrontarli.

Inizialmente sarà mostrato un caso studio del 2015 effettuato da Davide Fiorello, coordinatore studi modellistici della società TRT Trasporti e Territori con sedi a Milano e Bruxelles, e successivamente approvato da Fabio Torta, direttore di TRTingegneria.

Questo caso studio si focalizza sull'applicazione della metodologia di analisi multi-criteria AHP (Analytic Hierachy Process) per la valutazione delle alternative progettuali riguardanti le connessioni ferroviarie tra il Porto di Livorno, interporto di Guasticce, linea Pisa-Collesalveti-Vada e linea Firenze-Pisa.

Successivamente sarà illustrato un caso studio con applicazione dei metodi di analisi multi-criteria TOPSIS e PROMETHEE sul settore delle energie rinnovabili in Lettonia, effettuato da Beate Zlaugotne, Lauma Zihare , Lauma Balode, Antra Kalnbalkit e Dagnija Blumberga dell' "Institute of Energy Systems and Environment, Riga Technical University" in Lettonia e Aset Khabdullin del "Rudny Industrial Institute" , Repubblica del Kazakistan.

3.1.1 CASO STUDIO DEL PROGETTO “RACCORDO”: CONNESSIONI FERROVIARIE TRA IL PORTO DI LIVORNO, INTERPORTO DI GUASTICCE, LINEA PISA-COLLESALVETTI-VADA E LINEA FIRENZE-PISA

Il caso studio è stato effettuato per valutare la convenienza delle varie alternative progettuali riguardanti le connessioni ferroviarie tra il porto di Livorno, l'interporto di Guasticce, la linea Pisa-Collesalveti-Vada e la linea Firenze-Pisa.

Inizialmente un'analisi costi-benefici (ABC) ha garantito la fattibilità di tale progetto a prescindere dalle varie alternative considerate.

Tuttavia un'analisi multi-criteria è stata effettuata per l'individuazione dell'alternativa progettuale migliore in base a delle priorità anticipatamente definite.

Sono stati effettuati i passi fondamentali di una tecnica di analisi multi-criteria spiegati nel sotto-paragrafo 1.2.2 FASI PRINCIPALI DELL' ANALISI MULTI-CRITERIA.

In particolare si illustrano le fasi seguenti:

1. identificazione delle alternative;
2. identificazione dei criteri di valutazione;
3. stima dei pesi da attribuire ai criteri;
4. misurazione delle caratteristiche di ciascuna alternativa in relazione a ciascun criterio ;
5. normalizzazione delle misure secondo una scala confrontabile;
6. calcolo dei valori sintetici.

FASE 1:

Le alternative prese in considerazione sono:

ALTERNATIVA 1 = Tracciato parallelo allo Scolmatore del fiume Arno

ALTERNATIVA 2 = Tracciato in adiacenza al nodo di Pisa Centrale

ALTERNATIVA 3 = Tracciato intermedio con innesto sulla linea Pisa-Firenze a Visignano

FASE 2:

I criteri di valutazione sono stati definiti attraverso il confronto con il Gruppo di Lavoro (GdL) del progetto Raccordo ed in particolare con i progettisti.

In particolare sono stati identificati quattro criteri principali, ognuno di essi articolato in sottocriteri.

| Criterio | Sottocriteri |
|--------------------------|--|
| Impatti ambientali | Aspetti idrologici |
| | Rumore |
| | Consumo di suolo |
| | Impatto visivo/paesaggio |
| Complessità del progetto | Costo di investimento e manutenzione |
| | Durata della costruzione |
| | Problematiche di cantiere |
| Impatti economici | Impatto nel settore trasporti/logistica |
| | Riduzione suolo agricolo |
| | Variazione valori immobiliari |
| Efficacia trasportistica | Capacità della linea |
| | Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto |
| | Sicurezza |

Figura 11. Tabella dei criteri e sottocriteri

(Fonte: <https://www.portaltotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>)

FASE 3:

La stima dei pesi da attribuire ai criteri e ai sottocriteri considerati è stata effettuata con il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process).

Il metodo AHP prevede un confronto a coppie dei criteri per valutare in ciascuna coppia quale criterio è prevalente o se i due criteri presentano la stessa rilevanza.

Mediante questa analisi di confronto a coppie è possibile stimare i pesi da attribuire a ciascun criterio rispettando il vincolo secondo cui la somma totale dei pesi deve essere pari ad 1.

Nel caso preso in considerazione il confronto a coppie dei criteri è stato effettuato in due fasi. La prima fase ha analizzato il confronto tra i quattro criteri presi in considerazione, mentre la seconda fase si è focalizzata sul confronto dei sotto-criteri relativi a ciascun criterio.

In particolare la scala di confronto utilizzata era costituita da cinque livelli e il livello intermedio di tale scala rappresentava la stessa importanza di due criteri a confronto.

Esempio di confronto tra due criteri (tratto da <https://www.portialtotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>):

| Criteria a confronto | Giudizio |
|--|--|
| Impatti ambientali Vs. Complessità del progetto | <input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali sono indubbiamente più importanti della complessità del progetto <input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali sono un po' più importanti della complessità del progetto <input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali e la complessità del progetto hanno la stessa importanza <input type="checkbox"/> La complessità del progetto è un po' più importante degli impatti ambientali <input type="checkbox"/> La complessità del progetto è indubbiamente più importante degli impatti ambientali |

Figura 12. Tabella di confronto

Tabella degli indicatori utilizzati per i sottocriteri

(tratta da: <https://www.portialtotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>):

| Criterio | Sottocriteri | Indicatore |
|--------------------------|--|---|
| Impatti ambientali | Aspetti idrologici | n. corsi d'acqua attraversati e loro importanza |
| | Rumore | km in adiacenza ai centri abitati e/o ricettori sensibili |
| | Consumo di suolo | mq consumo di suolo |
| | Impatto visivo/paesaggio | lunghezza x altezza viadotti |
| Complessità del progetto | Costo di investimento e manutenzione | Costo di realizzazione opera (importo lavori) |
| | Durata della costruzione | Durata della costruzione (giorni) |
| | Problematiche di cantiere | km in adiacenza centri abitati x densità abitativa |
| Impatti economici | Impatto nel settore trasporti/logistica | - |
| | Riduzione suolo agricolo | consumo suolo agricolo x Valore Agricolo Medio dei terreni attraversati |
| | Variazione valori immobiliari | - |
| Efficacia trasportistica | Capacità della linea | lunghezza in metri del tratto di linea maggiormente caricato su cui l'alternativa aggiungerebbe impegno di capacità |
| | Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto | n° treni/giorno sulle linee dove insistono i collegamenti |
| | Sicurezza | Indice di rischio globale per il trasporto delle merci pericolose su ferrovia (fattore principale correlato alla densità di popolazione, vedi testo in appendice) |

Figura 13. Tabella degli indicatori

Stima dei pesi:

“Il confronto a coppie di 4 criteri determina un totale di 6 confronti. Dovendo ottenere un peso complessivo pari a 1, ogni confronto dovrà dunque contribuire con un peso pari a 1/6. Si assume che nel caso in cui il criterio A sia giudicato indubbiamente più importante del criterio B, il primo riceva l’intero peso di 1/6 e il secondo un peso pari a 0. Si assume poi che quando i due criteri sono giudicati di eguale importanza si dividano il peso: 1/12 ciascuno. Infine, il caso in cui il criterio A è giudicato un po’ più importante del criterio B è intermedio tra i due precedenti e il peso è ripartito in modo asimmetrico: 3/24 al primo e 1/24 al secondo. Quando il confronto riguarda tre elementi il principio è analogo con la differenza che ogni confronto contribuisce con un peso complessivo pari a 1/3, (Davide Fiorello)”.

Tabella dei pesi stimati per ciascun criterio:

| Criterio | Porto di Livorno | RFI | Provincia di Livorno | Interporto Vespucci | Regione Toscana | MEDIA |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------|
| Impatti ambientali | 0.13 | 0.29 | 0.50 | 0.17 | 0.21 | 0.258 |
| Complessità del progetto | 0.29 | 0.17 | 0.00 | 0.21 | 0.29 | 0.192 |
| Impatti economici | 0.13 | 0.21 | 0.33 | 0.29 | 0.17 | 0.225 |
| Efficacia trasportistica | 0.46 | 0.33 | 0.17 | 0.33 | 0.33 | 0.325 |
| Totale | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.000 |

Figura 14. Tabella dei pesi associati ai criteri

Tabella dei pesi stimati per ciascun sottocriterio:

| Sottocriterio | Porto di Livorno | RFI | Provincia di Livorno | Interporto Vespucci | Regione Toscana | MEDIA |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------|
| Impatti ambientali | | | | | | |
| Aspetti idrologici | 0.25 | 0.42 | 0.50 | 0.42 | 0.29 | 0.375 |
| Rumore | 0.25 | 0.29 | 0.13 | 0.29 | 0.21 | 0.233 |
| Consumo di suolo | 0.08 | 0.00 | 0.13 | 0.08 | 0.29 | 0.117 |
| Impatto visivo/paesaggio | 0.42 | 0.29 | 0.25 | 0.21 | 0.21 | 0.275 |
| Totale | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.000 |
| Complessità del progetto | | | | | | |
| Costo di investimento e manutenzione | 0.67 | 0.67 | 0.25 | 0.42 | 0.42 | 0.483 |
| Durata della costruzione | 0.17 | 0.33 | 0.33 | 0.50 | 0.58 | 0.383 |
| Problematiche di cantiere | 0.17 | 0.00 | 0.42 | 0.08 | 0.00 | 0.133 |
| Totale | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.000 |

Figura 15. Tabella dei pesi stimati dei sottocriteri

(tabelle tratte da: <https://www.portaltotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>)

FASE 4:

La misurazione delle caratteristiche di ciascuna alternativa in relazione a ciascun criterio e sottocriterio è stata sviluppata dai progettisti e dai responsabili delle analisi ambientali.

“Essi hanno fornito le valutazioni relative agli impatti attesi per le diverse alternative misurando tali impatti in una forma (sintetica) specifica in funzione della natura di ciascun sottocriterio, (Davide Fiorello)”.

Tabella delle caratteristiche attribuite a ciascuna alternativa per ciascun sottocriterio (tratta da: <https://www.portaltotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>):

| Criteria | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---|--|--|---|
| Impatti ambientali | | | |
| Aspetti idrogeologici | 2 corsi d'acqua attraversati di media importanza + 1 di bassa importanza | 0 corsi d'acqua attraversati | 1 corso d'acqua attraversato di media importanza + 1 di bassa importanza |
| Rumore | 2 500 | 1 050 | 1 250 |
| Consumo di suolo | 221 040 mq | 4 965 mq | 81 009 mq |
| Impatto visivo/paesaggio | 17 600 | 0 | 18 650 |
| Complessità del progetto | | | |
| Costi | € 83 618 771.81 | € 19 555 398.72 | € 55 450 834.61 |
| Durata dei lavori | 1500 giorni | 850 giorni | 1100 giorni |
| Problematiche di cantiere | 0 | 945 000 | 375 000 |
| Impatti economici | | | |
| Riduzione suolo agricolo | 176 832 | 0 | 202 523 |
| Variazioni immobiliari | È probabile che alcuni terreni e immobili produttivi e logistici aumentino di valore | Non si apprezzano variazioni di valori degli immobili (rischi di riduzione nelle aree urbane di Pisa) e dei treni | È probabile che alcuni terreni e immobili produttivi e logistici aumentino di valore |
| Impatto occupazionale nel settore trasporti/logistica | Effetti elevati per la dimensione dell'investimento e la vicinanza delle tratte ad aree logistiche e produttive | Buoni effetti occupazionali e logistici | Effetti elevati per la dimensione dell'investimento e la vicinanza delle tratte ad aree logistiche e produttive |
| Efficacia trasportistica | | | |
| Capacità della linea | 0 | 16 050 | 12 150 |
| Regolarità linea | In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerate si osserva il massimo grado raggiungibile di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi | In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerate si osserva un aumento modesto di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi | In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerate si osserva un buon aumento di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi |
| Sicurezza | La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta molto bassa | La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta elevata | La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta bassa |

Figura 16. Tabella delle caratteristiche attribuite a ciascuna alternativa

FASE 5:

La normalizzazione delle misure secondo una scala confrontabile;

Le caratteristiche delle alternative rispetto ad ogni criterio devono essere espresse secondo una scala omogenea, tuttavia la definizione di tali caratteristiche è stata effettuata sulla base di indicatori diversi. Dunque, nasce la necessità di normalizzare tali indicatori.

Per normalizzare gli indicatori è stata determinata una corrispondenza tra il livello di ogni indicatore e una scala a 5 livelli in cui il livello 1 rappresenta l'impatto più favorevole e il livello 5 rappresenta l'impatto meno favorevole.

“Ad esempio, per quanto riguarda il sottocriterio “aspetti idrologici”, il livello 1 corrisponde a nessun impatto (nessun corso d'acqua attraversato), mentre il livello 5 corrisponde a un notevole impatto idrologico (numerosi corsi d'acqua attraversati, inclusi alcuni rilevanti), (Davide Fiorello)”.

Tabella dei punteggi normalizzati

(tratta da: <https://www.portialtotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>):

| Sottocriterio | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Impatti ambientali | | | |
| Aspetti idrologici | 4 | 1 | 2 |
| Rumore | 3 | 1 | 2 |
| Consumo di suolo | 4 | 1 | 2 |
| Impatto visivo/paesaggio | 3 | 1 | 3 |
| Complessità del progetto | | | |
| Costo di investimento e manutenzione | 4 | 2 | 3 |
| Durata della costruzione | 2 | 1 | 1 |
| Problematiche di cantiere | 1 | 3 | 2 |
| Impatti economici | | | |
| Impatto nel settore trasporti/logistica | 1 | 2 | 1 |
| Riduzione suolo agricolo | 3 | 1 | 3 |
| Variazione valori immobiliari | 2 | 3 | 2 |
| Efficacia trasportistica | | | |
| Capacità della linea | 1 | 3 | 2 |
| Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto | 1 | 4 | 2 |
| Sicurezza | 1 | 4 | 2 |

Figura 17. Tabella dei punteggi normalizzati

FASE 6:

Infine viene effettuata una valutazione complessiva delle alternative attraverso la formula:

$$V_a = \sum_K W_K \sum_k PC_{k|K;a} \cdot w_{k|K}$$

$w_{k|K}$ = peso del sottocriterio k relativo al criterio K

$PC_{k|K;a}$ = punteggio attribuito all'alternativa a riguardo al sottocriterio k facente parte del criterio K

W_K = peso del criterio K

I punteggi sono stati assegnati secondo una logica che attribuisce un livello più basso all'impatto più favorevole e viceversa.

A tal proposito l'alternativa migliore V_a sarà quella che corrisponderà ad una valutazione più bassa.

Infine i risultati che Davide Fiorello ha ottenuto tramite lo studio sono stati i seguenti:

ALTERNATIVA 1 = 2,182

ALTERNATIVA 2 = 2,202

ALTERNATIVA 3 = 2,001

Concludendo, questa analisi multi-criteria illustra che l'alternativa migliore è l'ALTERNATIVA 3 corrispondente al "Tracciato intermedio con innesto sulla linea Pisa-Firenze a Visignano".

3.1.2 CASO STUDIO LETTONIA: SETTORE DELLE ENERGIE RINNOVABILI. CONFRONTO TRA METODI

Lo studio condotto da Beate Zlaugotne, Lauma Zihare , Lauma Balode, Antra Kalnbalkit e Dagnija Blumberga dell’ “Institute of Energy Systems and Environment, Riga Technical University” in Lettonia e Aset Khabdullin del “Rudny Industrial Institute” , Repubblica del Kazakistan, ha avuto come obiettivo quello di questo utilizzare gli stessi dati di input per cinque metodi MCDA e vedere se la classifica delle alternative sarebbe stata la stessa o diversa per ciascun metodo e, naturalmente, per vedere qual è la migliore tecnologia di energia rinnovabile per la Lettonia.

I metodi utilizzati dagli studiosi sono stati: AHP, TOPSIS, VIKOR, COPRAS, MULTIMOORA e PROMETHEE GAIA.

Tuttavia in tale dissertazione prenderemo in considerazione solo i risultati ottenuti con l’applicazione dei metodi AHP, TOPSIS e PROMETHEE, poiché argomenti di trattazione nel CAPITOLO 2 “METODI DI ANALISI MULTI-CRITERIA”.

Le alternative considerate dagli studiosi per la scelta della miglior tecnologia di energia rinnovabile per la Lettonia sono state:

ALTERNATIVA 1 = il solare fotovoltaico (PV)

ALTERNATIVA 2 = gli impianti eolici (WPP)

ALTERNATIVA 3 = gli impianti idroelettrici (HPP)

ALTERNATIVA 4 = le biomasse e il biogas combinato di calore ed elettricità (CHP)
(Bio-energy CHP)

Sono stati considerati sette criteri di valutazione su costo, emissioni di CO2 e capacità elettrica.

I dati in input (criteri con valori e alternative) sono stati presi da "Progressi nelle tecnologie per l'energia rinnovabile: potenziale innovativo in Lettonia".

| Criteri | Alternative | | | |
|--|-------------------------|------|----------------------------|---------|
| | Solare fotovoltaico WPP | HPP | Cogenerazione a bioenergia | |
| C1 Potenza elettrica installata, MW | 1 | 77 | 1565 | 155 |
| C2 Costo investimento, €/kW | 1238 | 3565 | 1388 | 1113.5 |
| C3 Costo di esercizio e manutenzione, €/kW | 12.37 | 26.7 | 2.67 | 0,00446 |
| Prezzi delle apparecchiature C4 RES per produttore, €/kW 430 | | 1380 | 1290 | 3787.5 |
| C5 Costo livellato dell'energia elettrica, €/kW | 0.08 | 0.06 | 0.09 | 0,075 |
| C6 Emissioni di CO2 del ciclo di vita , gCO2eq/kWh | 200 | 150 | 150 | 200 |
| C7 Creazione di posti di lavoro, migliaia | 3095 | 1155 | 865 | 528 |

Figura 18. Tabella dei dati in input

In particolare, come si evince dall'analisi dei metodi effettuata nel CAPITOLO 2 per alcuni metodi MCDA è importante riconoscere se è meglio massimizzare o ridurre al minimo il valore dei criteri.

In questo studio, è meglio ridurre al minimo la maggior parte dei valori dei criteri e massimizzare solo la capacità elettrica e le possibilità di lavoro.

Confronto tra metodi:

| | TOPSIS | PROMETHEE | AHP |
|-------------------------------------|--|--|---|
| Tipo di normalizzazione | Normalizzazione del vettore (radice quadrata della somma (normalizzazione L2)) | La normalizzazione viene eseguita automaticamente | Normalizzazione del vettore (somma) |
| adeguatezza | Problemi di scelta, problemi di ranking | Problemi di scelta, problemi di classifica, problemi di descrizione (GAIA) | Problemi di scelta, problemi di classifica, problemi di smistamento (AHP _{nr1}) |
| Ingressi | Opzione ideale e anti-ideale pesi | Soglie di indifferenza e preferenza pesi | Confronto a coppie su scala di rapporti (1-9) |
| Uscite | Classifica completa con punteggio di vicinanza all'ideale e distanza all'antiideale | Graduatoria parziale e completa (diplomi in outranking a coppie) | Classifica completa con punteggi |
| Funzione di preferenza | Metrica della distanza (distanza euclidea, distanza di Manhattan, distanza di Tchebycheff) | Al solito, lineare, a forma di U, Forma a V, livello, gaussiana | |
| Approccio | Qualitativo e/o quantitativo Quantitativo | Qualitativa e/o quantitativa | qualitativo |
| Scala di classifica da 0 a 1 | | -1 a 1 | 0 a 1 |
| La migliore alternativa | Valore massimo | Valore massimo | Valore massimo |
| Livelli di coerenza | senza restrizioni | 7±2 | 9 |
| Software | MS Excel, Matlab, Decide | Prometeo visivo, Laboratorio Decisionale, D Sight, Smart Picker Pro | MS Excel, Make ItRational, ExpertChoice, Decisione Obiettivo, HIPRE 3+, RightChoiceDSS, Criterium, EasyMind, Questfox, ChoiceResults, 123AHP, DECERNE |

Figura 19. Tabella di confronto tra metodi

APPLICAZIONE METODO AHP:

Il metodo Analytical Hierarchy Process (AHP) favorisce l'organizzazione delle varie variabili in livelli gerarchici e aiuta gli esperti a valutare ogni criterio rispetto ad un altro criterio.

L'AHP prevede il confronto a coppie tra criteri . La stima dei pesi dei criteri viene effettuata mediante l'utilizzo della scala di Saaty (vedi sotto-paragrafo 2.1.2 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)).

Una volta generata la matrice dei confronti a coppie è necessario normalizzarla ed estrapolare il priority vector.

Confronto a coppie tra criteri con metodo AHP:

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
|----|---|-----------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|---|-------------------------|
| | Installed electrical capacity, MW | Investment cost, €/kW | Operation and maintenance cost, €/kW | RES equipment prices by manufacturer, €/kW | Levelled cost of electricity, €/kW | Life-cycle CO ₂ emissions, gCO ₂ eq/kWh | Job creation, thousands |
| C1 | Installed electrical capacity, MW | 1 | 6 | 5 | 2 | 3 | 2 |
| C2 | Investment cost, €/kW | 0.17 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| C3 | Operation and maintenance cost, €/kW | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| C4 | RES equipment prices by manufacturer, €/kW | 0.5 | 1 | 0.5 | 1 | 2 | 2 |
| C5 | Levelled cost of electricity, €/kW | 0.33 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 2 |
| C6 | Life-cycle CO ₂ emissions, gCO ₂ eq/kWh | 0.5 | 0.5 | 0.33 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| C7 | Job creation, thousands | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Figura 20. Tabella dei confronti a coppie con metodo AHP

Stima dei pesi dei criteri con metodo AHP:

| | |
|---|------|
| Installed electrical capacity, MW | 27 % |
| Investment cost, €/kW | 12 % |
| Operation and maintenance cost, €/kW | 13 % |
| RES equipment prices by manufacturer, €/kW | 11 % |
| Levelled cost of electricity, €/kW | 8 % |
| Life-cycle CO ₂ emissions, gCO ₂ eq/kWh | 7 % |
| Job creation, thousands | 22 % |

Figura 21. Tabella dei pesi stimati per ciascun criterio con AHP

Dall'applicazione del metodo si evince che i criteri più importanti sono la **capacità elettrica installata** con un peso del 27 % e il successivo è il criterio di **creazione di posti di lavoro** con il 22 % del peso.

L'impatto più basso sulle alternative deriva dai criteri sul costo livellato dell'elettricità (8%) e sulle emissioni di CO₂ del ciclo di vita (7%).

APPLICAZIONE METODO TOPSIS:

Il metodo TOPSIS richiede dati di input minimi e presenta risultati di facile comprensione. Tale metodo si basa sul calcolo della distanza geometrica più breve rispetto risultato ideale.

Nello specifico, il metodo valuta la distanza delle alternative dal punto ideale e anti-ideale e l'alternativa con la distanza più breve dal punto ideale è l'alternativa migliore. Le distanze utilizzate in questo caso studio sono state tre: distanza di Manhattan, distanza di Tchebycheff e distanza euclidea.

Si illustrano i risultati ottenuti con l'applicazione di TOPSIS:

| A1 | A2 | A3 | A4 |
|----------|------|------|----------------|
| Solar PV | WPP | HPP | Bio-energy CHP |
| 0.33 | 0.16 | 0.77 | 0.28 |
| 2 | 4 | 1 | 3 |

Figura 22. Risultati ottenuti con TOPSIS

Sulla base dei risultati del metodo TOPSIS, la migliore alternativa è la **centrale idroelettrica (HPP)**.

APPLICAZIONE METODO PROMETHEE-GAIA:

PROMETHEE sta per Preference Ranking Organization Method for the Enrichment of Evaluations e GAIA sta per Graphical Analysis for Interactive Aid .

Nel metodo PROMETHEE, il peso dei criteri ha un impatto maggiore rispetto ai valori della soglia della funzione di preferenza. È possibile scegliere le funzioni di preferenza e il software può essere utilizzato per organizzare i criteri e i loro pesi. I calcoli vengono effettuati nel programma accademico Visual PROMETHEE.

I risultati del metodo PROMETHEE-GAIA e la classifica completa si basano sul flusso di preferenza netta (Phi) che è un equilibrio tra flusso di preferenza positivo (Phi+) che misura la forza e il flusso di preferenze negative (Phi-) che rappresenta la debolezza.

Si illustrano i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo PROMETHEE:

| | A1 | A2 | A3 | A4 |
|------|----------|---------|--------|----------------|
| | Solar PV | WPP | HPP | Bio-energy CHP |
| Phi | 0.0100 | -0.2567 | 0.2833 | -0.0367 |
| Phi+ | 0.4533 | 0.3200 | 0.5900 | 0.4300 |
| Phi- | 0.4433 | 0.5767 | 0.3067 | 0.4667 |

Figura 23. Risultati ottenuti con PROMETHEE

Secondo questo metodo, la migliore alternativa è la **centrale idroelettrica (HPP)** e il solare fotovoltaico (Solar PV).

In particolare i risultati del metodo PROMETHEE posso essere visualizzati come: PROMETHEE DIAMOND, PROMETHEE NETWORK e PROMETHEE RAINBOW.

PROMETHEE DIAMOND:

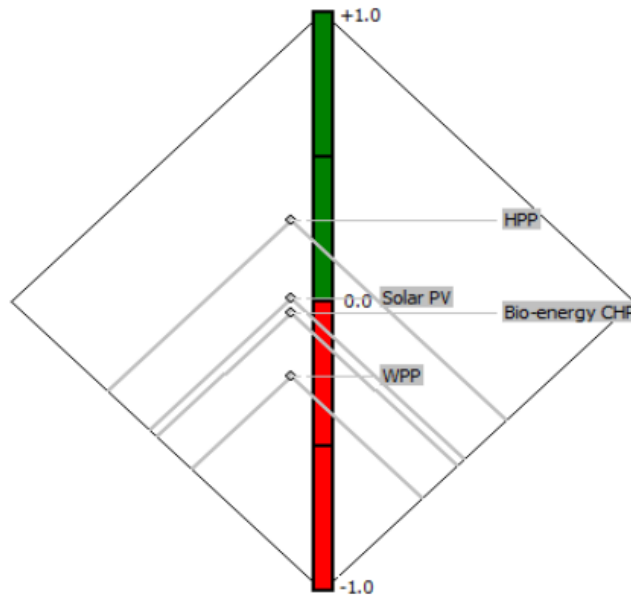


Figura 24. PROMETHEE Diamond

Nel PROMETHEE Diamond, ogni alternativa ha un punto sul piano (Phi+, Phi-) e la dimensione verticale (asse verde-rosso) corrisponde al flusso netto Phi che è un punto di equilibrio .

PROMETHEE NETWORK:

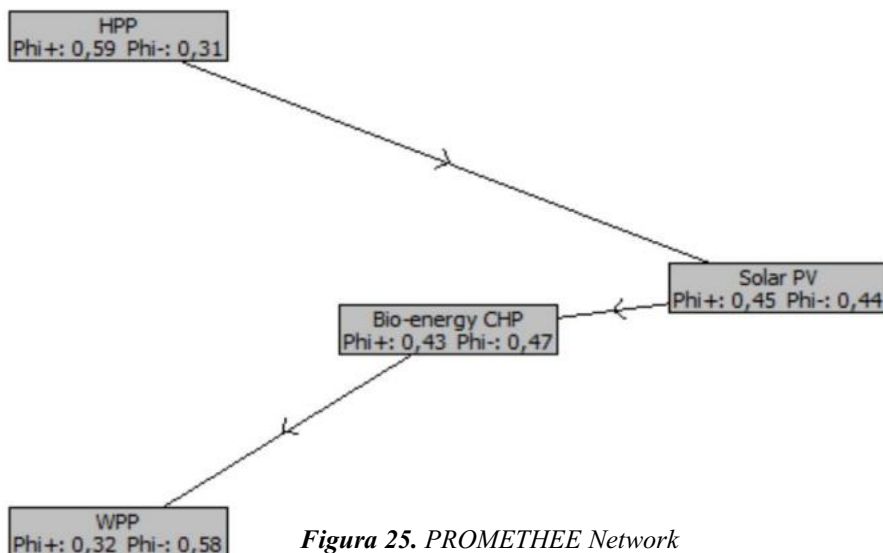


Figura 25. PROMETHEE Network

Nella rete PROMETHEE viene mostrato quale alternativa è migliore e aiuta a confrontare le alternative.

La rappresentazione della rete è come un primo piano della vista Diamante in cui vengono visualizzate le distanze tra le alternative

PROMETHEE RAINBOW:

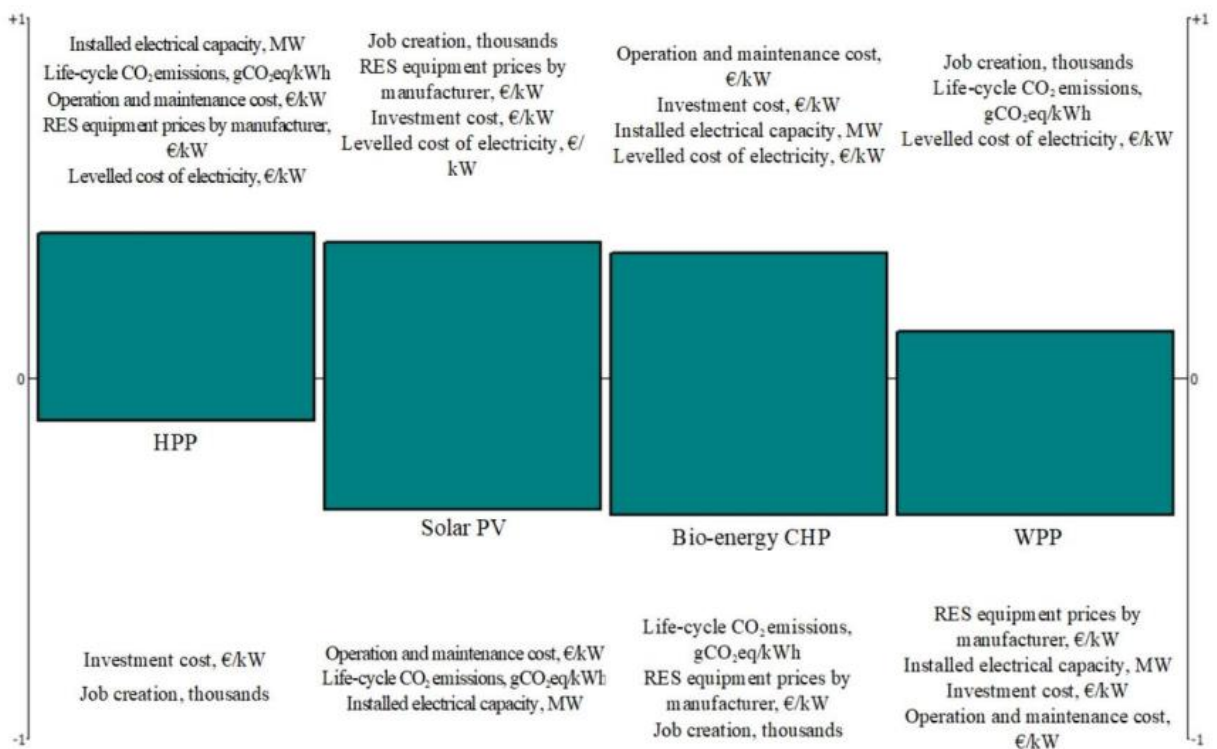


Figura 26. PROMETHEE Rainbow

Nel PROMETHEE Rainbow è rappresentato il criterio forte e debole di ogni alternativa. Le sezioni positive (verso l'alto) rappresentano criteri che influiscono positivamente sull'alternativa e le sezioni negative (verso il basso) rappresentano criteri che danno un effetto negativo all'alternativa.

Concludendo si mostra una classifica generata dai protagonisti di questo caso studio in cui viene mostrato un confronto fra tutti i metodi da essi utilizzati che mette in luce anche i risultati ottenuti dai metodi TOPSIS e PROMETHEE che sono stati esaminati in questo capitolo.

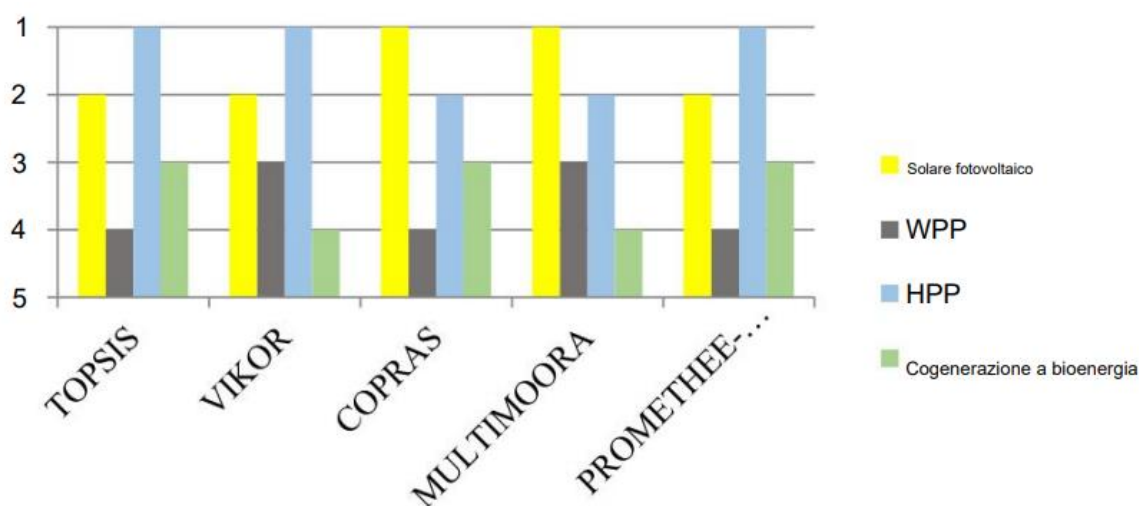


Figura 27. Grafico dei risultati ottenuti con l'applicazione dei metodi

L'alternativa migliore sarebbe la **centrale idroelettrica (HPP)** e poi il solare fotovoltaico (Solar PV) perché queste alternative sono in prima o seconda posizione rispetto alla maggior parte delle altre alternative.

L'applicazione di metodi differenti ha prodotto risultati diversi, ma con una tendenza simile alla migliore alternativa. Effettuare un confronto di questo tipo non è del tutto oggettivo, ovvero non è oggettivo confrontare i risultati ottenuti con metodi diversi perché i risultati sono simili ma non uguali.

Gli stessi risultati non sono stati ottenuti per tutti i metodi, ma in tutti i metodi due alternative erano nei primi due posti come migliori alternative: centrale idroelettrica (HPP) e solare fotovoltaico (Solar PV). Sulla base di sette criteri, la migliore tecnologia di energia rinnovabile per la Lettonia è la centrale idroelettrica (HPP) ed è perché nei criteri più preziosi la capacità elettrica installata (27%) in questa alternativa ha ottenuto i migliori risultati da tutte le alternative energetiche.

(Fonte: [file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria_Decision_Analysis_Methods_Compariso%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria_Decision_Analysis_Methods_Compariso%20(2).pdf))

CAPITOLO 4: ANALISI COMPARATA DEI METODI

Nel seguente capitolo viene effettuato un riepilogo ed una comparazione di tutti i metodi analizzati nel capitolo 3.

Il metodo MAUT (Multi Attribute Utility Theory) prende in considerazione un numero limitato di alternative e viene utilizzato per esplorare le preferenze dei decisori. Inoltre, basa la sua applicazione su un'analisi dei rapporti di preferenza o indifferenza tra le alternative disponibili ed è uno dei metodi più utilizzati per generare un ordine tra le alternative.

Mediante l'utilizzo di tale metodo i valori e i pesi delle alternative sono combinati e attraverso l'utilizzo della funzione di utilità si genera una valutazione complessiva di ogni alternativa.

Il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process) presenta la particolarità di poter semplificare la struttura di un problema decisionale complesso generando una struttura più semplice e facile da analizzare mediante la suddivisione in livelli della suddetta struttura di un problema decisionale: si genera la struttura gerarchica multilivello.

Tale metodo a differenza del MAUT non prevede l'uso di una funzione di utilità ma opera attraverso la costruzione di una matrice dei confronti a coppie, i cui elementi sono i giudizi soggettivi dei decisori trasformati in numeri mediante l'utilizzo della scala dei rapporti di Saaty. Si perviene all'elemento più vantaggioso valutando tra le varie unità di un livello quello che presenta un valore maggiore del peso relativo.

La differenza principale tra l'AHP e l'ANP (Analytic Network Process) risiede nell'approccio strutturale con il quale viene modellato il problema decisionale.

L'AHP presenta una struttura gerarchica di tipo lineare che spesso non riesce a riflettere la complessità dei problemi reali poiché le relazioni di dipendenza tra gli elementi dei diversi livelli decisionali sono unidirezionali lungo la gerarchia e non vi sono alcun tipo di dipendenze. Questa limitazione si trasforma in un vantaggio del metodo ANP, in quanto quest'ultimo favorisce una rappresentazione più dinamica, a "rete" (network), di un problema decisionale e tale rappresentazione è costituita da elementi organizzati in

gruppi secondo rapporti di influenza: relazioni di interdipendenza e retroazioni (o feedback).

L'ANP, similmente all'AHP, utilizza delle matrici di confronto a coppie che vengono effettuati su due livelli: il livello dei clusters (serie omogenee di elementi) e il livello dei nodi ma , a differenza dell'AHP, prevede anche la costruzione di tre supermatrici che consentono di evidenziare feedback e dipendenze.

Il metodo ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant La REaliti ), similmente al MAUT si basa su rapporti di preferenza tra criteri e a tal proposito prevede la costruzione delle matrici rispettivamente di concordanza e di discordanza, effettua quindi un confronto a coppie tra le alternative basato su indici di concordanza e discordanza.

Tuttavia, tale metodo, a differenza degli altri prende in considerazione il concetto di "incompletezza" della decisione, cio  valuta l'ipotesi secondo cui un decisore possa avere una preferenza debole o addirittura possa ritenere le alternative "incomparabili".

A differenza di un metodo compensativo come l'AHP o il TOPSIS che prevedono che un basso risultato di un criterio possa essere compensato dal buon risultato di un altro criterio, il metodo ELECTRE prevede di eliminare direttamente l'alternativa che presenti "non buone" prestazioni rispetto ad un criterio di valutazione.

Inoltre ELECTRE   efficace per valutare un numero proficuo di alternative mentre questo rappresenta un limite del metodo AHP in quanto sarebbe difficoltoso implementare la matrice dei confronti.

Il metodo TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) consiste nel calcolo della distanza geometrica tra ogni alternativa e l'alternativa ideale. Viene definito un punto di ottimo ideale e un punto pessimo. La miglior alternativa sar  quella che si trova pi  vicina al punto di ottimo ideale e pi  lontana dal punto pessimo

Analogamente al metodo TOPSIS , il metodo CODASID (COncordance and Discordance Analyses by Similarity to Ideal Designs) consiste nel misurare la distanza

tra ciascuna alternativa e due design ideali (rispettivamente la migliore e la peggiore scelta effettuabili) all'interno di uno spazio di ricerca delle soluzioni che è stato generato mediante uso di indici specifici che esprimono la dominanza di un'alternativa rispetto all'altra. Si nota un'analogia con gli indici di concordanza e discordanza utilizzati nel metodo ELECTRE.

Il metodo ARAS (Additive Ratio Assessment) consiste nell'utilizzo di una funzione di utilità, similmente ai metodi MAUT, ANP e SMART (valore di utilità), che determina l'efficienza relativa complessa di un'alternativa.

In particolare viene effettuato il calcolo del grado di utilità di un'alternativa che è determinato dal confronto della variante analizzata con quella idealmente migliore.

Il metodo SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) viene applicato assegnando valori di peso a ciascun criterio del problema decisionale con l'obiettivo di mostrare quanto siano importanti determinati criteri relativamente ad altri.

Questo metodo grazie all'informatizzazione permette di colmare alcune carenze di altre tecniche di analisi.

Il metodo FUZZY SET THEORY (FST) a differenza di altri metodi permette di affrontare problemi decisionali relativi a giudizi ambigui e imprecisi.

Il principale vantaggio di tale metodo sta nel poter gestire un'ampia gamma di incertezze nel problema decisionale come la variabilità nel livello di aspirazione del decisore riguardo agli obiettivi, vincoli, l'incertezza nel livello di soddisfazione dei vincoli.

In particolare, la logica Fuzzy è caratterizzata dal concetto di "appartenenza", infatti gli insiemi Fuzzy sono contraddistinti da una funzione di grado di appartenenza che indica un grado soggettivo di soddisfazione all'interno di determinate tolleranze.

Il metodo PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) a differenza di altri metodi consiste nello sviluppo di flussi di surclassamento che favoriscono appunto il surclassamento di un'alternativa rispetto all'altra, ovvero di mostrare una schiacciante superiorità di un'alternativa rispetto all'altra.

Concludendo un'analisi comparata dei metodi AHP, TOPSIS e PROMETHEE è stata analizzata nel caso applicativo trattato nel sotto-paragrafo 3.1.2 .

CAPITOLO 5: CONCLUSIONE

La moderna metodologia di analisi multi-criteria (MCDM), lungi dal fornire "verità rivelate" al decisore, ha come scopo quello di supportare il decision maker nell'attività decisionale tracciandogli una strada che gli consenta di raggiungere le sue determinazioni in maniera sistematicamente coerente rispetto ai suoi obiettivi e ai suoi valori, dandogli modo di manipolare la mole dei dati disponibili, nonostante la loro complessità.

Nello specifico, come descritto nel capitolo 1, l'analisi multi-criteria permette di trovare la soluzione "più soddisfacente" di un problema decisionale e non la "miglior soluzione (o soluzione ottima)". Tale caratteristica è elemento principale di distinzione dell'analisi multi-criteria rispetto all'analisi costi-benefici (ABC), la quale si focalizza, invece, sulla ricerca di un'unica soluzione ottima.

Il vantaggio principale dell'analisi multi-criteria risiede nella possibilità di poter valutare le varie alternative di un problema decisionale rispetto a *molti criteri* considerati simultaneamente.

Questo vantaggio si presenta come svantaggio per l'analisi costi-benefici che, pur avendo come oggetto una formalizzazione del problema piuttosto semplice, si basa sull'ottimizzazione di una funzione obiettivo che equivale ad analizzare il problema attraverso un *solo criterio* di valutazione. Dunque, la semplice formalizzazione di un problema decisionale effettuabile con il metodo di analisi costi-benefici, diventa poco utile, poiché un unico criterio di valutazione non sempre considera tutte le informazioni necessarie per una scelta che si attenga il più possibile a quella che è la realtà.

Lo svantaggio di una tecnica di analisi multi-criteria è, al contempo, rappresentato da quello che abbiamo già descritto come vantaggio della stessa.

Considerare, infatti, un numero troppo elevato di criteri di valutazione differenti è certamente più vantaggioso dal punto di vista della considerazione reale del problema,

ma comporta grandi difficoltà per quanto riguarda la formalizzazione matematica che risulterà più complessa.

Inoltre, un altro punto di debolezza dell'analisi multi-criteria è determinato dal fatto che essa non riesce a fornire una soluzione “oggettiva e univoca”, poiché è praticamente impossibile che una stessa alternativa (o azione) sia considerata la migliore in relazione a tutti i criteri simultaneamente. Al massimo è possibile giungere ad un'alternativa che sia superiore in maniera schiacciante rispetto alle altre, con i metodi di surclassamento. Tuttavia, i metodi di surclassamento non vanno a descrivere la “miglior soluzione” al problema decisionale, ma la soluzione “più giustificata”.

Concludendo, per una comprensione più accurata e profonda dell'argomento, va considerato che l'analisi multi-criteria è una tecnica estremamente giovane, la quale deriva essenzialmente da problematiche reali di varia natura e che si articola in un insieme di metodologie diversificate e non ancora omogeneizzate in una comune base teorica.

La ricerca più recente sta colmando la dicotoma tra empirismo e sistematizzazione teorica nell'ambito di tale tipo di analisi.

Nello specifico, per far luce sul percorso degli studi futuri riguardo le differenti applicazioni di tale disciplina si prende in esame un caso studio sul MMS (Mining Method Selection) effettuato da ricercatori del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università di Zanjan, Dipartimento di ingegneria mineraria e metallurgica, Amirkabir University of Technology, Teheran, e del Dipartimento di Ingegneria Mineraria, Università di Zanjan, Zanjan, in Iran , rispettivamente Farhad Samimi Namin a, Aliakbar Ghadi e Farshad Saki.

L'argomento oggetto di ricerca è stato presentato come “UNA REVISIONE DELLA LETTERATURA DEL MULTI CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM) VERSO LA SELEZIONE DEL METODO DI MINING (MMS)”.

Tale ricerca ha preso luogo per cercare una soluzione al problema, oggi sempre più diffuso, della ricerca di un metodo di mining efficiente.

“L’elevato costo di sviluppo della miniera ha accresciuto l'importanza di scegliere un metodo di estrazione adeguato in fase di progettazione. Dopo aver scelto il metodo, cambiare e sostituire con un altro metodo è molto difficile e talvolta impossibile. Cambiare il metodo può essere così costoso da rendere il progetto antieconomico”, (Farhad Samimi Namin a, Aliakbar Ghadi e Farshad Saki).

L'utilizzo di Multi Criteria Decision Making (MCDM) è stato considerato di recente per selezionare il miglior metodo di mining.

In questa ricerca, è stata presentata una revisione completa della letteratura al fine di scoprire e interpretare l'attuale ricerca sulle applicazioni MCDM nell'MMS.

La scelta del metodo di estrazione fu presa in considerazione nel 1940 e tutti i modelli presentati da quella data fino al 1980 sono stati metodi di punteggio numerico e, a partire dal 2000, sono stati introdotti modelli decisionali nei temi dell'MMS.

Lo scopo di questo studio è stato quello di indagare le applicazioni dei modelli decisionali nella selezione dei metodi di estrazione dei giacimenti minerari.

Si riporta l’immagine rappresentante gli studi condotti sull’applicazione dei modelli decisionali nella selezione dei metodi minerari nei diversi paesi del mondo.

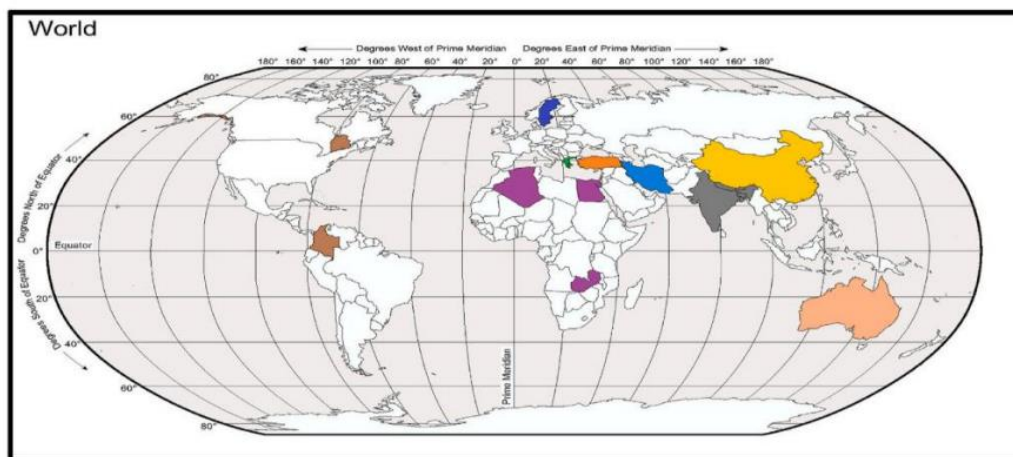


Figura 28. Figura rappresentante gli studi condotti a livello mondiale sull'applicazione dei modelli decisionali nella selezione dei metodi minerari

Il seguente aerogramma evidenzia la percentuale di studi condotti a livello internazionale sull'applicazione di modelli decisionali nella selezione dei metodi minerari.

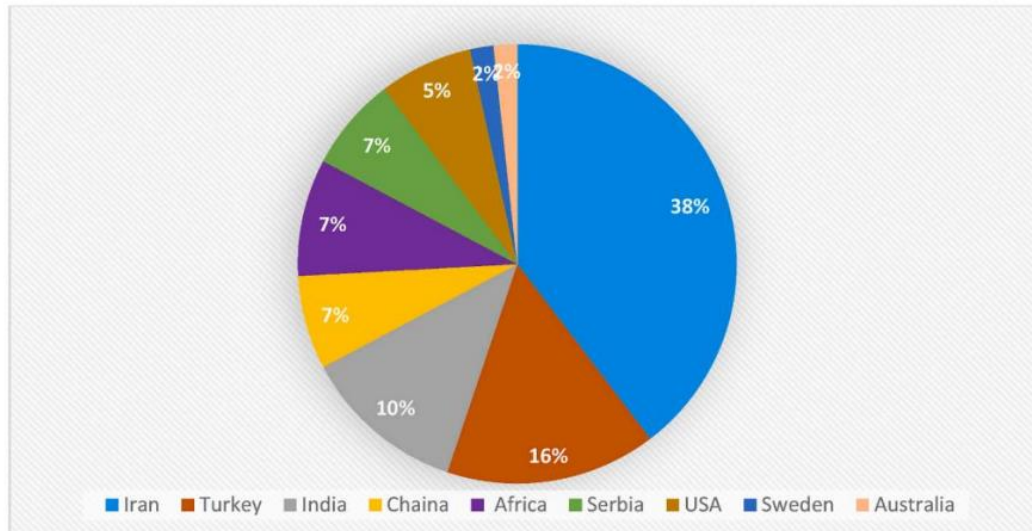


Figura 29. Aerogramma che evidenzia la percentuale di studi condotti a livello mondiale

Questo studio ha permesso di concludere che nell'ambito del MMS i metodi come AHP e TOPSIS sono i più utilizzati per selezionare il metodo di mining.

In particolare, il metodo AHP e Fuzzy AHP al primo posto con il 34%, TOPSIS e Fuzzy TOPSIS con il 16% al secondo e PROMETHEE con il 10% al secondo posto.

Il caso studio sopra citato permette di osservare la popolarità di utilizzo di MCDM nell'ambito dell'MMS.

Infine, si può affermare che le applicazioni dei metodi MCDM sono innumerevoli e popolari a livello mondiale (si guardino gli esempi dei casi applicativi al capitolo 3), in quanto è consuetudine trovarsi di fronte a delle scelte e dover prendere delle decisioni, più o meno importanti.

SITOGRAFIA

- [1] <http://www.storiaeconservazione.unirc.it/Docenti/Marino/dispensmult1.htm>
- [2] [file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria Decision Analysis Methods Compariso%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria Decision Analysis Methods Compariso%20(2).pdf)
- [3] <http://docenti.ing.unipi.it/l.santini/edilearchitettura/AA2018-2019/LEZIO%206%20AMC.pdf>
- [4] <https://dizionari.simone.it/6/analisi-multicriterio>
- [5] https://moodle2.units.it/pluginfile.php/269271/mod_resource/content/1/MultiCriteriaDecisionMaking.pdf
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420722001246>
- [7] <http://careonline.it/wp-content/uploads/2012/02/processo-decisionale.pdf>
- [8] <https://didattica-2000.archived.uniroma2.it/PSSPS/deposito/Analisi Multicriteria lezione 9 ottobre 2014.pdf>
- [9] <https://www.soldionline.it/guide/psicologia-finanza/la-teoria-dell-utilita-attesa#:~:text=Questa%20teoria%20definisce%20%E2%80%9Cutilit%C3%A0%E2%80%9D%20come,liquidit%C3%A0%20che%20ha%20a%20disposizione>
- [10] <https://www.lavoro-confronto.it/archivio/numero-6/teorie-del-benessere-sociale-e-welfare-state#:~:text=Tale%20teoria%20%C3%A8%20alla%20base,omette%20di%20regolarne%20la%20vita.>
- [11] <https://omartomainoblog.weebly.com/blog/legge-di-weber-fechner-come-misurare-le-sensazioni>
- [12] <https://www.assioa.it/wp-content/uploads/2003-06.pdf>

- [13] https://www.hsor.org/what_is_or.cfm?name=mutli-attribute_utility_theory
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=gdPgAXcAiWA>
- [15] <https://mircospagnolo.it/il-metodo-analytic-hierarchy-process-nelle-decisioni-del-project-management/>
- [16] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fuzzy-set-theory#:~:text=Fuzzy%20set%20theory%20is%20a,et%20al.%2C%202015a>
- [17] https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1465_2019_476_35425.pdf
- [18] https://it.wikipedia.org/wiki/Insieme_sfocato
- [19] <https://core.ac.uk/download/pdf/228537435.pdf>
- [20] https://www.researchgate.net/publication/247904783_A_new_additive_ratio_assessment_ARAS_method_in_multicriteria_decision-making
- [21] <https://www.scielo.br/j/pope/a/dXD3X4FCySFRvvNcv6XRS3K/abstract/?lang=en#>
- [22] https://www.researchgate.net/profile/Robbi-Rahim/publication/311986644_Study_of_the_Simple_Multi-Attribute_Rating_Technique_For_Decision_Support/links/5867986508ae8fce49156e71/Study-of-the-Simple-Multi-Attribute-Rating-Technique-For-Decision-Support.pdf
- [23] <http://dspace.unive.it/bitstream/handle/10579/7149/833539-1188398.pdf?sequence=2>
- [24] <https://webthesis.biblio.polito.it/10554/1/tesi.pdf>
- [25] <https://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>
- [26] <http://www.dia.uniroma3.it/~pacciare/CORSI/MSDM/Lucidi4.pdf>
- [27] http://docenti.ing.unipi.it/marino.lupi/analisi_multicriteria_2019-20.pdf
- [28] [http://www.ijesi.org/papers/Vol%202\(11\)/Version-1/F021101028034.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol%202(11)/Version-1/F021101028034.pdf)

[29] https://www.regione.fvg.it/tav/036_L34600R22RGSA000G001A.pdf

[30] <https://www.portialtotirreno.it/wp-content/uploads/2018/03/RACCORDO-MULTICRITERIA-ANALYSIS.pdf>

[31] [file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria_Decision_Analysis_Methods_Compariso%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/giorg/Downloads/Multi-Criteria_Decision_Analysis_Methods_Compariso%20(2).pdf)

[32] <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/31728/attachments/6203>

[33] https://www.ingegneriagestionale.unipi.it/images/Sintesi/2019-11-27/sintesi_elisa_morini_538039.pdf

[34] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420722001246>