

Università degli studi di Padova

Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali

**TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA**
(Laurea triennale DM270/04 – indirizzo mecatronico)

**METODI PER LO STUDIO DI LAY-OUT
AZIENDALI NELLA PRODUZIONE PER
REPARTI**

Relatore: Prof. Alessandro Persona

Laureando: Massimo Cauduro

Anno Accademico 2011-2012

SOMMARIO

Il presente elaborato ha come obiettivo l'analisi dei principi di base utilizzati nei moderni software per la risoluzione di problemi inerenti ai lay-out aziendali.

Nel seguito non verranno fornite nozioni in merito ai software che implementano tali soluzioni.

Dopo una generica panoramica sui modelli utilizzati per rappresentare il facility layout problem, l'attenzione verrà spostata sulle basi logico-matematiche che costituiscono i moderni algoritmi di risoluzione.

Per i vari metodi analizzati verranno, ove possibile, spiegati i principali vantaggi e svantaggi.

Infine, verranno presentati due lavori, svolti nel 2010 e nel 2011. I quali fungeranno da esempi esplicativi di come si possano risolvere, tramite alcune tecniche precedentemente illustrate all'interno dell'elaborato, problemi di lay-out aziendali.

INDICE

Sommario.....	3
Introduzione.....	7
Capitolo 1: Facility Layout Problem.....	9
1.1: Definizione di importanza per i vari aspetti produttivi.....	9
1.2: Scelta del modello produttivo di riferimento.....	10
Capitolo 2: Modelli per FLP e metodi di risoluzione.....	11
2.1: Modelli di studio.....	11
2.1.1: <i>Modelli discreti, Quadratic Assignment Problem (QAP)</i>	11
2.1.2: <i>Modelli continui, Mixed Integer Programming Model</i>	12
2.1.3: <i>Metodo grafico</i>	15
2.2: Algoritmi evoluti di risoluzione.....	16
2.2.1: <i>Expert Systems (ES)</i>	16
2.2.2: <i>Fuzzy Systems</i>	17
2.2.3: <i>Reti neurali</i>	17
2.2.4: <i>Algoritmi genetici</i>	18
2.2.5: <i>Sistemi ibridi</i>	20
Capitolo 3: Caso reale di FLP risolto con metodo stocastico.....	21
Capitolo 4: Caso reale di FLPS risolto con PROMETHÉE II.....	25
Conclusioni.....	29
Appendice A: L'approccio MCDM.....	31
Appendice B: PROMETHEE II e FLPS.....	33
References.....	35

INTRODUZIONE

Il corretto posizionamento degli organi produttivi all'interno di un impianto industriale è un problema che, prima o poi, tutte le aziende devono affrontare.

Per un'industria il lay-out dello stabilimento corrisponde alla colonna vertebrale dell'intera opera imprenditoriale ed è quindi fondamentale che la scelta ricada su quello più adatto tra i molti possibili.

La corretta selezione del lay-out produttivo porta l'azienda ad un miglioramento della sua performance grazie alla riduzione di varie voci di costo.

Tramite l'implementazione del lay-out più corretto l'azienda può ridurre lo spazio necessario ai vari reparti, riducendo così i costi di mantenimento dello stabilimento.

Mediante il corretto posizionamento dei macchinari è possibile disporre in maniera ottimale i punti di carico e scarico delle varie stazioni produttive, così da migliorare i flussi aziendali e ridurre di conseguenza i costi di trasporto interni allo stabilimento.

Migliorando la disposizione dei vari soggetti coinvolti nella catena di produzione è possibile massimizzare lo scambio di informazioni tra le varie postazioni aziendali. Aumentando in questo modo, la comunicazione tra i vari reparti.

Questi, e molti altri, sono i benefici che un'azienda può ricavare dall'ottimizzazione del proprio lay-out produttivo.

Ecco perché, specialmente nell'era moderna in cui il grado di concorrenza è elevato, ogni azienda dovrebbe costantemente monitorare l'adeguatezza della propria disposizione produttiva.

La corretta selezione del lay-out aziendale all'interno del set contenente quelli possibili è un problema decisionale complesso.

I fattori che influenzano la scelta del progettista sono molteplici e spesso in contrasto tra loro. Motivo per cui, negli anni, si sono evoluti una quantità di strumenti atti ad aiutare i designer aziendali nelle loro scelte.

CAPITOLO 1

Facility Layout Problem

Con Facility si intende qualunque struttura, oggetto, macchinario o persona, coinvolta nel processo di produzione.

Con il termine Facility Lay-out Problem (da ora in poi indicato all'interno dell'elaborato con l'acronimo FLP) si identifica l'insieme di problematiche connesse alla definizione della migliore disposizione delle facilities all'interno di un dato ambiente produttivo. Lo scopo è la massimizzazione dell'efficienza delle potenzialità aziendali, in relazione al processo produttivo di un determinato bene, o insieme di merci.

La risoluzione degli FLP è un tipico esempio di problema decisionale multi criterio (MCDM, vedere appendice A) in quanto i vari aspetti da massimizzare, o minimizzare, portano spesso ad ottenere soluzioni in contrasto tra loro.

Proprio in virtù di tale approccio multi criterio, negli ultimi anni gli algoritmi di risoluzione si sono evoluti nella ricerca del miglior compromesso tra tutti i vincoli da soddisfare.

1.1. Definizione di importanza per i vari aspetti produttivi

Nello studio di Lay-out risulta fondamentale definire che grado di importanza dare ai vari aspetti produttivi che caratterizzano l'efficienza del processo produttivo industriale.

Alcuni esempi di criteri da considerare nel progetto di un Lay-Out sono:

- Costi di trasporto semilavorati tra i vari stadi produttivi
- Vicinanza tra le stazioni di produzione (intesa come distanza minima da garantire per il corretto funzionamento dell'impianto)
- Fattori di forma dei vari macchinari, stazioni di produzione (lo spazio a disposizione del progettista non è infinito, bensì deve rispettare le specifiche dell'ambiente di riferimento)
- Flessibilità dell'impianto (produzione di diversi beni in contemporanea e modifiche del lay-out in funzione dei prodotti richiesti)
- Predisposizione alla manutenzione
- Flusso di informazioni tra le varie stazioni

Tramite l'approccio multi criterio tutti questi aspetti vengono valutati con un differente grado di importanza, al fine di garantire la progettazione del miglior Lay-out possibile.

Tipicamente negli stabilimenti in cui la produzione è “per reparti” il principale problema da risolvere è la riduzione dei costi di trasporto all'interno dell'ambiente produttivo. Tuttavia, nelle imprese ad elevata efficienza, gli altri aspetti non vengono sottovalutati. Spesso infatti, la risoluzione di un singolo aspetto produttivo, e quindi la scelta del lay-out più adeguato a tale richiesta, porta ad un peggioramento dell'intero rendimento aziendale tramite performance eccessivamente negative degli aspetti più trascurati.

1.2.Scelta del modello produttivo di riferimento

Prima di poter procedere con lo studio del lay-out più appropriato, è necessario definire l'ambiente di lavoro in cui avverrà l'installazione e, qualora fosse possibile, il tipo di produzione a cui fare riferimento.

Per l'ambiente ci si riferisce a disposizioni su piano singolo oppure multi piano.

Per quanto riguarda la scelta del modello produttivo tipicamente viene fatta in base ai volumi di produzione. Per grandi quantità di prodotto la scelta ricade sempre sul modello “*in serie*” mentre per lotti di piccole o medie dimensioni, la scelta a cui si tende è quella “*per reparti*”.

CAPITOLO 2

Modelli per FLP e metodi di risoluzione

2.1. Modelli di studio

I modelli tramite i quali studiare problemi FLP sono molteplici e di varia difficoltà matematica.

Nel seguito verranno analizzati tre esempi dei modelli più comuni.

Il primo sarà un modello di tipo discreto, così definito perché la posizione di ogni facility viene considerata univoca per ogni soluzione ottenuta.

In secondo luogo verrà analizzato un modello appartenente alla categoria di quelli continui.

Con questo tipo di approccio ogni facility è posizionata ovunque all'interno dell'impianto tramite la caratterizzazione delle sue coordinate (x,y) rispetto ad un punto di riferimento all'interno dell'area produttiva.

La principale miglioria introdotta dai modelli continui fu la possibilità di garantire in maniera precisa la posizione di ogni stazione all'interno dell'impianto e non solo, come invece avveniva con i modelli discreti, che le dimensioni dell'area industriale fossero sufficienti al contenimento di tutti gli organi produttivi.

La possibilità di considerare in un'unica simulazione il posizionamento di tutti i soggetti coinvolti, permette inoltre di inserire all'interno delle singole elaborazioni numeriche diverse condizioni al contorno.

In ultima analisi verrà presentato il modello grafico, un particolare metodo in cui il lay-out si ricava tramite disposizione visiva dei macchinari all'interno dell'area produttiva.

2.1.1. Modelli discreti, Quadratic Assignment Problem (QAP)

Si consideri di dover allocare un numero N di facilities, tra le quali è noto il flusso reciproco, nelle N aree disponibili all'interno dello spazio produttivo.

Volendo, per esempio, minimizzare il costo totale di trasporto del materiale all'interno dell'impianto la formula da utilizzare sarà (2.1).

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{(ik)} d_{(jl)} X_{ij} X_{kl} \quad (2.1)$$

I vari termini rappresentano:

- $f_{(ik)}$ costo del flusso di materiale da i a k
- $d_{(jl)}$ distanza tra le posizioni j e l
- $X_{ij} X_{kl}$ variabili binarie (1,0) che identificano il posizionamento delle stazioni

Per una corretta risoluzione del modello bisogna inoltre imporre le seguenti condizioni al contorno:

$$\bullet \sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \quad \text{con } j=1, \dots, N \quad (2.2)$$

(2.2) garantisce che ogni spazio i-esimo sia occupato da una sola facility

$$\bullet \sum_{j=1}^N X_{ij} = 1 \quad \text{con } i=1, \dots, N \quad (2.3)$$

(2.3) garantisce il posizionamento di ogni facility in uno spazio univoco.

$$\bullet \sum_{k=1}^N X_{kl} = 1 \quad \text{con } l=1, \dots, N \quad (2.4)$$

(2.4) garantisce che ogni spazio k-esimo sia occupato da una sola facility

$$\bullet \sum_{l=1}^N X_{kl} = 1 \quad \text{con } k=1, \dots, N \quad (2.5)$$

(2.5) garantisce il posizionamento di ogni facility in uno spazio univoco.

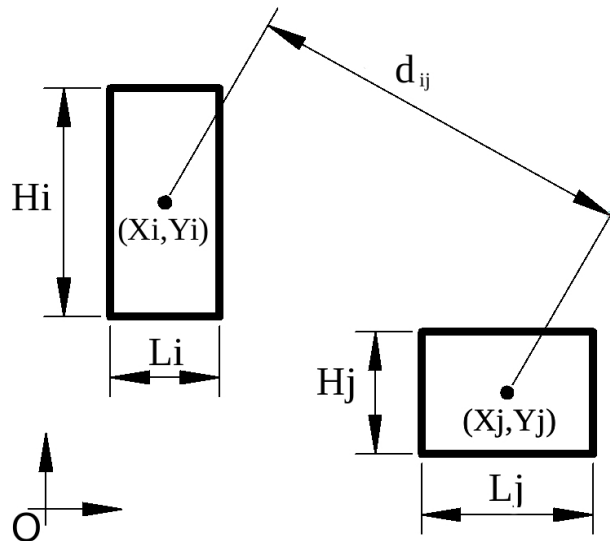
La soluzione che si trova con questo tipo di approccio presenta però alcuni limiti non certo trascurabili. Per esempio non viene chiarita con precisione la posizione dei vari macchinari all'interno dello spazio produttivo (viene infatti semplicemente garantito lo spazio necessario a contenere tutti i macchinari). Inoltre non viene specificato in alcun modo l'orientamento da dare ai vari macchinari, così che i punti di carico/scarico delle varie stazioni possono trovarsi allineati in maniera errata.

2.1.2. Modelli continui, Mixed Integer Programming Model

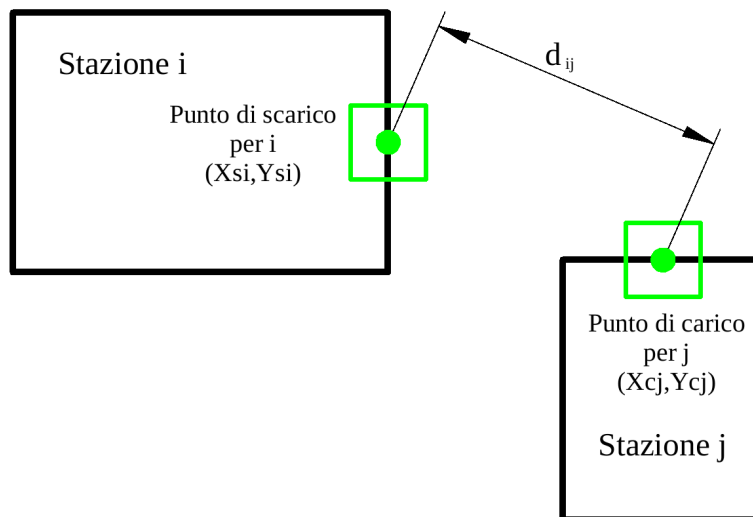
In questo modello la posizione dei vari mezzi produttivi all'interno dell'area di cui si vuole studiare il lay-out è caratterizzata dal calcolo delle coordinate cartesiane riferite a punti specifici delle stazioni posizionate. Punti di interesse sono tipicamente le coordinate del centro geometrico (X,Y) oppure le coordinate di angoli specifici come alto-sinistra o basso-destra.

La distanza tra due facilities viene caratterizzata, per esempio, tramite la distanza euclidea tra i due centri geometrici (2.6).

$$d_{ij}((X_i, Y_i), (X_j, Y_j)) = |(X_i - X_j)| + |(Y_i - Y_j)| \quad (2.6)$$



Il posizionamento dei punti di carico e scarico viene definito, ove richiesto, tramite delle opportune costanti.



La distanza che un semilavorato deve percorrere tra una stazione, i, e l'altra, j, può essere definita come in (2.7)

$$d_{ij} = |(X_{si} - X_{cj})| + |(Y_{si} - Y_{cj})| \quad (2.7)$$

Dove, (X_{si}, Y_{si}) sono le coordinate del punto di scarico della stazione i e (X_{cj}, Y_{cj}) sono le coordinate del punto di carico della stazione j .

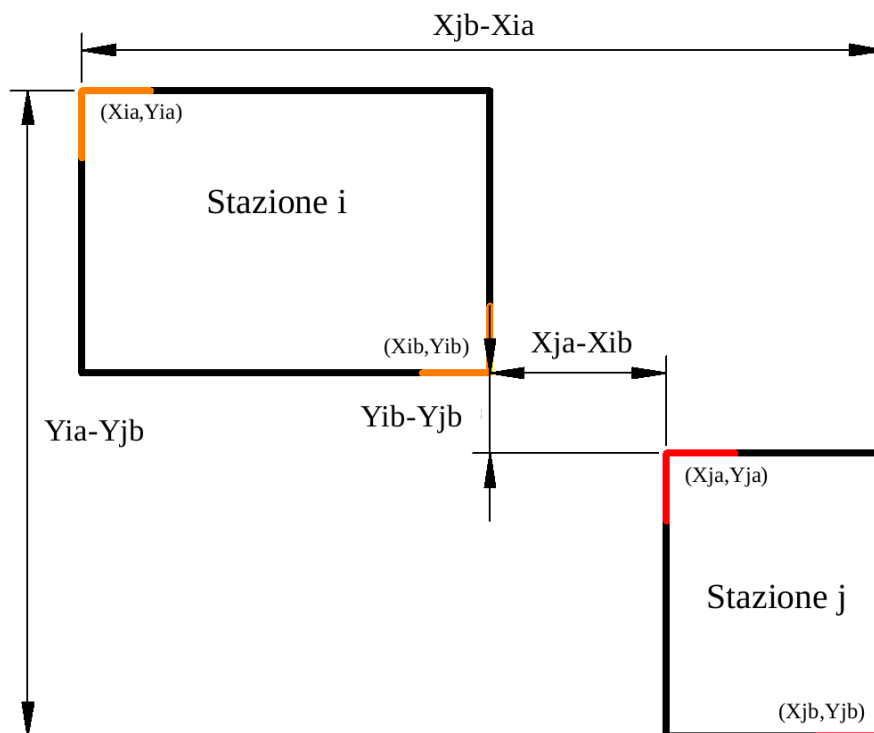
Un altro importante limite che è possibile imporre è quello sullo spazio totale a disposizione, che deve ovviamente essere maggiore, o uguale, alla somma di tutte le aree delle varie stazioni. A questo proposito, nella definizione delle misure di altezza (H) e larghezza (L) delle varie facilities, può essere compreso, a discrezione del progettista, anche il necessario spazio di lavoro “vuoto” attorno a tali strutture.

Un'altra proprietà che è possibile definire in sede di simulazione con questo modello è il vincolo di non sovrapposizione delle strutture.

A questo scopo si definiscono due condizioni geometriche:

- $(X_{jb} - X_{ia}) * (X_{ja} - X_{ib}) \geq 0$ (2.8)

- $(Y_{ia} - Y_{jb}) * (Y_{ib} - Y_{jb}) \geq 0$ (2.9)



Con questo metodo è quindi possibile definire in maniera più precisa, rispetto al precedente, i vincoli da soddisfare nella disposizione dei macchinari.

Il risultato della simulazione, contrariamente al metodo precedente, preciserà l'effettiva posizione di ogni facilities. Semplificando il lavoro del progettista della definizione del lay-out.

Determinate dunque tutte le costanti di interesse per il lay-out da definire, una possibile formulazione del problema di ottimizzazione del trasporto interno tra N stazioni è la seguente:

$$\min C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{(ij)} (|(X_{si} - X_{cj})| + |(Y_{si} - Y_{cj})|) \quad (2.10)$$

Dove:

- $f_{(ij)}$ costo del flusso di materiale da i a j
- distanza che un semilavorato deve percorrere tra i e j

2.1.3. Il metodo grafico

In questo modello si devono conoscere a priori, e per intero, i vincoli che legano tutte le diverse facilities.

La soluzione si ottiene soddisfacendo tutti i vincoli, partendo da quello più importante.

Si consideri per esempio un lay-out composto da tre stazioni produttive i, j, k.

Per ipotesi pongo il vincolo che, a causa dei loro ingombri e dello spazio a disposizione, le tre facilities possano essere posizionate solo in serie.

Siano inoltre noti i gradi di importanza della vicinanza ($0 < \text{GDV} < 1$) tra le stazioni, Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Specifica sui gradi di vicinanza tra le stazioni

Grado di vicinanza richiesto (GDV)	i	j	k
i	0	0,9	0,5
j	0,9	0	0,7
k	0,5	0,7	0

A questo punto applicando il metodo grafico, disporremo prima la stazione i, poi la stazione j (poiché il $\text{GDV}_{ij}=0,9$) e poi la stazione k (infatti $\text{GDV}_{jk}=0,7 < \text{GDV}_{ik}=0,5$)

Questo metodo risulta essere molto limitante nella pratica e viene utilizzato, almeno nella sua forma più semplice, solo per lay-out in cui il vincolo da soddisfare sia unico e ben conosciuto.

Esistono delle forme evolute di questo modello che sfruttano logiche avanzate al fine di risolvere più vincoli contemporaneamente.

Un esempio evoluto è quello sviluppato da Rosenblatt [1] in cui un modello grafico lavora in concomitanza con un algoritmo di tipo euristico, al fine di raggiungere la migliore soluzione che permetta di ridurre i costi di trasporto e massimizzare la vicinanza tra tutte le facilities.

2.2.Algoritmi evoluti di risoluzione

L'elevata complessità insita nei problemi di definizione per un lay-out aziendale, ha fatto sì che negli anni le tecniche di risoluzione per FLP si evolvessero in maniera massiccia e piuttosto diversificata.

L'approccio al problema è passato dalla risoluzione del singolo vincolo produttivo che creava più limitazioni alla performance dell'impianto fino ad un approccio di mediazione tra tutte le problematiche riscontrate negli ambienti produttivi.

Scoperte come il funzionamento dei neuroni umani o la teoria evuzionistica basata sui geni, unite alla crescita della potenza di calcolo dei moderni computer, hanno portato ad approcci innovativi per la risoluzione di tali problemi.

2.2.1.Expert Systems

Questi algoritmi funzionano sfruttando i principi dell'intelligenza artificiale.

La risoluzione del problema viene elaborata tramite le conoscenze pregresse dal programma e non da uno schematismo di tipo computazionale. Un sistema con esperienza viene spesso definito come uno speciale programma per computer in grado di emulare il processo decisionale umano in un campo di conoscenze specifico e limitato. Algoritmi di questo genere permettono di combinare alcune capacità di pensiero umane con la potenza di calcolo dei moderni computer.

I principali vantaggi ricavati dall'utilizzo di tali software risiedono nella possibilità di risolvere problemi per i quali non esistono precise strutture matematiche.

Esempio:

H97 sviluppato da Harraz (1997) [2].

Questo sistema sfrutta due sottoprogrammi.

Il primo, contiene una serie di regole di base per la costruzione di un lay-out produttivo. L'insieme di queste regole può essere personalizzato dall'utente utilizzatore al fine di migliorare la qualità del risultato.

Il secondo, è un algoritmo di ottimizzazione che valuta, tra le diverse soluzioni, quale sia al migliore in funzione della propria esperienza.

Questo secondo programma è basato su un'implementazione del simulated annealing global optimization algorithm, un particolare insieme di algoritmi che sfruttano nelle loro logiche di funzionamento approcci statistici e probabilistici.

2.2.2.Fuzzy Systems

Questi algoritmi vengono impiegati per la risoluzione di problemi in cui i set di parametri a disposizione sono noti con un certo margine di variabilità, ecco perché si definiscono come sistemi “sfocati” (fuzzy).

Questo tipo di approccio è molto utile in ambito industriale. Infatti, difficilmente i rapporti che legano le varie facilities sono noti con precisione.

La domanda di mercato relativa ad un preciso prodotto, lo spazio di lavoro attorno ad una stazione, il costo di trasporto dei semilavorati all'interno dell'impianto, la necessità di scambio di informazioni tra le diverse facilities, sono tutti dati che vengono stimati ma che, con il tempo o per errori nella fase di studio, nella realtà pratica sono soggetti a variazioni.

In questi sistemi i set di parametri non vengono valutati con il meccanismo di “tutto o niente” bensì, tramite una funzione di mappatura fuzzy, i singoli componenti del set vengono pesati con un indice variabile tra 0 e 1. Se ad un parametro viene dato valore 0, allora quel parametro in quella simulazione non viene considerato. Viceversa, se ad un parametro viene assegnato il valore 1, allora quest'ultimo sarà pienamente rappresentato all'interno della soluzione finale.

L'insieme di tutte le soluzioni produce una curva di risultati che dovranno poi essere analizzati con un approccio multi criterio al fine di selezionare la soluzione più adatta per il lay-out cercato.

Esempio:

WW99 sviluppato da Whyte and Wilhelm (1999) [3].

Questo algoritmo sfrutta delle curve di riempimento per lo spazio a disposizione al fine di determinare il posizionamento dei macchinari all'interno dello spazio disponibile. Poi, tramite un meccanismo fuzzy, viene simulato l'ingresso dei macchinari all'interno dello stabilimento.

2.2.3.Reti neurali

Le reti neurali artificiali (ANN o Artificial neural network) sono delle strutture computazionali direttamente ispirate dai processi biologici che avvengono tra i neuroni.

Queste strutture sono composte da un certo numero di unità interconnesse tra loro. Ogni unità presenta un ingresso ed un'uscita caratteristica che gli permette di implementare una propria logica di funzionamento variabile anche in funzione delle connessioni presenti con le altre unità.

I principali vantaggi di tali tecniche risiedono nella possibilità di gestire informazioni distribuite tra più nodi. Le varie unità presentano capacità di apprendimento, attitudine alla gestione di dati incompleti o imprecisi. Inoltre hanno la capacità di simulare il modo di pensare umano.

Vi sono però anche molti svantaggi, per esempio non presentano regole precise di risoluzione dei problemi. I risultati delle simulazioni vengono dati a scatola chiusa, non è possibile risalire ai criteri logici che le hanno generate e risulta quindi difficile predire l'evoluzione futura dei modelli calcolati.

Esempio:

TBT96 sviluppato da Tsuchiya (1996) [4].

Questo algoritmo sfrutta due reti neurali bidimensionali che, lavorando in parallelo, utilizzano un numero $N \times N$ di “neuroni” al fine di risolvere un lay-out contenente N facilities.

2.2.4. Algoritmi genetici

Gli algoritmi genetici sono algoritmi di ricerca basati sul principio della selezione naturale.

Il principio di funzionamento è quello di imitare il meccanismo di sviluppo nuove popolazioni e, tramite la selezione naturale, identificare le popolazioni più adatte alla sopravvivenza, cioè di trovare quelle soluzioni che soddisfano al meglio il problema in esame.

Diversamente dalla maggior parte degli algoritmi di ricerca euristica, quelli genetici conducono la ricerca attraverso le informazioni di una popolazione costituita da un sottoinsieme di individui, cioè precedenti soluzioni.

Ad ogni soluzione è associato un valore di fitness che corrisponde al grado di efficienza della soluzione rispetto a quello obiettivo.

Le soluzioni ai problemi di ottimizzazione possono essere spesso codificate in stringhe di lunghezza finita. Gli algoritmi genetici lavorano su queste stringhe codificandole attraverso particolari sotto-strutture dette cromosomi.

Ogni cromosoma è costituito da varie sub unità chiamate geni.

Tra i vari fattori che influenzano l'evoluzione genetica delle soluzioni alcuni tra i più importanti sono:

- la rappresentazione della soluzione in stringhe
- la popolazione iniziale considerata
- la selezione degli individui in una popolazione vecchia alla quale verrà permesso di influenzare gli individui di una nuova popolazione
- l'operatore genetico che viene utilizzato per ricombinare il patrimonio genetico dei genitori allo scopo di produrre i figli.

In particolare la selezione degli individui che influenzeranno poi la generazione successiva, si basa sulla “forma fisica” (fitness) degli individui.

Una generica procedura per gli algoritmi genetici può essere la seguente:

1. $t = 0$, inizializzare $P(t)$,
2. Valutare l'idoneità dei soggetti $P(t)$ alla soluzione del problema
3. Se la popolazione considerata $P(t)$ soddisfa le richieste, allora si è ottenuta la soluzione cercata. Saltare al punto 8.
4. La popolazione $P(t)$ non corrisponde ad una soluzione ottimale
5. Partendo da $P(t)$ evolvere la soluzione a $P(t+1)$
6. $P(t+1)=P(t)$
7. Ripartire dal punto 2.
8. Restituire all'utente la popolazione più idonea al problema rappresentata da $P(t)$

Gli algoritmi genetici differiscono dalle ottimizzazioni tradizionali per procedure di ricerca in quattro modi diversi:

- Sfruttano di generazione in generazione dei set di parametri codificati e non sempre gli stessi parametri
- La ricerca viene avviata su numerosi individui di una popolazione e non da uno unico
- Utilizzano informazioni relative alle precedenti popolazioni e non derivate da set di parametri estranei al caso in esame
- L'evoluzione avviene grazie a regole di transizione probabilistiche, non deterministiche

Algoritmi di questo tipo presentano il limite di dover partire da una soluzione già definita.

Tipicamente il germe della simulazione, la generazione 0, viene generata con metodi di base (QAP) o comunque poco sofisticati.

Esempio:

CGT96 sviluppato da Cheng (1996) [5].

Questo algoritmo è stato sviluppato per risolvere problemi di lay-out flessibili nelle configurazioni di produzione ad anello. La soluzione viene ottenuta tramite l'utilizzo di un algoritmo genetico per la selezione dei risultati e di un algoritmo di ricerca locale per il vicinato tra le stazioni, il quale si occupa, tramite metodo euristico, della mutazione tra una generazione e la successiva.

2.2.5.Sistemi ibridi

L'evoluzione di svariate tecniche basate sull'intelligenza artificiale e la potenza di calcolo dei moderni computer hanno portato alla nascita di algoritmi risolutivi per FLP di tipo ibrido.

Lo scopo di questi sistemi è quello di unire i punti di forza dei vari metodi al fine di sopperire alle lacune presenti nei singoli algoritmi.

CAPITOLO 3

Caso reale di FLP risolto con metodo stocastico

Un ulteriore metodo che si vuole prendere in analisi all'interno di questo elaborato è il metodo stocastico.

Questo metodo sfrutta le basi matematiche del *Mixed Integer Programming Model* unitamente ad un approccio di tipo stocastico per la determinazione della domanda dei beni da produrre, al fine di determinare le modifiche da apportare al lay-out obiettivo in funzione della quantità di prodotti richiesta dal mercato.

Per l'esposizione di tale metodo verrà utilizzato un lavoro [7] svolto da Sh. Ariafar, N. Ismail, S. H. Tang, M. K. A. M. Ariffin, Z. Firoozi nel 2011.

L'esempio in esame tratta della risoluzione di un FLP per un impianto caratterizzato da produzione con celle.

Come ipotesi iniziali si considerino: una domanda uniforme secondo una determinata distribuzione stocastica, struttura delle celle produttive (insieme di macchinari che le compongono) già definita e una configurazione di lay-out a forma di U.

L'obiettivo dell'FLP è la minimizzazione del costo di trasporto del materiale, sia all'interno dell'impianto, sia all'interno delle celle.

Nel seguito verrà utilizzata la seguente simbologia:

Indici:

- P: indice di prodotto
- R: indice di processo
- i, k: indici di posizionamento all'interno dell'impianto
- j, l: indici per i macchinari
- m, n: indici per le celle produttive

Parametri:

- n_m : numero di macchine e posizioni disponibili nel sistema
- n_c : numero di celle produttive presenti nell'impianto

- R_p : numero di lavorazioni subite dal prodotto P
- U_p : limite superiore per la domanda di mercato del prodotto P nell'arco temporale considerato
- L_p : limite inferiore per la domanda di mercato del prodotto P nell'arco temporale considerato
- D_p : domanda di mercato del prodotto P nell'arco temporale considerato
- β : probabilità cumulativa per la domanda nell'arco temporale considerato
- C_{jl} : costo unitario di trasporto tra le stazioni j e l
- $f_{(jl)}$: flusso tra le stazioni j e l
- $d_{(ik)}$: distanza tra le stazioni i e k
- $NMC_{(C_m)}$: numero di macchine presenti nella stazione C_m

Variabili:

- F_{PRj} : variabile binaria che assume valore 1 se P viene prodotto in R lavorazioni presso la stazione j. Altrimenti vale 0
- X_{ij} : variabile binaria che assume valore 1 se il macchinario i è assegnato alla posizione j. Altrimenti vale 0
- Y_{im} : variabile binaria che assume valore 1 se il macchinario i appartiene alla cella m. Altrimenti vale 0

Modello matematico utilizzato

La domanda complessiva per ogni prodotto P che si prevede nel periodo di tempo analizzato viene calcolata come:

$$D_p = L_p(1 - \beta) + U_p\beta \quad (3.1)$$

Mentre il flusso di materiale previsto, sempre all'interno del medesimo dell'arco temporale, viene determinato con:

$$MF_{jl} = \sum_{P=1}^{n_p} \sum_{R=1}^{R_p} D_p F_{PRj} F_{(P(R+1)l)} \quad (3.2)$$

Sfruttando il *Mixed Integer Programming Model*, unitamente alle costanti appena definite si trova, come modello per il problema FLP in esame:

$$\min \sum_{i=1}^{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_m} \sum_{l=1}^{n_m} \sum_{m=1}^{n_c} \sum_{n=1}^{n_c} f_{(jl)} C_{jl} d_{(ik)} X_{ij} X_{kl} Y_{im} Y_{kn} \quad (3.3)$$

In tale modello sono state introdotte le seguenti condizioni al contorno:

- $\sum_{i=1}^{n_m} X_{ij} = 1 \text{ con } j=1, \dots, n_m \quad (3.4)$

- $\sum_{j=1}^{n_m} X_{ij} = 1 \text{ con } i=1, \dots, n_m \quad (3.5)$

- $\sum_{m=1}^{n_c} Y_{im} = 1 \text{ con } i=1, \dots, n_m \quad (3.6)$

- $\sum_{i=1}^{n_m} Y_{im} = NMC_{(Cm)} \text{ con } m=1, \dots, n_c \quad (3.7)$

(3.4) e (3.5) assicurano che ogni macchinario sia posizionato una sola volta all'interno del lay-out.

(3.6) e (3.7) assicurano che ogni macchinario sia assegnato ad una sola stazione produttiva e che il numero di macchinari per ogni cella sia quello indicato.

Il problema è stato affrontato per due casi distinti.

Il primo caso è riassunto dalle tabelle 3.1 e 3.2, il secondo è schematizzato tramite le tabelle 3.3 e 3.4.

I risultati, ottenuti tramite l'utilizzo di software specifico e simulazione numerica, sono invece rappresentati insieme all'interno della tabella 3.5.

Tabella 3.1: Conformazione delle celle

Cella produttiva	Numero di facilities	Facilities
1	3	1, 2, 3
2	2	4, 5

Tabella 3.2: Domande e sequenze produttive relative ai prodotti considerati

Prodotto	Distribuzione uniforme della domanda		Sequenza produttiva
	Banda inferiore	Banda superiore	
1	20	240	2-3-1-5
2	100	180	3-2-4-5
3	30	40	3-2-1
4	20	40	5-4

Tabella 3.3: Conformazione delle celle

Cella produttiva	Numero di facilities	Facilities
1	3	1, 2, 3
2	2	4, 5
3	2	6, 7

Tabella 3.4: Domande e sequenze produttive relative ai prodotti considerati

Prodotto	Distribuzione uniforme della domanda		Sequenza produttiva
	Banda inferiore	Banda superiore	
1	20	240	3-1-2-4
2	40	100	1-3-5-4
3	30	60	1-2-3
4	20	160	4-5-7
5	40	80	2-3-6-7
6	20	60	3-2-1-7

Tabella 3.5: Soluzioni per i casi in esame

Caso di riferimento		β	Composizione celle produttive	Lay-out		Costo stimato (\$)
1	$(n_p=4),(n_m=5),(n_c=2)$	0.2	1-2	cella 1	1-3-2	948
				cella 2	4-5	
		0.4	1-2	cella 1	3-2-1	1224
cella 2	4-5					
2	$(n_p=6),(n_m=7),(n_c=3)$	0.6	1-2	cella 1	3-2-1	1484
				cella 2	5-4	
		0.4	1-2-3	cella 1	1-2-3	1684
cella 2	4-5					
Cella 3	7-6					
0.8	1-2-3	0.8	1-2-3	cella 1	3-1-2	2554
				cella 2	4-5	
				Cella 3	7-6	

Dai risultati ottenuti nella tabella 3.5 risulta chiaro come al variare dei volumi produttivi per ogni prodotto, insorga la necessità di modifica del lay-out produttivo.

CAPITOLO 4

Caso reale di FLPS risolto con PROMETHÉE II

Come spiegato precedentemente la tendenza, negli ultimi anni, è quella di trovare dei lay-out che soddisfino quanto più possibile le esigenze dell'impianto, massimizzando, o minimizzando, i vari aspetti senza però penalizzarne troppo alcuni a favore degli altri.

In questa ottica le moderne tecniche di risoluzione per FLPS (Facility Layout Problem Selection) utilizzano algoritmi particolari basati sul principio MCDM (cfr. appendice A), cioè funzionanti secondo la logica decisionale multi criterio, al fine di ottimizzare i risultati ottenuti con i metodi precedentemente descritti.

Uno di questi metodi è il PROMETHEE II (cfr. appendice B), tale algoritmo è in grado di fornire una graduatoria completa tra le alternative che vengono valutate.

Il lavoro che si andrà ad analizzare è stato svolto da Vijay Manikrao Athawale e Shankar Chakraborty nel 2010. In particolare, verrà riportato l'esempio illustrativo numero reperibile in [6].

Questo lavoro si riferisce alla scelta tra 3 possibili lay-out in funzione di 8 criteri decisionali differenti.

I tre possibili lay-out verranno nel seguito indicati con le sigle P1, P2, P3.

Gli 8 criteri decisionali saranno:

- Vicinanza del mercato di vendita (*closeness of market (CM)*)
- Vicinanza del luogo di prelievo per le materie prime (*closeness to raw material (CR)*)
- Qualità dei trasporti via terra (*land transportation (LT)*)
- Qualità dei trasporti aerei (*air transportation (AT)*)
- Costo manodopera (*cost of labor (CLR)* (in rupees/worker))
- Disponibilità di lavoro (*availability of labor (AL)*)
- Grado di istruzione della popolazione (*business climate (BC)*)

Escluso il criterio CLR, espresso in Rupie/lavoratore, tutti gli altri verranno valutati con delle lettere. Questi valori alfabetici si riferiscono a delle valutazioni di tipo Fuzzy, e saranno poi tradotte in valori numerici secondo la tabella 4.2.

I valori linguistici assegnati saranno medio (A, average), sopra la media (AA, above average), alto (H, high) e molto alto (VH, very high).

Tabella 4.1: giudizi relativi ai criteri per i singoli impianti considerati

Lay-out considerato	CM	CR	LT	A7 T	CLR	AL	E	BC
P1	H	VH	H	AA	250	H	AA	VH
P2	VH	H	H	VH	265	AA	H	VH
P3	A	H	VH	AA	255	AA	VH	H

Tabella 4.2: tavola di conversione valori linguistici, valori numerici

Valore linguistico	Valore numerico
Eccezionalmente basso	0.045
Estremamente basso	0.135
Molto basso	0.255
Basso	0.335
Sotto la media	0.410
Medio (A)	0.500
Sopra la media (AA)	0.590
Alto (H)	0.665
Molto alto (VH)	0.745
Estremamente alto	0.865
Eccezionalmente alto	0.955

Seguendo i criteri di conversione contenuti nella Tabella 4.2 si ottiene la seguente tabella di valori numerici tradotta dalla Tabella 4.1 di partenza:

Tabella 4.3: valori numerici assegnati ai criteri considerati valutati nei singoli impianti

Lay-out considerato	CM	CR	LT	AT	CLR	AL	E	BC
P1	0.665	0.745	0.665	0.590	250.000	0.665	0.590	0.745
P2	0.745	0.665	0.665	0.745	265.000	0.590	0.665	0.745
P3	0.500	0.665	0.745	0.590	255.000	0.590	0.745	0.665

I dati esposti in Tabella 4.3 verranno quindi normalizzati secondo le formule (B.1) e (B.2), ottenendo i valori di Tabella 4.4.

I pesi assegnati ai vari criteri sono $w_{CM}=0.1267$, $w_{CR}=0.1267$, $w_{LT}=0.0883$, $w_{AT}=0.0517$, $w_{CLR}=0.0929$, $w_{AL}=0.0706$, $w_E=0.1668$ e $w_{BC}=0.2764$.

Tabella 4.4: Matrice decisionale normalizzata

Lay-out considerato	CM	CR	LT	AT	CLR	AL	E	BC
P1	0.6735	1	0	0	1	1	0	1
P2	1	0	0	1	0	0	0.4839	1
P3	0	0	1	0	0.6667	0	1	0

Utilizzando le equazioni (B.3) e (B.4) viene ora calcolata la funzione di preferenza per tutte le possibili coppie di lay-out.

Tabella 4.5: Funzione di preferenza tra tutte le coppie possibili di lay-out

Coppia considerata	CM	CR	LT	AT	CLR	AL	E	BC
(P1,P2)	0	1	0	0	1	1	0	0
(P1,P3)	0.6735	1	0	0	0.3333	1	0	1
(P2,P1)	0.3265	0	0	1	0	0	0.4839	0
(P2,P3)	1	0	0	1	0	0	0	1
(P3,P1)	0	0	1	0	0	0	1	0
(P3,P2)	0	0	1	0	0.6667	0	0.5161	0

Usando l'equazione (B.5) si ottengono i valori relativi alla funzione di preferenza aggregata, espressi in Tabella 4.6, per le soluzioni di lay-out considerate.

Tabella 4.6: Risultati funzione di preferenza aggregata

Lay-out considerato	CM	CR	LT
P1	-	0.2902	0.2144
P2	0.1739	-	0.1182
P3	0.2457	0.2363	-

I valori dei flussi entranti e uscenti per i vari scenari sono ottenuti tramite l'utilizzo di (B.6) e (B.7) e vengono rappresentati in tabella 4.7.

Tabella 4.7: Flussi entranti ed uscenti relativi ai singoli lay-out

Lay-out considerato	Flusso uscente	Flusso entrante
P1	0.4401	0.2144
P2	0.3643	0.1182
P3	0.2457	0.5224

Il valore netto dei flussi per i vari lay-out viene calcolato tramite (B.8) e schematizzato in tabella 4.8.

Tabella 4.8: Flussi netti relativi ai singoli lay-out

Lay-out considerato	Flusso netto	Posizione in classifica
P1	0.2257	2
P2	0.2461	1
P3	-0.2767	3

Utilizzando il metodo PROMETHEE II si ottiene che il miglior lay-out per l'asset produttivo desiderato è il numero 2, P2. Il quale infatti presenta il valore di flusso netto più alto. Questo risultato coincide con i risultati ottenuti con altri studi e altri metodi da altri ricercatori. Confermando quindi come PROMETHEE II sia un ottimo metodo decisionale per problemi di selezione di lay-out a partire da diverse alternative.

CONCLUSIONI

Dalla lettura dell'elaborato si può facilmente intuire come i problemi di lay-out aziendali vadano affrontati per gradi e con una ben definita metodologia.

Per poter applicare le tecniche risolutive sopra descritte bisogna per prima cosa avere a disposizione una considerevole quantità di informazioni sul modello da risolvere.

Prima di poter formulare, e quindi poi risolvere, un FLP, sarà compito del progettista incaricato occuparsi del recupero di tutte quelle informazioni essenziali alla definizione del modello per l'impianto considerato.

Gli algoritmi precedentemente esposti si pongono infatti alla fine di un processo di sintesi del problema di lay-out che deve, necessariamente, iniziare con la raccolta dei dati descrittivi dell'ambiente aziendale obiettivo dell'analisi.

Successivamente, la scelta della tecnica risolutiva più opportuna, deve avvenire tramite la mediazione tra il grado di approssimazione richiesto dalla soluzione cercata e i benefici stimati dalla scelta di un lay-out ottimale. Metodi troppo evoluti potrebbero per esempio portare, ad un eccessivo impiego di risorse in relazione ai benefici derivanti dall'ottimizzazione della disposizione logistica dell'impianto.

Il preciso richiamo, presente all'interno del titolo dell'elaborato, alle aziende con produzione “*per reparti*”, è stato voluto dall'autore al fine di valorizzare l'importanza che la scelta di un buon lay-out ricopre in tali ambiti produttivi.

Infatti, mentre nelle aziende con produzione “*in serie*”, la scelta della disposizione dei macchinari è definita principalmente in funzione del processo produttivo, nelle aziende con produzione “*per reparti*” la logistica dell'impianto è dettata da svariate voci di costo.

Nel moderno mercato globalizzato i beni da produrre sono soggetti ad una continua evoluzione.

Proprio in tale ambito si pone la costante necessità di revisione, e conseguente ammodernamento, degli impianti produttivi. Nel futuro le figure di designer logistici acquisteranno sempre più importanza negli asset aziendali ed il presente elaborato ha tutte le caratteristiche per porsi alla base della formazione di tali nuove figure lavorative.

APPENDICE A

L'approccio MCDM

Con l'acronimo MCDM (Multi Criteria Decision Making) si vuole far riferimento a quella branca di algoritmi sviluppati a partire dal XX secolo, atti alla risoluzione di problemi di scelta multi criterio tramite il soddisfacimento contemporaneo di più vincoli decisionali.

Vari metodi MCDM sono disponibili per aiutare la scelta della migliore alternativa tra un set di possibili soluzioni. Tra i più importanti si vogliono ricordare i seguenti: Simple Additive Weighting (SAW), Weighted Product Method (WPM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), Graph Theory and Matrix Approach (GTMA), Grey Relational Analysis (GRA), Data Envelopment Analysis (DEA), Elimination and Et Choice Translating Reality (ELECTRE).

Tra le tecniche di ottimizzazione combinatoria di maggior successo impiegate per risolvere FLP si ricordano: Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Tabu search.

Nell'elaborato viene presentata l'implementazione, a scopo decisionale, del metodo PROMETHEE II, evoluzione del precedente PROMETHEE.

In particolare PROMETHEE è un metodo basato sull'approccio MCDM che permette di gestire efficacemente confronti tra valori fuzzy, linguistici, e valori discreti, numerici.

Il confronto a coppie delle alternative viene eseguito per calcolare una funzione di preferenza relativa a ciascun criterio. Sulla base di questa funzione di preferenza viene poi caratterizzato l'indice globale di preferenza. Questo indice rappresenta la misura tramite la quale definire la priorità tra le varie alternative.

Il metodo PROMETHEE ha vantaggi significativi rispetto ad altri approcci MCDM come ad esempio MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) e AHP (Analytical Hierarchy Process).

Il metodo PROMETHEE II in grado di classificare alternative il cui confronto tramite altri metodi risulta difficoltoso a causa di un trade-off relativo agli standard di valutazione.

APPENDICE B

PROMETHEE II e FLPS [6]

Il metodo PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) fu sviluppato da Brans e Vincke nel 1985. Esso costituisce un particolare aspetto del processo MCDM ed in particolare si riferisce alla possibilità di creare una gerarchia di importanza tra le alternative analizzate. L'evoluzione di tale algoritmo, il PROMETHEE II permette di creare una classifica tra gli scenari analizzati in funzione di determinati criteri di giudizio.

Nel seguito verrà esposto il procedimento tramite il quale tale metodo viene impiegato a fini decisionali per ottimizzare la scelta tra una serie di possibili soluzioni (cfr. Facility Lay-out Problem Selection).

Fase 1: Normalizzazione della matrice decisionale

$$R_{ij} = \frac{[X_{ij} - \min(X_{ij})]}{[\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})]} \quad \text{con } i=1, \dots, n \text{ e } j=1, \dots, m \quad (B.1)$$

Dove si è assunto che X_{ij} sia la misura della performance dell'alternativa i -esima nei confronti del criterio j -esimo.

Nel caso in cui il criterio j -esimo sia di tipo svantaggioso la formula da utilizzare è:

$$R_{ij} = \frac{[\max(X_{ij}) - X_{ij}]}{[\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})]} \quad \text{con } i=1, \dots, n \text{ e } j=1, \dots, m \quad (B.2)$$

Fase 2: Calcolo della differenza di rendimento tra l'alternativa i -esima e le altre

Questa fase implica il confronto a due a due tra le varie alternative, calcolando di volta in volta la differenza di rendimento relativa alla coppia considerata.

Fase 3: Calcolo della funzione di preferenza $P_j(i, i')$

In letteratura esistono diverse funzioni di preferenza molte delle quali però prevedono la definizione preventiva di alcune costanti o la creazione di bande di valori entro le quali operare.

Nel processo di scelta di un lay-out questo potrebbe costituire un problema per il progettista. Ecco perché tipicamente si utilizza la seguente funzione di preferenza semplificata:

$$P_j(i, i') = 0 \quad \text{se } R_{ij} \leq R_{(i', j)} \quad (B.3)$$

$$P_j(i, i') = R_{ij} - R_{(i', j)} \quad \text{se } R_{ij} > R_{(i', j)} \quad (B.4)$$

Fase 4: Calcolo della funzione di aggregazione delle preferenze

In questa fase viene calcolata la funzione di aggregazione delle preferenze, tenendo conto dei pesi relativi ai singoli criteri indicati come w_j peso del criterio j-esimo

$$\pi(i, i') = \frac{[\sum_{j=1}^m w_j \times P_j(i, i')]}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (B.5)$$

Fase 5: Calcolo dei flussi entranti ed uscenti di classifica

Flussi uscenti (o positivi) per l'alternativa i-esima $\varphi^+(i) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{(i')=1}^n \pi(i, i')$ (B.6)

Flussi entranti (o negativi) per l'alternativa i-esima $\varphi^-(i) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{(i')=1}^n \pi(i', i)$ (B.7)

In B.6 e B.7 n è uguale al numero di alternative considerate.

Il flusso uscente rappresenta quanto l'alternativa in analisi sovrasta le altre. Viceversa il flusso negativo indica quanto quest'ultima sia dominata dalle restanti possibili soluzioni.

Basandosi su questi dati il metodo PROMETHEE II è in grado di fornire una graduatoria delle alternative, ordinandole a seconda del loro valore di flusso netto.

Fase 6: Calcolo del flusso netto per ogni alternativa

$$\varphi(i) = \varphi^+(i) - \varphi^-(i) \quad (B.8)$$

Fase 7: Classificazione in base al valore di $\varphi(i)$

La classifica delle soluzioni viene stilata in ordine decrescente in base al valore di $\varphi(i)$.

In pratica, la soluzione che presenta il valore $\varphi(i)$ maggiore sarà quella più ottimizzata per il problema cercato in funzione dei criteri selezionati.

REFERENCES

1. Articoli, libri, riviste

1.1. Citazioni dirette

1. Rosenblatt, M.J., "The Facilities Layout Problem: A Multi-goal approach", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 17. No. 4, (1979), pp: 323-332
2. Harraz, N., "A Knowledge-Based Decision Support System for Facility Layout", Msc. Thesis, Alexandria University, (1997)
3. Whyte, T. and Wilhelm, M. R., " Facility Layout Design Using Fuzzy Linguistic Variables and Fractals", unpublished Ph.D. dissertation, University of Louisville, Kentucky, USA, (1999)
4. Tsuchiya, K., Bharitkar, S., and Takefuji, Y., "A Neural Network Approach to Facility Layout Problems" *EJOR*, Vol. 89, (1996), pp: 556-563
5. Cheng, R., Gen, M., and Tosawa, T., " Genetic Algorithms For Designing Loop Layout manufacturing Systems", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 31, No. ¾, (1996), pp: 587-591
6. Vijay Manikrao Athawale, Shankar Chakraborty, "Facility Location Selection using PROMETHEE II Method", *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka, Bangladesh, January 9 – 10, 2010*
7. Sh. Ariafar, N. Ismail, S. H. Tang, M. K. A. M. Ariffin, Z. Firoozi, "A stochastic facility layout model in cellular manufacturing systems", *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6(15), pp. 3666-3670, 4 August, 2011, ISSN 1992-1950 ©2011 Academic Journals

1.2. Citazioni globali

- M.A. Shouman, G.M. Nawara, A.H. Reyad, Kh. EL-Darandaly, "Facility Layout Problem (FLP) and Intelligent Techniques: A Survey"
- Amine Drira, Henri Pierreval, Sonia Hajri-Gabouj, "Facility layout problems: A survey", *Annual Reviews in Control* 31 (2007) 255–267