

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA GESTIONALE

STATO DELL'ARTE SUL CELL FORMATION E WORKER
ASSIGNMENT NELL'AMBITO DEL CELLULAR MANUFACTURING

Tesi di Laurea Magistrale in
SISTEMI DI PRODUZIONE AVANZATI

CANDIDATO:
Jorge Manuel Polanco Argüelles

RELATORE:
Prof.ssa Cristina Mora

SESSIONE III

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

ABSTRACT

Il presente elaborato intende mostrare lo stato dell'arte sul *Cell Formation* e il *Worker Assignment* nell'ambito del *Cellular Manufacturing*, ha come obiettivo classificare gli approcci delle tecniche recentemente sviluppate nel *Cellular Manufacturing* da applicarsi nei Sistemi di Produzioni Avanzati, attraverso la descrizione delle metodologie basati sulla produzione e dell'analisi di tecniche applicate nella *Cell Formation*, evidenzia come metodologie rilevanti: la programmazione matematica, l'euristica / meta-euristica, la intelligenza artificiale e i metodi ibridi. L'analisi si concentra sulle formulazioni proposte negli ultimi dieci anni, sono state scelte sedici tecniche dalla letteratura recente per essere analizzate, attraverso la classifica e valutazioni basati negli approcci, obiettivi, vincoli e confronto dei risultati delle tecniche di soluzione; per il problema di assegnamento del lavoratore, *Worker Assignment*, si descrivono gli approcci di dieci principali tecniche. Concludendo che le ultime tecniche si concentrano nei metodi ibridi come strumenti potenti che affrontano problemi complessi con diversi obiettivi.

Parole chiave: Cell Formation, Worker Assignment e Cellular Manufacturing

INDICE

Introduzione	6
Capitolo 1. Letteratura.....	7
1.1. Group Technology.....	7
1.1.1. Caratteristiche desiderate del gruppo	8
1.1.2. Vantaggi dei gruppi	8
1.2. Cellular Manufacturing	9
1.2.1. Vantaggi del Cellular Manufacturing.....	10
1.2.2. Limitazioni	11
1.3. Cell Formation.....	12
1.4. La matrice Machine - Parti.....	15
1.5. Problemi significativi del Scheduling	16
1.5.1. Instradamento delle parti e parti del collo di bottiglia.....	16
1.5.2. Elementi eccezionali e vouti.....	16
1.5.3. Macchine per colli di bottiglia esistenti nella Cell Formation	17
Capitolo 2. Metodi Production-Based	18
2.1. Descriptive Methods	20
2.1.1. Part-Family Identification	20
2.1.2. Machine-Group Identificaion	20
2.1.3. Families/Machine Grouping.....	20
2.2. Metodi Cluster Analysis.....	21
2.2.1. Metodi Array-Based	21
2.2.2. Metodi Gerarchici.....	21

2.2.3. Metodi Non Gerarchici	22
2.2.4. Metodi Partitional Clustering	23
2.3. Graph Partitioning	23
2.4. Mathematical programming	24
2.5. Metodi Heuristic.....	25
2.6. Metodi Artificial Intelligence.....	26
2.6.1. Fuzzy Logic	26
2.6.2. Neural Networks.....	27
2.7. Metodi Metaheuristics.....	28
2.7.1. Trajectory Methods	28
2.7.2. Population Based Methods.....	30
2.7.3. Ant Colony Optimization	34
2.8. Hybrid Methods.....	35
Capitolo 3. Analisi delle moderne tecniche per la Cell Formation	37
3.1. Confronto delle tecniche	38
Capitolo 4. Worker assignment	42
4.1. Worker task assignment	42
4.2. La matrice tridimensionale Part-Machine-Worker	43
4.2.1. Problemi umani nella Cellular Manufacturing	44
4.3. Sviluppo del Worker Assignment nella Cell Formation	45
Conclusione.....	47
Bibliografia	48

Indice delle figure

Figura 1 Celle formate e flusso delle parti, all'interno e tra le celle.	13
Figura 2 Illustrazione di Matrice Macchine - Parti	15
Figura 3 Vista grafica di vuoti, elementi eccezionali, macchine a collo di bottiglia e parti di collo di bottiglia	17
Figura 4 Classifica dei metodi Production Based per la Cell Formation	19
Figura 5 Vista generale dell'evoluzione dei metodi CF	38
Figura 6 Matrice tridimensionale nella CF	43

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Classifica generale dei metodi per la Cell Formation	14
Tabella 2 Metodi Array-Based.....	21
Tabella 3 Metodi Gerarchici	22
Tabella 4 Modelli di Mathematical Programming	24
Tabella 5 Modelli di Neural Networks NN.....	27
Tabella 6 Alcune applicazione del GA per la Cell Formation.	31
Tabella 7 Un elenco di noti Hybrid Genetic Agorithm.....	36
Tabella 8 Elenco di pubblicazioni utilizzati per l'analisi	39
Tabella 9 Analisi delle moderne metodologie per Cell Formation	40
Tabella 10 Sviluppo del Work Assignment nella Cell Formation	45

Introduzione

Il *Cellular Manufacturing* è l'unione di parti e processi correlati o simili per sfruttare i vantaggi delle somiglianze esistenti nei processi di manifattura e per stabilire la famiglia di parti e il gruppo di macchine da mettere insieme, si applica la *Cell Formation*. Da quando le prestazioni degli approcci si sono sviluppati, diverse tecniche si sono state presentate, per mostrare il loro stato dell'arte, il presente elaborato è strutturato come segue:

Nel primo capitolo si mostrano i concetti principali dell'ambito *Cellular Manufacturing* e *Group Technology*, la classifica dei metodi per la *Cell Formation* e la descrizione dello strumento per il raggruppamento, la matrice macchine – parti.

Nel secondo capitolo vengono dettagliati le metodologie sotto la classifica basata sulla produzione, pubblicate nelle riviste di ricerca scientifica, che sono state applicate nella *Cell Formation*.

Nel terzo capitolo viene presentato l'analisi di diverse tecniche utilizzate negli ultimi dieci anni attraverso la classifica di obiettivi, vincoli, metodo utilizzato, comparazioni realizzate ed strumenti.

Nel quarto capitolo si presenta l'evoluzione di alcune tecniche per l'assegnazione del lavoratore in una matrice tridimensionale per il raggruppamento di macchine e parti.

Capitolo 1. Letteratura

1.1.Group Technology

La *Group Technology* (GT) può essere definita come la filosofia manifatturiera per identificare parti simili e aggrupparli insieme per sfruttare le loro somiglianze nella produzione e nella progettazione (Selim, M. S., Askin, R.G., Vakharia, A. J., 1998). È un approccio all'organizzazione del lavoro in cui le unità organizzative sono gruppi relativamente indipendenti, ciascuno responsabile della produzione di una determinata famiglia di prodotti. Un gruppo è una combinazione di un insieme di lavoratori e un insieme di macchine e / o altre strutture disposte in un'area riservata, progettata per completare un insieme specifico di prodotti. Una famiglia è l'insieme di prodotti da un gruppo. Già nel 1920 si osservava che l'uso di reparti orientati al prodotto per fabbricare prodotti standardizzati nelle aziende che utilizzavano macchine comportava una riduzione dei trasporti. Questo può essere considerato l'inizio di GT. Le parti sono classificate e le parti con caratteristiche simili sono fabbricate insieme a processi standardizzati. Di conseguenza, vengono create piccole "fabbriche focalizzate" come unità operative indipendenti all'interno di grandi strutture.

Più in generale, la GT può essere considerata una teoria della gestione basata sul principio secondo cui "*cose simili dovrebbero essere fatte in modo simile*". Nel contesto, le "cose" includono la progettazione del prodotto, la pianificazione del processo, la fabbricazione, l'assemblaggio e il controllo della produzione. Tuttavia, in un senso più generale, GT può essere applicato a tutte le attività, comprese le funzioni amministrative.

Il principio della GT è quello di dividere la struttura produttiva in piccoli gruppi o celle di macchine. Il termine *Cellular Manufacturing* è spesso usato in questo senso. Ognuna di queste celle è dedicata a una famiglia o set di tipi di parti specificati. In genere, una cella è un piccolo gruppo di macchine (di regola non più di cinque). Un esempio potrebbe essere un centro di lavoro con dispositivi di ispezione e monitoraggio.

1.1.1. Caratteristiche desiderate del gruppo

Vi sono sette caratteristiche desiderate per garantire una buona prestazione della GT.

1. Dovrebbe esserci un gruppo di lavoratori speciali per il gruppo. Il gruppo di lavoratori associati a un gruppo specifico costituisce una buona squadra e imparano a comprendere i problemi speciali associati a macchine e attrezzature e alla famiglia di componenti che formano. I lavoratori non dovrebbero essere autorizzati a spostarsi o trasferirsi fuori dal gruppo.
2. Dovrebbe esserci un gruppo di macchine e attrezzature speciali per ciascun gruppo. Al gruppo devono essere fornite macchine necessarie per elaborare tutti i componenti delle famiglie. Le parti non devono spostarsi fuori dal gruppo per operazioni su macchine appartenenti ad altri gruppi. Ciò aiuta a ridurre i tempi di produzione, l'inventario dei lavori in processi, *Work in process* (WIP), e i tempi di gestione.
3. Area appositamente dedicata per alloggiare macchine e attrezzature. Questa è una caratteristica essenziale di tutti i vantaggi di GT.
4. Dovrebbe avere i suoi prodotti speciali da completare.
5. Una destinazione di output comune per il gruppo.
6. Questa caratteristica è essenziale se si vuole trarre il massimo vantaggio dall'uso della sequenza pianificata di carico per ridurre i tempi di installazione e i tempi di messa in servizio e aumentare la capacità della macchina.
7. Il numero di lavoratori nel gruppo dovrebbe essere piccolo.

1.1.2. Vantaggi dei gruppi

- Riduzione del tempo di produzione poiché tutte le operazioni su una parte vengono eseguite all'interno del gruppo.
- Diminuzione dell'inventario dei WIP.
- Miglioramento dei livelli di qualità.
- Completamento dei lavori secondo la scadenza o il programma.
- Tempi di allestimento ridotti, quindi aumento della capacità produttiva.

1.2. Cellular Manufacturing

Il *Cellular Manufacturing* (CM) considerato come un'applicazione della filosofia della GT e il suo principio si concentra sull'identificazione di parti simili a beneficio di una produzione particolare collegando i vantaggi degli approcci produttivi; il cottimo (flessibilità) e la massa (flusso efficiente e alto tasso di produzione), è emerso come una promettente soluzione alternativa per i sistemi di produzione. È una strategia di produzione che produce famiglie di parti all'interno di una singola linea o cella di macchine gestite da macchinisti che lavorano solo all'interno della linea o della cella. Una cella è un'unità di produzione su piccola scala e chiaramente definita all'interno di una fabbrica più grande. Questa unità ha la completa responsabilità della produzione di una famiglia di parti simili o di un prodotto. Tutte le macchine e la forza lavoro necessarie sono contenute all'interno di questa cella, dandole così un grado di autonomia operativa. Si prevede che ogni lavoratore abbia acquisito una gamma completa di competenze operative richieste dalla propria cellula. Pertanto, la rotazione e l'addestramento sistematici del lavoro sono condizioni necessarie per un efficace sviluppo cellulare. È necessaria una formazione completa dei lavoratori per garantire che gli incarichi flessibili dei lavoratori possano essere rispettati.

Il CM è stato descritto come un gradino per raggiungere il *World Class Manufacturing*. L'obiettivo del CM è progettare le celle in modo tale da ottimizzare alcune misure di prestazione. Questa misura delle prestazioni potrebbe essere la produttività, il tempo di ciclo o qualche altra misura logistica. Le misure osservate nella pratica includono pezzi per ora uomo, costo unitario, consegna puntuale, tempi di consegna, percentuali di difetto e percentuale di parti rese cellulari.

Questo processo comporta l'inserimento di un gruppo di insiemi accuratamente selezionati di macchine funzionalmente dissimili in stretta vicinanza l'una con l'altra. Il risultato sono piccole unità produttive *stand-alone* dedicate alla produzione di un set o di una famiglia di parti o, in sostanza, una versione in miniatura di un *layout* di impianto.

Sebbene la macchina possa essere funzionalmente dissimile, la famiglia di parti prodotte contiene requisiti di elaborazione simili, pertanto tutte le parti seguono sostanzialmente lo stesso percorso con alcune variazioni minori (ad esempio, saltando un'operazione). Le celle potrebbero non avere alcun movimento trasportato di parti tra le macchine oppure potrebbero avere una linea di flusso collegata da un trasportatore in grado di fornire un trasferimento automatico.

Il CM è un sistema ibrido che collega i vantaggi di un'officina al *layout* del prodotto della linea a flusso continuo. Il disegno delle celle garantisce un flusso rapido ed efficiente con una elevata produttività associata alle linee di assemblaggio. Tuttavia, fornisce anche la flessibilità dell'officina, consentendo di aggiungere alla linea prodotti simili e diversificati senza rallentare il processo. Inoltre, in un sondaggio di (Wemmerlov, U., Johnson, & D.J., 1997), il CM è promosso come fattore primario per la semplificazione della pianificazione della produzione.

1.2.1. Vantaggi del Cellular Manufacturing

Molte aziende che utilizzano la produzione cellulare hanno riportato miglioramenti immediati nelle prestazioni, con effetti negativi solo relativamente minori. I miglioramenti citati che sembrano essersi verificati abbastanza rapidamente includono riduzioni del lavoro in corso, dei prodotti finiti, dei tempi di consegna, degli ordini in ritardo, degli scarti, della manodopera diretta e dell'area di lavoro.

In particolare, viene migliorato il controllo della produzione e della qualità. Tagliando la fabbrica in unità produttive piccole, omogenee e coerenti, la produzione e il controllo di qualità sono semplificati. Le celle che non funzionano in base al volume e agli obiettivi di qualità possono essere facilmente isolate, poiché le parti/prodotti interessati possono essere rintracciati in una singola cella. Inoltre, poiché le unità produttive sono piccole, la ricerca della radice dei problemi è semplificata.

I parametri di qualità e le procedure di controllo possono essere associati ai requisiti particolari delle parti o dei pezzi specifici di una determinata cella. Concentrando l'attività di controllo della qualità su una particolare unità di produzione o tipo di parte, la cella è in grado di padroneggiare rapidamente i requisiti di qualità necessari. Il controllo è sempre migliorato quando le unità produttive sono mantenute su una scala operativa minima, che è ciò che offre il *Cellular Manufacturing*.

Le celle possono essere progettate per sfruttare le caratteristiche peculiari di ciascuna famiglia di parti in modo da ottimizzare il flusso per ogni cella e per gruppi di celle nel loro insieme. La sistematizzazione del flusso può essere effettuata una cella alla volta in modo da evitare grandi interruzioni nelle operazioni. Quindi le celle facili da sistemare possono fornire esperienza che può essere sfruttata quando i progetti di sistematizzazione più difficili si verificano

successivamente. Le celle che sono state modificate in un flusso di linea mostreranno invariabilmente prestazioni superiori nelle aree di qualità, tempi di produzione e costi, che possono portare a un eventuale beneficio a livello di impianto.

Il flusso di lavoro adattato alle esigenze uniche di ogni prodotto o parte consente all'impianto di produrre contemporaneamente volumi elevati e di alta varietà. Poiché la struttura cellulare integra la versatilità del lavoratore e del prodotto in un'unica unità, ha il potenziale per raggiungere la massima flessibilità del sistema mantenendo l'attenzione della fabbrica. Le celle possono essere progettate attorno a singoli prodotti, gruppi di prodotti, parti univoche, famiglie di parti o qualsiasi altra esigenza di mercato identificata. Per la stessa parte, potrebbe esserci un disegno standardizzato ad alto volume e un design personalizzato a basso volume. Le celle possono essere costruite appositamente per ognuna di queste con particolare attenzione alle esigenze individuali di marketing o produzione richieste dal singolo prodotto o parte.

La rotazione sistematica del lavoro e l'addestramento su più competenze rendono anche possibili compiti di lavoro rapidi e flessibili che possono essere utilizzati per alleviare i colli di bottiglia che si verificano all'interno della cella. Poiché il normale funzionamento delle celle richiede che i lavoratori acquisiscano padronanza di tutte le competenze interne alla cella, una formazione aggiuntiva minima o nulla dovrebbe essere necessaria quando i lavoratori devono essere riassegnati in risposta ai cambiamenti del volume o del mix delle vendite. Quando è normale che i lavoratori apprendano nuove competenze, possono essere facilmente trasferiti in un altro lavoro all'interno della cellula o eventualmente anche in un'unità di produzione completamente diversa. Senza questa flessibilità e versatilità dei lavoratori, non può esserci una reale flessibilità del sistema di produzione.

1.2.2. Limitazioni

Alcuni ricercatori hanno sostenuto che l'implementazione del *Cellular Manufacturing* potrebbe portare a una riduzione della flessibilità produttiva. Si ritiene che la conversione in celle possa causare una certa perdita di flessibilità di percorsi (*routing*), che potrebbe quindi influire sulla vitalità dell'utilizzo delle cellule. Anche ottenere l'equilibrio tra le celle è più difficile che per le officine di flusso o di lavoro. La attrezzatura aziendale ha una capacità relativamente fissa e le officine possono attingere da un *pool* di manodopera qualificata, quindi l'equilibrio non è un

problema. Al contrario, con le celle, se la domanda diminuisce notevolmente, potrebbe essere necessario rompere quella cella e ridistribuire le attrezzature o riformare le famiglie.

Inoltre, alcuni ricercatori hanno avvertito che i benefici della produzione cellulare potrebbero deteriorarsi nel tempo a causa dei continui cambiamenti nell'ambiente di produzione. Infine, va notato che la conversione al *Cellular Manufacturing* può comportare il costoso riallineamento delle apparecchiature. L'onere incombe al gestore di determinare se i costi del passaggio da un layout di processo a uno di celle superano i costi delle inefficienze e della mancanza di flessibilità dei layout di impianto convenzionali.

1.3.Cell Formation

La *Cell Formation* (CF) è il disegno del CM ed è anche uno dei problemi basilari da risolvere nella sua implementazione. L'obiettivo del CF è quello di stabilire la famiglia di parti e il gruppo di macchine per i processi successivi. Il processo di formazione delle celle differisce rispetto al fatto che le celle di produzione siano state create riorganizzando le strutture esistenti in officina o se vengano acquisite nuove strutture per le celle. Dato un insieme di tipi di parti, requisiti di elaborazione, domanda di tipi di parti e risorse disponibili (macchine, attrezzature, ecc.), una progettazione generale della produzione cellulare consiste nei seguenti approcci:

- Le famiglie di parti sono formate in base ai loro requisiti di elaborazione.
- Le macchine vengono aggruppate in celle di produzione.
- Le famiglie di parti sono assegnate alle celle.

Si deve notare che i passaggi precedenti non sono necessariamente eseguiti nell'ordine sopra o anche in sequenza.

Per una migliore comprensione di un sistema CF e di come si formano le celle e il flusso delle parti all'interno e tra le celle, in Figura 1 viene mostrato come macchine e parti vengono presi in considerazione insieme a più macchine dello stesso tipo per ogni macchina. Inoltre, sono inclusi anche gli importi di utilizzo della parte / macchina e le sequenze di funzionamento della macchina parte che mostrano il flusso di produzione effettivo. Una rappresentazione visiva di un sistema di *Cell Formation* data le specifiche per ridurre le movimentazioni intercellulari e le impostazioni

della macchina. Il modello può essere generalizzato per includere una struttura dei costi più complessa e altre caratteristiche.

Si noti che ogni elemento nelle caselle quadrate, ovvero M_i^k indica l'istanza k della macchina di tipo i attualmente utilizzata all'interno di una cella. Inoltre gli elementi nelle frecce usano la notazione, $r(s)$ per indicare che la parte r sta usando s unità di capacità della macchina a cui punta la freccia. Tutte le parti seguono un determinato percorso della macchina, indicato dalla direzione delle frecce fino a quando non vengono prodotte. Quest'ultimo è indicato con una freccia in uscita da un blocco di elaborazione parte / macchina che punta verso il nulla.

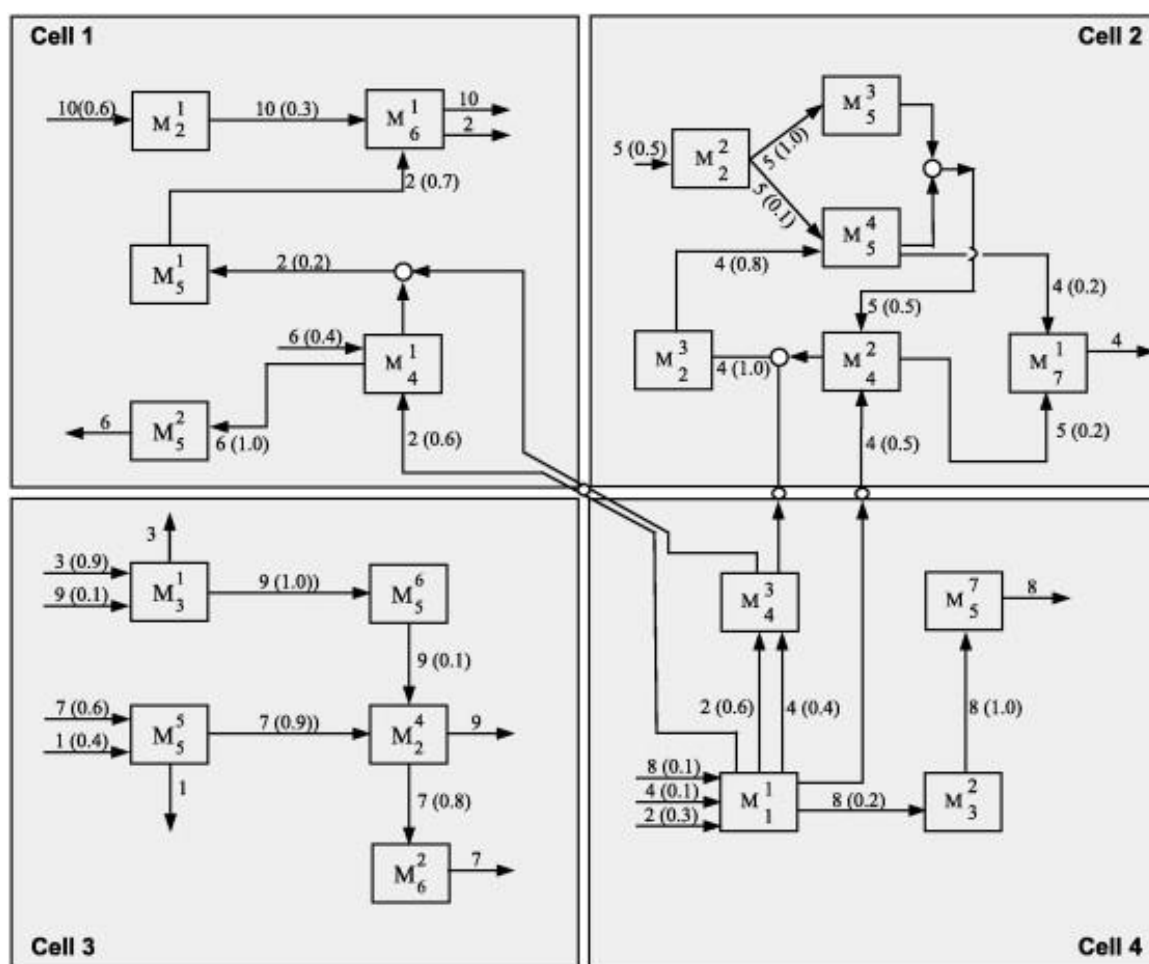


Figura 1 Celle formate e flusso delle parti, all'interno e tra le celle.

Negli ultimi anni, una quantità significativa di articoli di ricerca è stata dedicata a questo problema. A questo proposito, sono stati introdotti numerosi tentativi di classificazione dei metodi CF. La classificazione degli approcci CF è stata introdotta ad esempio da (Offodile, Abraham Mehrez, & John Grznar, 1994) al fine di generalizzare i precedenti quadri di classificazione, la Tabella 1 mostra una categorizzazione di base degli approcci CF che è in accordo con i contributi già introdotti., questi metodi di formazione cellulare sono di conseguenza divisi in tre gruppi di base dove ogni gruppo ha la propria direzione per l'identificazione della parte o della macchina.

Categoria	Breve descrizione
Metodi Informali <i>Informal Methods</i>	Chiamato anche metodo di ispezione visiva o <i>eyeballing</i> , si basano sull'identificazione visiva delle particolari famiglie di parti e gruppi di macchine. Questo metodo è banale solo quando il numero di parti e macchine è piccolo o potrebbe essere grande (2000 componenti), ma con flussi considerevoli. Altrimenti, l'attività di identificazione diventa impossibile
Analisi della codifica delle parti <i>Part Coding Analysis Methods (PCA)</i>	La caratteristica di progettazione delle parti ha un ruolo importante nella formazione delle famiglie di parti. Queste metodologie utilizzano un sistema di codifica per assegnare pesi numerici alle caratteristiche delle parti e identificare le famiglie usando uno schema di classificazione. I sistemi basati sul PCA sono tradizionalmente orientati al disegno come forme, dimensioni e tolleranza, quindi sono ideali per la riduzione della varietà dei componenti
Metodi basati sulla produzione <i>Production-Based Methods</i>	Lo scopo di questi metodi è applicare il principio della produzione in linea ad altri tipi di produzione rispetto alla produzione in serie, anche quando la produzione è ridotta e vi è una grande diversità di prodotto. I metodi basati su <i>Production Flow Analysis (PFA)</i> cercano la soluzione ottimale della formazione cellulare (relazione tra le parti e le macchine) che le elaborano in termini di obiettivi e vincoli.

Tabella 1 Classifica generale dei metodi per la Cell Formation

1.4. La matrice Machine - Parti

La *Cell Formation* consiste nel raggruppare, o raggruppare, macchine in celle e parti in famiglie secondo i loro requisiti di elaborazione simili. L'idea più nota ed efficace per raggiungere l'obiettivo è convertire la matrice iniziale di incidenza della macchina - parte in una matrice che ha una struttura a blocchi diagonali. Tra questo processo, le voci con un valore "1" sono raggruppate per formare cluster reciprocamente indipendenti e quelle con un valore "0" sono disposte al di fuori di questi cluster. Una volta ottenuta una matrice diagonale a blocchi, le celle della macchina e le famiglie di parti sono chiaramente visibili. Tuttavia, il processo genera movimenti intercellulari che richiedono costi o tempi aggiuntivi a causa della presenza di alcune parti che vengono elaborate da macchine non appartenenti al cluster corrispondente. Queste parti sono chiamate elementi eccezionali, *Exceptional Elements* (EE). Di conseguenza, l'obiettivo della diagonalizzazione a blocchi è quello di cambiare la matrice originale in una forma a matrice minimizzando gli elementi eccezionali e massimizzando la bontà del raggruppamento. Per problemi di formazione cellulare, questa matrice può essere considerata una matrice binaria A che mostra la relazione tra una data macchina m e parti p . Righe e colonne rappresentano rispettivamente macchine e parti. Ogni elemento nella matrice è solitamente rappresentato dalle voci binarie a_{ij} dove una voce 1 indica che una parte i viene elaborata dalla macchina corrispondente j mentre una voce 0 indica una situazione contraria. (Ibrahim, Jarboui, & Rebaï, 2012)

$$a_{ij} = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se la parte } j \text{ visita la macchina } i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

		Parti						
		1	2	3	4	5	6	7
Macchine	1	0	1	0	1	1	1	0
	2	1	0	1	0	0	0	0
	3	1	0	1	0	0	0	1
	4	0	1	0	1	0	1	0
	5	1	0	0	0	0	0	1

		Parti						
		1	3	7	2	4	5	6
Macchine	3	1	1	1	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0
	5	1	0	1	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	1	0	1
	1	0	0	0	1	1	1	1

Figura 2 Illustrazione di Matrice Macchine - Parti

1.5. Problemi significativi del Scheduling

1.5.1. Instradamento delle parti e parti del collo di bottiglia

Determinare la migliore combinazione di macchine che possono essere utilizzate nelle operazioni consecutive di una parte (durante o dopo la generazione di celle) è l'obiettivo di affrontare i problemi di instradamento delle parti (*Part routing*). Da un'altra prospettiva nei problemi di instradamento delle parti, ogni parte può essere completata in più di un modo a causa dell'esistenza di macchine parallele. La scelta di permutazioni diverse di varie macchine provoca inevitabilmente diversi movimenti inter e intracellulari e comporta di conseguenza i costi di trasferimento del materiale. Per ridurre al minimo i costi di trasferimento del materiale, generalmente assegnando macchine per generare famiglie di parti mentre nell'altra le parti vengono assegnate a macchine raggruppate in base alla funzione somiglianza o requisiti.

1.5.2. Elementi eccezionali e vuoti

Sono riconosciuti come i principali svantaggi nei processi di formazione e pianificazione delle celle. EE e vuoti di solito emergono durante la generazione di diagonali a blocchi. Gli EE in genere non consentono il riarrangiamento rigoroso della matrice di incidenza dei componenti della macchina, che genera cluster (o celle). Tale fenomeno emerge a causa delle differenze esistenti tra le caratteristiche operative o le capacità della macchina in cui una o più macchine non possono essere raggruppate con altre macchine e quindi sono lasciate sole. L'esistenza di EE aumenta i costi di trasferimento del materiale per quelle parti che sono pianificate (o devono) essere servite da loro. In molti casi, la soluzione è eliminare gli EE dopo o durante la creazione di diagonali a blocchi. D'altra parte, i vuoti rappresentano il percorso inattivo tra un blocco diagonale o all'interno dei cluster. I vuoti non dovrebbero essere confusi con i corridoi perché i vuoti rappresentano luoghi vuoti che avrebbero dovuto essere riempiti dalle macchine durante la formazione delle celle. L'esistenza di vuoti provoca ovviamente maggiori movimenti intracellulari per alcune parti, come mostra la Figura 3. Quindi, ridurre al minimo il numero di vuoti ed EE è l'obiettivo principale di molti studi.

1.5.3. Macchine per colli di bottiglia esistenti nella Cell Formation

Durante la *Cell Formation* o mentre vengono determinati i percorsi delle parti migliori, possono emergere macchine a collo di bottiglia. Le macchine a collo di bottiglia sono quelle che vengono caricate da parti di famiglie di parti diverse (con probabilmente ognuna appartenente a un cluster specifico). L'emergere (o l'esistenza di) colli di bottiglia è un altro fenomeno importante nei problemi di instradamento parziale; tali macchine aumentano i costi di trasferimento del materiale. Le cause sono una pianificazione del percorso parziale inappropriata e alcuni problemi tecnici (ad esempio, nel sistema di produzione è disponibile solo una macchina di un tipo specifico). L'esistenza di macchine a collo di bottiglia può aumentare i movimenti inter e intracellulare di materiali in processo e causare disordine del sistema, come mostra la Figura 3.

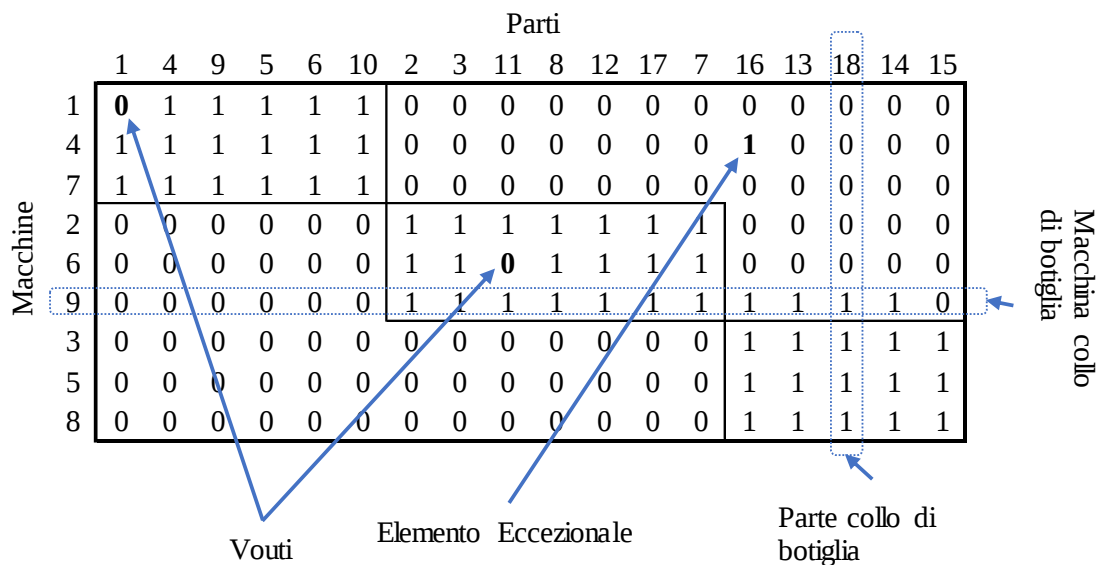


Figura 3 Vista grafica di vuoti, elementi eccezionali, macchine e parti a collo di bottiglia

Capitolo 2. Metodi Production-Based

Negli ultimi quattro decenni, la ricerca sul *Cellular Manufacturing* si è concentrata principalmente su approcci orientati alla produzione. Pertanto, in modo di introdurre l'analisi delle tecniche recenti per la *Cell Formation* del capitolo 3, viene presentata una descrizione non esaustiva delle metodologie sotto la classifica basati sulla produzione e il suo sviluppo attraverso gli anni, queste concetti sono state prese dalle riviste di ricerca scientifiche disponibili.

È stata presa come linea guida, la pubblicazione di (Papaioannou & Wilson, 2010) in cui presenta una recensione dettagliata sulla valutazione delle metodologie per la *Cell Formation*; La classifica dei metodi basati sulla produzione, *Production-Based*, viene presentata nella figura sottostante.

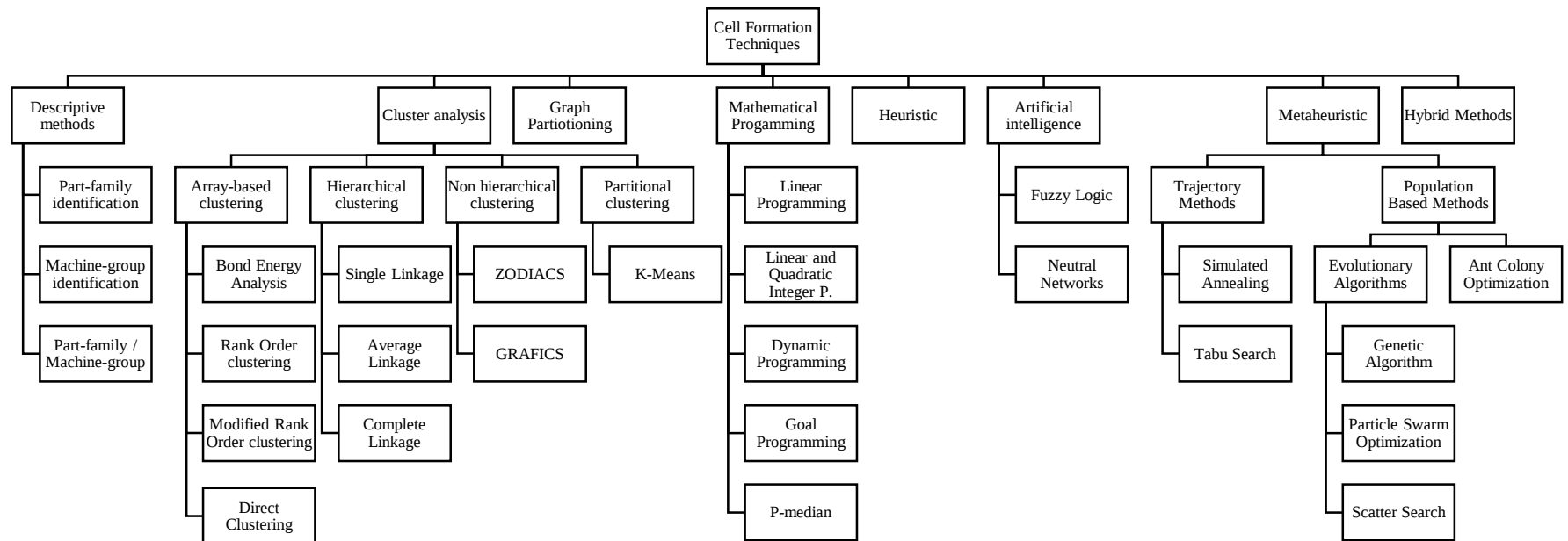


Figura 4 Classifica dei metodi Production Based per la Cell Formation

2.1.Descriptive Methods

A seconda delle procedure oppure formulazioni impiegate per formare celle di produzione e famiglie di parti, vengono identificate tre strategie di soluzione (Selim, M. S., Askin, R.G., Vakharia, A. J., 1998).

2.1.1. Part-Family Identification

Nella identificazione di famiglia e parti, *Part-Family Identification* (PFI), le famiglie di parti vengono formate per prime e quindi le macchine vengono raggruppate in celle in base alle famiglie di parti.

I metodi PFI possono essere sotto-classificati come quelli basati su sistemi informali (ad esempio regole empiriche, esame visivo o altri criteri) e quelli basati su sistemi di codifica e classificazione formali. La maggior parte della letteratura che discute di approcci informali per identificare le famiglie di parti descrive esperienze reali di aziende che hanno implementato cellule. Nel contesto del *Cellular Manufacturing*, il ruolo è principalmente di aiuto nell'identificazione delle famiglie di parti alle quali le celle di produzione dovrebbero essere dedicate. Sono necessarie ulteriori analisi prima che una famiglia di parti sia fabbricata in una cella e che possano essere specificate le macchine che comprenderanno quella cella.

2.1.2. Machine-Group Identification

Nella identificazione dei gruppi di macchine, *Machine-group Identification* (MGI), le celle di produzione (macchine raggruppate) vengono prima create in base alla somiglianza nei percorsi delle parti e quindi le parti vengono allocate alle celle

2.1.3. Families/Machine Grouping

Nella *Families/Machine Grouping* (PF/MG) le famiglie di parti e celle di produzione si formano contemporaneamente

2.2. Metodi Cluster Analysis

Questo gruppo di approcci ha l'obiettivo di raggruppare oggetti o entità o i loro attributi in cluster. Diverse tecniche sono applicate al fine di creare cluster. Tali tecniche possono essere ulteriormente classificate come metodi di clustering *Array-based*, metodi di clustering gerarchici, metodi di clustering non gerarchici e i metodi *Partitional Clustering*.

2.2.1. Metodi Array-Based

Questo metodo riorganizza l'ordine di righe e colonne per trovare una struttura diagonale a blocchi di una matrice di incidenza di macchine-parti, nella tabella sottostante si presentano gli autori che hanno iniziato i metodi *Array-Based*.

Metodo	Titolo dettagliato	Autore
BEA	Bond Energy Analysis	(William, Schweitzer, & White, 1972)
ROC	Rank Order Clustering	(King J. , 1980)
DCA	Direct Clustering Analysis	(Chan & Milner, 1982)
MROC	Modified Rank Order Clustering	(Chandrasekharan & Rajagopalan, 1986)

Tabella 2 Metodi Array-Based

In questi metodi, la matrice a blocchi utilizza come obiettivo la minimizzazione del numero di elementi eccezionali (EE) che rappresentano movimenti inter-cellulari, in pratica significa che implicano un movimento indesiderato di parti su macchine tra le singole celle. Un elemento eccezionale significa sostanzialmente una macchina a collo di bottiglia allocata a una cella mentre è richiesta contemporaneamente nelle altre celle o una parte di una famiglia che richiede le capacità delle macchine allocate ad altre celle.

2.2.2. Metodi Gerarchici

Questi metodi sono finalizzati alla separazione dei dati della matrice macchina - parte in più fasi. Nella prima fase i dati sono raggruppati in poche celle ampie. Successivamente le celle larghe vengono suddivise in gruppi più piccoli fino a quando non vengono generati gruppi

terminali. I metodi gerarchici più frequenti applicati alla *Cell Formation* sono stati i tre metodi di collegamento. Una rappresentazione dei metodi gerarchici può essere fatta da strutture ad albero invertite note anche come dendogrammi, in Tabella 3 si presentano gli autori che hanno iniziato i metodi gerarchici.

Metodo	Titolo dettagliato	Autore
SL	Single Linkage	(McAuley, 1972)
AL	Avarage Linkage	(Seifoddini & Wolfe, 1986)
CL	Complete Linkage	(Mosier, 1989)

Tabella 3 Metodi Gerarchici

2.2.3. Metodi Non Gerarchici

Sono metodi iterativi che richiedono una partizione iniziale del set di dati, costituiti principalmente dal metodo ZODIAC e GRAFICS.

Il metodo ZODIAC, sviluppato da (Chandrasekharan & Rajagopalan, 1986), è una versione ampliata e migliorata del metodo *Ideal Seed*. La formazione di famiglie di parti e celle di macchine è stata trattata come un problema di diagonalizzazione a blocchi della matrice 0-1. Diversi metodi di scelta dei *seed* sono stati sviluppati e testati. Laddove un nuovo concetto chiamato "efficienza relativa" è stato sviluppato e utilizzato come regola di arresto per le iterazioni.

Il metodo GRAFICS, sviluppato da (Srinivasan & Narendran, 1990), è un efficiente algoritmo di *clustering* non gerarchico, basato sui *seed* iniziali ottenuti dal metodo di assegnazione, per trovare famiglie di parti e celle di macchine per la GT. Con un processo di raggruppamento alternato e generazione di *seed* da file e colonne, la matrice di incidenza 0-1 e macchina-componente è stata diagonalizzata a blocchi con l'obiettivo di ridurre al minimo gli elementi eccezionali (movimenti intercellulari) e gli spazi vuoti (macchina al minimo).

2.2.4. Metodi Partitional Clustering

L'algoritmo di clustering *K-means*, che è il più comunemente usato e noto degli algoritmi di clustering classici, è stato sviluppato da (MacQueen, 1967). La logica generale dell'algoritmo è quella di dividere un set di dati composto da n oggetti dati in set k che viene dato come parametro di input. L'obiettivo è massimizzare le somiglianze all'interno dei cluster ottenute al termine del processo di partizionamento minimizzando le somiglianze tra i cluster. La somiglianza tra i cluster è misurata dal valore medio delle distanze tra il baricentro del cluster e altri oggetti nel cluster.

Il valore più alto della funzione obiettivo indica che gli oggetti nel cluster sono lontani dal centro del cluster. Allo stesso modo il valore più basso è l'indicatore che gli oggetti sono più vicini al centro del cluster.

2.3. Graph Partitioning

I metodi di partizionamento grafico, *Graph Partitioning*, trattano le macchine e/o le parti come vertici e l'elaborazione delle parti come archi che collegano questi nodi. Questi modelli mirano a ottenere sotto-grafici disconnessi da un grafico macchina-macchina o macchina-parte per identificare le celle di produzione. (Rajagopalan & Batra, 1975) suggeriscono l'uso dei coefficienti di somiglianza e della teoria dei grafi di Jaccard per formare gruppi di macchine. Ogni vertice nel grafico rappresenta un tipo di macchina e il bordo che collega i vertici j e k viene introdotto nel grafico solo se la "somiglianza" tra i tipi di macchina è maggiore di un valore di soglia prestabilito. Dopo che tutti i bordi consentiti sono stati introdotti, si formano delle cricche. Queste cricche vengono quindi unite per creare celle in modo da ridurre al minimo i movimenti intercellulari. Un limite superiore per la dimensione della cella limita il numero di macchine in ciascuna partizione. Durante il processo si cerca di ottenere un utilizzo elevato ed equilibrato della macchina e vengono utilizzati i carichi della macchina per determinare il numero di macchine di un determinato tipo necessarie per ogni cella, tra le principali metodi sviluppati ci sono:

(Ferriera Ribeiro & Pradin, 1993) sviluppano un algoritmo teorico grafico per raggruppare macchine e parti in celle di produzione convertendo la matrice di somiglianza della macchina in una rete di cluster. La rete di cluster viene suddivisa in celle risolvendo un problema di flusso di costo minimo.

(Askin & Chiu, 2007) hanno proposto una formulazione matematica basata sul costo e una soluzione euristica per il problema della CF.

Il metodo di (Kernighan & Lin, 1970) è stato adattato e applicato in un algoritmo di partizionamento a due fasi. La prima fase assegna parti a macchine specifiche. La seconda fase raggruppa le macchine in celle.

(Vohra, Chen, Chang, & Chen, 1990) hanno proposto un algoritmo basato su rete per ridurre al minimo la quantità di tempi di lavorazione eseguiti all'esterno delle celle primarie della parte. (Wu & Salvendy, 1993) hanno sviluppato un modello di rete per suddividere il grafico macchina-macchina in celle considerando le sequenze operative.

2.4.Mathematical programming

La programmazione matematica, *Mathematical Programming* (MP), si applica per risolvere i problemi di formazione delle celle. La formulazione della MP può essere impiegata per modellare i problemi nella CM in una serie di circostanze riguardanti una vasta gamma di dati di produzione. L'obiettivo è la massimizzazione regolare del numero totale di somiglianze delle parti in ciascuna cella o la minimizzazione dei costi di movimentazione dei materiali tra celle. La maggior parte ricerche orientati al MP sono introdotti e discussi da (Selim, M. S., Askin, R.G., Vakharia, A. J., 1998). MP può essere classificato in altri quattro gruppi per quanto riguarda il loro tipo di formulazione, presentato nella tabella sottostante.

Metodo	Titolo dettagliato	Autore
LP	Linear Programming	(Purcheck, 1974)
LQP	Linear and Quadratic Integer Programming	(Kumar, Kuisak, & Vanelli, 1986)
DP	Dynamic Programming	(Ballaku, 1985)
GP	Goal Programming	(Sankaran & Rodin, 1990)
P-median	P-Median	(Kusiak A. , 1987)

Tabella 4 Modelli di Mathematical Programming

(Boctor, 1991) lavora sul metodo di MP, ha proposto una formulazione lineare di macchina – parte della CF. Gli approcci di programmazione matematica appartengono a metodi che richiedono molto tempo, motivo per cui i ricercatori hanno rivolto la loro attenzione ai metodi euristici con la loro implementazione nella CM.

(Won & Lee, 2004) hanno proposto un approccio *p-median* modificato per un'efficace formazione delle celle con l'obiettivo di massimizzare la somma delle somiglianze tra macchine nella stessa cella. Gli autori hanno commentato che la formulazione originale *p-median* (Kusiak A. , 1987) applicata a situazioni reali era fortemente limitata a causa di due fattori principali: dimensione del problema e tipo di software. La loro nuova formulazione presentava due importanti vantaggi rispetto al modello classico *p-median*: implementazione rapida e grande capacità per la *Cell Formation* anche quando si utilizza software per scopi didattici.

2.5. Metodi Heuristic

I metodi euristici, *Heuristic Methods*, sono molto veloci in contrasto con i metodi di programmazione matematica; sono stati comunemente implementati per molte applicazioni pratiche in quanto sono progettati per fornire una struttura alternativa per risolvere un problema in contrasto con una serie di vincoli di regole limitati che non possono variare. Sebbene gli approcci euristici non garantiscano la fornitura di soluzioni ottimali (di solito si ottengono risultati non ottimali), sono molto utili nel produrre una soluzione accettabile in tempi ragionevoli. I metodi euristici partono da una soluzione fattibile, quindi generano altre soluzioni casuali, valutando e migliorano l'efficacia o la bontà della soluzione col passare del tempo, qui si mostrano tre principali proposte di metodologie euristici per la Cell Formation:

(Mukattash, Adil, & Tahboub, 2002) hanno proposto tre procedure euristiche. Data una soluzione CF, l'euristica è stata progettata per assegnare parti alle celle in presenza di piani di processo alternativi, più macchine alternative e tempi di lavorazione. La CF con presenza di piani di processi alternativi e più tipi di macchine ha portato all'eliminazione di elementi eccezionali.

(Chan, Chan, & Ip, 2003) hanno sviluppato un algoritmo euristico che ha affrontato i problemi di allocazione delle macchine solo quando si è tenuto conto del flusso di materiali intracellulari. L'algoritmo proposto ha utilizzato un approccio adattivo per mettere in relazione le macchine in una cella esaminando i pesi del flusso delle parti unite delle coppie di macchine.

(Kim, Baek, & Baek, 2004) hanno considerato un problema più completo con una formulazione macchina multi-obiettivo. Le famiglie di percorsi parziali e le celle della macchina dovevano essere determinate in modo tale da consentire la minimizzazione della somma totale dei movimenti intercellulari delle parti e il massimo squilibrio del carico di lavoro della macchina.

2.6. Metodi Artificial Intelligence

Un altro gruppo significativo di metodi rivolti alla *Cell Formation* è introdotto come intelligenza artificiale, *Artificial Intelligence* (AI), ispirata dalla natura stessa. Nella maggior parte dei casi, gli approcci all'intelligenza artificiale rappresentano un sistema robusto e adattivo. Durante il processo di apprendimento possono eseguire una modifica della struttura in base alle informazioni che fluiscono attraverso la rete, vengono identificati la logica *fuzzy* e le reti neurali.

2.6.1. Fuzzy Logic

In letteratura ci sono molti modelli *Fuzzy* per la *Cell Formation*. Alcuni studi considerano le funzionalità di progettazione per il raggruppamento di parti mentre altri utilizzano i requisiti di elaborazione. Ci sono studi che trattano come input una matrice non binaria di macchine-parte. Variabili linguistiche *Fuzzy* possono definire le caratteristiche del progetto. Ci sono anche alcuni altri studi che hanno utilizzato modelli matematici *Fuzzy*. L'approccio di programmazione parametrica fuzzy può essere utilizzato per la progettazione della CM. L'algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) è stato adattato con successo per risolvere la CF, le principali metodologie sono stati proposte da Xu & Wang e Chu & Hayya.

(Xu & Wang, 1989) hanno utilizzato le funzionalità di progettazione per risolvere i problemi di CF dall'algoritmo FCM

(Chu & Hayya, 1991) hanno usato le informazioni dei percorsi (*routing*); dopo questo studio, diversi ricercatori hanno proposto modifiche alternative dell'algoritmo FCM per migliorare l'efficienza del raggruppamento.

2.6.2. Neural Networks

Le rette neuronali, *Neural Networks* (NN), sono sviluppate per modellare il modo in cui il cervello umano elabora le informazioni, è una struttura parallela e distribuita di elaborazione delle informazioni costituita da un'enorme quantità di neuroni semplici lineari o non lineari (che possono possedere una memoria locale ed eseguire operazioni di elaborazione delle informazioni localizzate) come elementi di elaborazione di base. Sono interconnessi con canali di segnale unidirezionali (chiamati connessioni) in reti multilivello. Ogni neurone ha un singolo output, che si ramifica in tutte le connessioni collaterali desiderate. Ogni neurone trasporta lo stesso segnale, il segnale di uscita del neurone. Questo segnale può essere di qualsiasi tipo matematico desiderato. L'elaborazione che ha luogo all'interno di ciascun neurone deve essere completamente locale: deve dipendere solo dai valori correnti del segnale di ingresso che arriva al neurone attraverso le connessioni di contatto e dai valori memorizzati nella memoria locale del neurone.

In generale, una NN ha un livello di input per ricevere dati dal mondo esterno e un livello di output per inviare informazioni a utenti o dispositivi esterni. I livelli che si trovano tra i livelli di input e output sono chiamati layer nascosti e non hanno alcun contatto diretto con l'ambiente. Le reti neurali possono o meno avere strati nascosti. Ad oggi, sono stati sviluppati molti tipi di architetture di reti neurali tra cui i modelli più utilizzati sono mostrati in la Tabella 5.

Algoritmo	Titolo dettagliato	Autore
IAC	Interactive Activation and Competition Model	(Moon, 1992)
SNN	Stochastic Neural Network	(Arizono, Kato, Yamamoto, & Ohta, 1995)
CGN	Carpenter Grossberg Network	(Kaparthi & Suresh, 1992)
CL	Competitive learning	(Chu, 1993)
GNA	Graph Neural Approach	(Mahdavi, Kaushal, & Chandra, 2001)
SOFM	Self Organising Feature Map	(Venugopal & Narendran, 1994)

Tabella 5 Modelli di Neural Networks NN

Algoritmo	Titolo dettagliato	Autore
SOM	Self Organising Map	(Lee, Malavé, & Ramachandran, 1992)
ART	Adaptive Resonance Theory	(Kusiak & Chung, 1991)
ART-II	Adaptive Resonance Theory II	(Chen, Chen, & Park, 1996)
FMM	Fuzzy min-max	(Dobado, Lozano, Bueno, & Larrañeta, 2002)
Chaotic NN	Transiently Chaotic Neural Network	(Soleymanpour, Vrat, & Shankar, 2002)
HNN	Hopfield Neural Network	(Zolfagha Ri & Liang, 1997)
KSOM	Kohonen Self-Organising Map Networks	(Kiang, 2001)
AHM	Adaptive Hamming Net	(Lee, Yamakawa, & Lee, 1997)
BP	Back Propagation Models	(Kao & Moon, 1991)

Tabella 5 Modelli di Neural Networks NN (continuata)

2.7. Metodi Metaheuristics

Gli algoritmi meta-euristici sono derivati di potenti algoritmi euristici, che sulla base dei metodi euristici, identificano le migliori soluzioni possibili guidandoli nello spazio di ricerca. La meta-euristica è stata sviluppata principalmente per la soluzione di problemi di ottimizzazione combinatoria NP-difficile, *Combinatory Optimization* (CO). La *Cell Formation* è considerata un problema di ottimizzazione complesso e difficile. Molti ricercatori, al fine di ottenere maggiori benefici dal problema della CF, hanno applicato algoritmi meta-euristici.

2.7.1. Trajectory Methods

Questi metodi cominciano da uno stato iniziale (la soluzione iniziale) e descrivono la traiettoria nello spazio degli stati. Sono costituiti dal Metodo *Simulated Annealing* e *Tabu Search*.

2.7.1.1. Simulated Annealing

Il metodo *Simulated Annealing* (SA) è stato sviluppato da (Kirkpatrick, Gellat, & Vecchi, 1983), SA è un potente metodo meta-euristico che evita il minimo locale saltando a uno stato di energia superiore fino a trovare la migliore soluzione negli spazi di ricerca.

SA è un metodo di ricerca locale randomizzato che è stato utilizzato per ricavare soluzioni quasi ottimali per problemi di ottimizzazione computazionalmente complessi. È stato originariamente sviluppato come modello di simulazione per un processo di ricottura fisica e quindi viene chiamato "ricottura simulata" (*simulated annealing*). In sostanza, il metodo differisce dai metodi di ricerca locali poiché consente l'accettazione di una soluzione inferiore nel vicinato generale di una soluzione corrente con qualche probabilità positiva. Quindi, facilita la ricerca di una superficie di risposta che può avere più ottimi locali (Vakharia & Chang, 1997). In generale, per implementare una procedura di SA per qualsiasi problema di ottimizzazione complesso, è necessario prendere diverse decisioni, come:

- Che cos'è una soluzione?
- Qual è il costo di una soluzione?
- Come determiniamo una soluzione iniziale?
- Qual è il vicinato di una soluzione?

A differenza di altri metodi euristici e meta-euristici, la SA si rivela un algoritmo multi-obiettivo efficace e facile da implementare per affrontare molteplici problemi di ottimizzazione. L'algoritmo SA sviluppato per il problema della CF è stato il numero di celle risultanti nella quale la migliore efficacia di raggruppamento viene generata automaticamente o agli utenti viene data la flessibilità di scegliere il numero di cellule che preferiscono.

Suggerimenti per il miglioramento delle prestazioni sono stati prodotti da (Eglese, 1990); anche (Souilah, 1995) che presentano l'algoritmo SA generale e mostrano anche come è stato usato per raggruppare le risorse in celle di produzione, progettano il layout all'interno delle celle e posizionare le celle di produzione sulla superficie disponibile.

2.7.1.2. Tabu Search

La Ricerca Tabu, *Tabu Search* (TS) è una procedura di ricerca deterministica che imita il processo decisionale dell'essere umano. TS esplora l'intero quartiere di una soluzione di altissima qualità. Una volta trovata la migliore soluzione adiacente, viene eseguito il passaggio a tale soluzione e la soluzione appena ottenuta viene impostata come soluzione corrente per la successiva iterazione. Per evitare il cicilismo, ogni volta che si verifica una mossa l'intera o parte della soluzione che è stata visitata di recente viene aggiunta a una memoria a breve termine denominata "elenco tabu". Nel TS standard, la dimensione dell'elenco tabu viene fissata e una volta aggiunta una nuova soluzione (o parte di una soluzione) nel tabu, l'ultima soluzione (parte della soluzione) nell'elenco viene eliminata. (Aljaber, Wonjang, & Chen, 1997) TS è una delle meta-euristiche di maggior successo per l'applicazione ai problemi di CO, generalmente caratterizzata da:

- Soluzione iniziale.
- Tipo di mosse applicabile a una soluzione fattibile.
- Dimensione del quartiere.
- Dimensione elenco tabu.
- Criteri di arresto.

2.7.2. Population Based Methods

2.7.2.1. Evolutionary Algorithms

Gli algoritmi evolutivi, *Evolutionary Algorithms* (EA), utilizzano forti semplificazioni, questo insieme viene successivamente modificato dai due principi di base dell'evoluzione: selezione e variazione. La selezione rappresenta la competizione per le risorse tra gli esseri viventi. Alcuni sono migliori di altri e hanno maggiori probabilità di sopravvivere e riprodurre le loro informazioni genetiche. Negli algoritmi evolutivi, la selezione naturale è simulata da un processo di selezione stocastica. Ogni soluzione ha la possibilità di riprodursi un certo numero di volte, a seconda della sua qualità. Pertanto, la qualità viene valutata attraverso la valutazione degli individui e assegnandoli valori di fitness scalari. L'altro principio, la variazione, imita la capacità naturale di creare "nuovi" esseri viventi mediante ricombinazione e mutazione. (Zitzelr, 1999).

2.7.2.2. Genetic Algorithm

L'algoritmo genetico, *Genetic Algorithm* (GA), è uno dei nuovi approcci di ottimizzazione che tentano di imitare i processi naturali al fine di creare procedure di ottimizzazione per scopi generali. Il GA fu sviluppato da (Holland, 1975) ed è stato ampiamente utilizzato come metodo alternativo per risolvere diversi problemi di ottimizzazione in una vasta gamma di settori applicativi tra cui il *Cellular Manufacturing*. Come metodo di ricerca di scopo generale, il GA combina elementi di ricerca diretta e stocastica per esplorare e sfruttare lo spazio di ricerca per ottenere buone soluzioni. Contrariamente ad altre ricerche stocastiche, gli GA hanno le seguenti caratteristiche uniche: parallelismo implicito, ricerca basata sulla popolazione, indipendenza delle informazioni sul gradiente e flessibilità per ibridare con l'euristica dipendente dal dominio. Queste caratteristiche spesso rendono gli GA una scelta preferibile rispetto all'euristica tradizionale.

Il GA parte da una popolazione di individui generati casualmente e succede in generazioni, in ogni generazione il "fitness" di ogni individuo nella popolazione è valutato, alcuni individui sono selezionati stocasticamente dalla popolazione attuale (basato nel loro fitness) per formare una nuova popolazione, la nuova popolazione è allora utilizzata nella prossima iterazione dell'algoritmo. Comunemente l'algoritmo termina quando è stato prodotto un numero massimo di generazioni o quando è stato raggiunto un livello di fitness soddisfacente per la popolazione. Le GA sono state efficacemente utilizzate per la Cell Formation, nella tabella sottoscritta si presentano i principali approcci.

Autore e anno	Approccio
(Venugopal & Narendran, 1992)	Modellano il problema della CF basandosi sulla minimizzazione della variazione totale del carico delle celle usando GA.
(Joines, Culbreth, & King, 1996)	Sviluppano un programma intero per problemi di progettazione di celle e hanno utilizzato GA per risolvere il modello formulato.
(Zhao & Zhiming, 2000)	Presentano un GA per la CF con molteplici percorsi e obiettivi.
(Onwubolu & Mutingi, 2001)	Sviluppano un approccio GA tenendo conto della variazione del carico delle celle.

Tabella 6 Alcune applicazioni del GA per la Cell Formation.

Autore e anno	Approccio
(Brown & Sumichrast, 2001)	Propongono un approccio usando il raggruppamento di GA.
(Uddin & Shanker, 2002)	Affrontano un problema di raggruppamento generalizzato, in cui ogni parte ha più di un percorso di processo. Il problema è formulato come un problema di <i>integer programming</i> ed è suggerita una soluzione basata su GA.
(Gonçalves & Resende, 2004)	Presentano un nuovo approccio per ottenere celle di macchine e famiglie di prodotti. L'approccio combina un'euristica <i>Local Search</i> con un GA.

Tabella 6 Alcune applicazione del GA per la Cell Formation. (Continuata)

2.7.2.3. Particle Swarm Optimization

Gli algoritmi *Particle Swarm Optimization* (PSO) sono stati proposti da (Kennedy & Eberhart, 1995) e sono una delle più recenti tecniche di ottimizzazione evolutiva. La loro ispirazione biologica si basa sulla metafora dell'interazione sociale e della comunicazione in uno stormo di uccelli o in un gruppo di pesci che nuota nella stessa direzione in modo coordinato. In questi gruppi c'è un leader che guida il movimento di tutto lo *swarm* (individui spostati da qualche parte in gruppo). Il movimento di ogni individuo si basa sul leader e sulla sua conoscenza. Poiché il PSO è basato sulla popolazione ed è di natura evolutiva, gli individui (cioè le particelle) in un algoritmo PSO tendono a seguire il leader del gruppo, cioè quello con le migliori prestazioni. In generale, si può dire che il modello a cui si ispira il PSO presuppone che il comportamento di ogni particella sia un compromesso tra la sua memoria individuale e una memoria collettiva. I principi che regolano gli algoritmi PSO possono essere dichiarati come segue:

- Ogni particella ha una posizione (soluzione) e una velocità (cambia il modello della soluzione).
- Ogni particella conosce la sua posizione e il valore della funzione obiettivo per quella posizione.

- Ricorda inoltre la sua migliore posizione precedente e il corrispondente valore della funzione obiettivo.
- Può generare un vicinato da ogni posizione.
- Conosce la migliore posizione tra tutte le particelle e il suo valore di funzione obiettivo.
- In ogni iterazione t , il comportamento di una particella è un compromesso tra tre possibili alternative:
 - Seguendo l'attuale modello di esplorazione,
 - Tornando alla sua migliore posizione precedente,
 - Andando verso il miglior valore storico di tutte le particelle.

Questi principi seguono tre fasi; la fase di valutazione indica quanto bene ogni particella (soluzione candidata) risolve il problema attuale, la fase di confronto identifica le particelle migliori e la fase di imitazione produce nuove particelle sulla base delle migliori particelle precedentemente trovate. Queste fasi vengono preparate fino a quando non viene soddisfatto un determinato criterio di arresto, l'obiettivo è trovare la particella che risolva meglio il problema desiderato.

Sebbene la maggior parte di queste applicazioni corrisponda all'ottimizzazione delle funzioni su un dominio continuo, è stata applicata anche ad alcuni problemi di ottimizzazione combinatoria come il problema di assegnazione di attività (Salam, Ahmad, & Al-Madani, 2002) o il Problema del commesso viaggiatore (Clerc, 2000).

2.7.2.4. Scatter Search

La ricerca a dispersione, *Scatter Search* (SS), è stata introdotta per la prima volta da (Glover, 1977) come euristica per la programmazione di numeri interi. Ora è un meta-euristico ragionevolmente stabilito che ha ricevuto rinnovata attenzione.

Il metodo SS orienta verso una serie di preferenze che consistono tipicamente in buone soluzioni ottenute dalla precedente risoluzione dei problemi, i criteri di “buono” non sono limitati per valori di funzione oggettivi e possono applicarsi a sotto-collezioni di soluzioni piuttosto che a un'unica soluzione. È basato sul presupposto che i metodi di creazione di nuove soluzioni offrono

vantaggi significativi oltre a quelli derivati dalle risorse alla randomizzazione. Le soluzioni vengono generate appositamente per tener conto delle varie parti caratteristiche dello spazio della soluzione. La metodologia SS è molto flessibile e ciascuno dei suoi elementi può essere implementato in vari modi. Inoltre, l'algoritmo incorpora procedure basate su diverse strategie, come la diversificazione, la ricerca locale, la ricerca tabu o il ricollegamento dei percorsi.

2.7.3. Ant Colony Optimization

L'ottimizzazione delle colonie di formiche, *Ant colony optimization* (ACO), fu inizialmente sviluppata da (Dorigo & Di Caro, 1999), che imita matematicamente il comportamento delle formiche reali. Le formiche vere che vivono nelle colonie lasciano il nido per trovare cibo e poi tornano di nuovo al nido. Le osservazioni rivelano che queste formiche scelgono sempre il percorso più breve per raggiungere il cibo. Non appena questo percorso più breve viene trovato dalle formiche precedenti, le formiche posteriori seguono meravigliosamente lo stesso percorso. Sembra che esista un sistema di comunicazione complicato, che controlla il processo con molta attenzione. Il segreto di questa comunicazione si basa su una sostanza, chiamata feromone.

Le formiche reali segnalano il percorso che hanno superato mettendo feromone a terra. Questa sostanza è odorata dalle formiche posteriori e le porta a seguire le precedenti. Più formiche passano su un sentiero, più feromone viene messo su quel sentiero. È noto che questa sostanza viene evaporata e non rimane a lungo sul terreno. Quindi, si può concludere che la densità o la quantità di feromone sul percorso più breve, sarà maggiore di quella del percorso più lungo. Quando le nuove formiche che arrivano raggiungono un bivio, dovrebbero prendere una decisione per scegliere uno dei percorsi. Questa è una scelta casuale basata sulla quantità di feromone che si sente su ogni percorso. Quindi, il percorso con un feromone più alto avrà più probabilità di essere scelto. Per questo motivo, col passare del tempo, la quantità di feromone su un percorso più breve diventa sempre di più. Quindi, la probabilità che il percorso più lungo sia scelto diventa zero dopo un po' e tutte le altre formiche scelgono il percorso più breve. Questa è una soluzione di problemi evolutivo che viene utilizzato dalla natura in cui si ottiene la soluzione ottimale (il percorso più breve per le formiche in tutto il suo significato). Il metodo ACO può essere utilizzato anche per altri problemi classici noti come il problema del commesso viaggiatore, il *Bin Packing Problem*, il flusso massimo e così via.

Il tentativo negli algoritmi di formica non è quello di simulare completamente il comportamento delle formiche reali attraverso formulazioni matematiche, ma di derivare regole di comunicazione tra le formiche artificiali. Quindi, una formica artificiale è un agente computazionale e un algoritmo di formica è una colonia di agenti che comunicano quasi come le formiche naturali. È in questo contesto che alcune delle proprietà delineate per questi agenti potrebbero non essere vere per le formiche reali. Le seguenti caratteristiche sono specificamente assunte per le formiche artificiali:

- Le formiche artificiali sono in grado di memorizzare i loro percorsi.
- Le formiche artificiali vengono scartate dopo ogni viaggio dal nido alla fonte di cibo (ogni iterazione).
- Le formiche artificiali non sono completamente cieche ma in grado di includere informazioni euristiche nelle loro selezioni.
- Le formiche artificiali vivono in un ambiente in cui il tempo è discreto.

Una descrizione generica della procedura seguita nel ACO è data come segue:

- Pasaggio 1. Inizializzare i parametri e le tracce dei feromoni.
- Pasaggio 2. Per ogni formica costruire una soluzione completa.
- Pasaggio 3. Migliorare ciascuna soluzione al suo ottimale locale.
- Pasaggio 4. Aggiorna le tracce dei feromoni.
- Pasaggio 5. Se è consentita la continuazione, andare al passaggio 2, altrimenti *stop*.

2.8. Hybrid Methods

I metodi ibridi, *Hybrid Methods*, risolvono la *Cell Formation* mediante combinazioni di due metodi diversi. In questo caso si basano su combinazioni di metodi di analisi dei cluster, metodi di programmazione matematica, euristica e approcci di intelligenza artificiale. Gli ibridi sfruttano entrambi i metodi che possono risolvere in modo efficiente la *Cell Formation*.

L'interesse per la meta-euristica ibrida è aumentato considerevolmente tra i ricercatori nell'ottimizzazione combinatoria. La meta-euristica ibrida è un'abile combinazione di una meta-euristica con altre tecniche di ottimizzazione che forniscono un comportamento più efficiente e

una maggiore flessibilità. Un'alta percentuale di meta-euristica che ibrida la meta-euristica basata sulla produzione con l'euristica della *Local Search* è stata proposta per vari problemi di ottimizzazione. Le euristiche pure basate sulla produzione come gli algoritmi genetici, programmazione genetica, algoritmi evolutivi, *Ant Colony Optimization*, ecc. si elencano nella tabella sottoscritta: (Talbi, 2002).

Algoritmo	Titolo dettagliato	Autore
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm	(Schaffer, 1985)
WBGA	Weight-based Genetic Algorithm	(Hajela & Lin, 1992)
MOGA	Multi-objective Genetic Algorithm	(Fonseca & Fleming, 1993)
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm	(Horn, Nafpliotis, & Goldberg, 1994)
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	(Srinivas & Deb, 1994)
RWGA	Random Weighted Genetic Algorithm	(Murata & Ishibuchi, 1995)
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm	(Zitzler & Thiele, 1999)
PAES	Pareto-Archived Evolution Strategy	(Knowles & Corne, 2000)
PESA	Pareto Envelope-based Selection Algorithm	(Corne, Knowles, & Oates, 2000)
SPEA-II	Improved SPEA	(Zitzler, Laumanns, & Thiele, 2001)
PESA-II	Region-based Selection in Evolutionary Multi-objective Optimization	(Corne, Jerram, Knowles, & Oates, 2001)
NSGA-II	Fast Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	(Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002)
RDGA	Rank-Density Based Genetic Algorithm	(Lu & Yen, 2003)

Tabella 7 Un elenco di noti Hybrid Genetic Algorithm.

Capitolo 3. Analisi delle moderne tecniche per la Cell Formation

Per analizzare le metodologie più recenti sono state prese, come linea guida, le ricerche di Papaioannou & Wilson e Modrák & Semanco.

(Papaioannou & Wilson, 2010) presentano un'analisi della letteratura sulla *Cell Formation* concentrandosi sulle formulazioni proposte negli anni 1997 - 2008. La ricerca si riferisce a 52 approcci di soluzione che sono stati impiegati per la CF come programmazione matematica, euristica / meta- euristica, teoria fuzzy, strategie di intelligenza artificiale e reti neurali; confronta e valuta le metodologie evidenziando alcune carenze. Identifica una serie di elementi inclusi nell'agenda di ricerca proposta da (Selim, M. S., Askin, R.G., Vakharia, A. J., 1998) come l'inclusione dell'utilizzo di parti - macchine, macchine dello stesso tipo, requisiti di elaborazione delle operazioni e domanda instabile. Suggerisce che alcune componenti aggiuntive potrebbero essere incluse nella futura agenda per la CF proponendo che i ricercatori dovrebbero concentrarsi maggiormente su multi-obiettivi anziché su singoli obiettivi e che l'incertezza nell'utilizzo della parte / macchina potrebbe essere studiata usando la teoria fuzzy; la meta- euristica ibrida che sono strumenti potenti da essere impiegati più frequentemente per sistemi complessi come la CF.

(Modrák & Semanco, 2012) presentano i progressi nell'area della ricerca sulla gestione delle operazioni, focalizzata sugli sviluppi negli approcci e metodi di mediante mappatura fonti letterarie negli anni 2000 - 2010 dove identifica i rapporti tra concetto e strumenti in entrambe le aree che sono empiricamente considerati 63 approcci di soluzione avendo come risultato la evoluzione dei metodi basati sulla produzione utilizzati e il percentuale d'uso questi, concludendo che le recenti tecniche per la *Cell Formation* si concentrano nei metodi meta- euristici

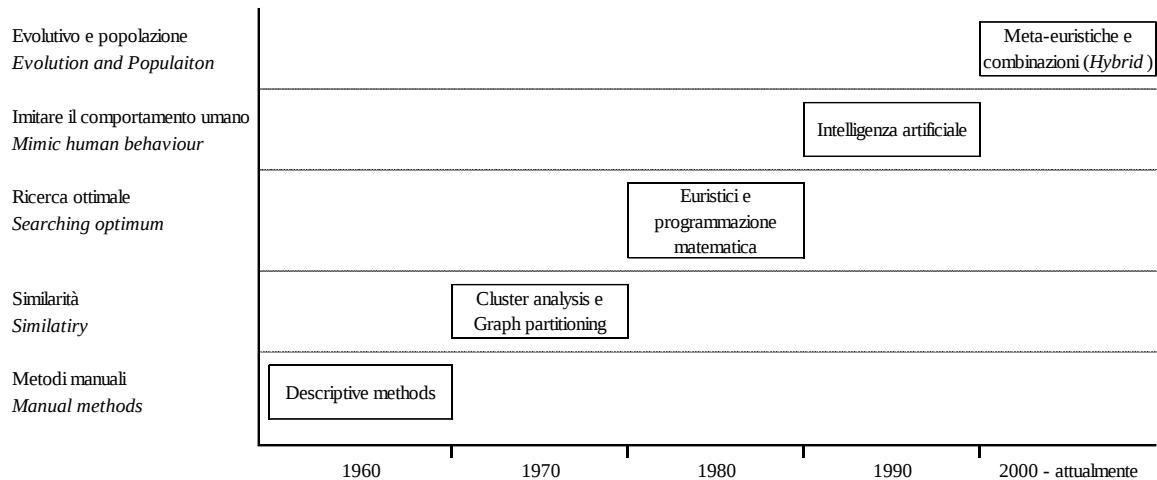


Figura 5 Vista generale dell'evoluzione dei metodi CF

In Figura 5 viene evidenziata l'evoluzione dei metodi e mostra che attraverso il tempo, si sono sviluppati i metodi meta-euristici e ibridi, torna importante per l'analisi, mostrando che la maggior parte delle soluzioni per la CF appartengono al gruppo ibrido e meta-euristico.

3.1. Confronto delle tecniche

È stato incluso un elenco significativo ma non esaustivo di 16 articoli di ricerca pubblicati nelle riviste scientifiche che sottolineano il lavoro svolto sulla *Cell Formation* nell'ultimo decennio. Vale la pena notare che questi articoli sono stati selezionati per essere inclusi in questa analisi poiché il loro contributo copre un ampio spettro di direzioni affini all'obiettivo del presente elaborato. Tutti gli articoli sono stati classificati in base a diverse metodologie descritte nel capitolo 2 e il loro contributo discusso

In Tabella 8 sono elencate le 16 pubblicazioni scelte per l'analisi mentre in Tabella 9 un confronto di queste fonti numerate in base a criteri principali. Quest'ultima identifica la funzione obiettivo; importanti obiettivi come la massimizzazione dell'indipendenza della cella, costi diversi (operazionali, di modifiche delle macchine, riconfigurazione delle macchine, subfornitura, setup, giacenze ed ecc.); vincoli inclusi di sequenza operativa della macchina o parte, disponibilità di macchine dello stesso tipo, tempi di processi o utilizzo della macchina, pianificazione di processi

e processi multi periodo; la classifica del metodo utilizzato già descritte nel capitolo 2; comparazione se la tecnica è stata confrontata con altre metodologie esistenti, numero di problemi valutati / comparati, e dimensione massima della matrice macchina-parte e infine gli strumenti di attuazione adottati.

Numero	Referenza
1	(Mahdavi, Paydar, Solimanpur, & Hiedarzade, 2009)
2	(Bajestani, Rabbani, Rahimi-Vahed, & Khoshkhou, 2009)
3	(Wang, Tang, & Yung, 2010)
4	(Solimanpur, Saeedi, & Mahdavi, 2010)
5	(Saraç & Ozcelik, 2012)
6	(Papaioannou & Wilson, 2012)
7	(Kashan, Karimi, & Noktehdan, 2014)
8	(Jouzdani, Barzinpour, Shafia, & Fathian, 2014)
9	(Gómez, Ferrary, Canto dos Santos, & Chiwiacowsky, 2015)
10	(Pachayappan & Pannerselvam, 2015)
11	(Mahmoodian, Jabbarzadeh, Rezazadeh, & Barzinpour, 2017)
12	(Hazarika & Laha, 2018)
13	(Tavana, Shahdi-Pashaki, Teymourian, Santos-Arteaga, & Komaki, 2018)
14	(Bychkov & Batsyn, 2018)
15	(Danilovic & Ilic, 2019)
16	(Xue & Offodile, 2020)

Tabella 8 Elenco di pubblicazioni utilizzati per l'analisi

Nro.	Obiettivi	Vincoli			Classifica del metodo																Comparazioni						
		Funzione Obiettivo	O1	O2	O3	V1	V2	V3	V4	V5	MP	H	CA	TS	SA	ACO	GA	PSO	SS	F	NN	HY	C1	C2	C3	Metodi	Strumento
1.	Min. il numero totale di vuoti ed EE	x									.					.				x		Si	22	(40 x 100)	Zodiac, Grafics, GA, EA, SA	Lingo 8 e Matlab 7.0	
2.	Min. la variazione del carico totale della cella e la somma dei costi vari		x	x			x												x			Si	10	(9 x 10)	SPEA-II ed NSGA-II	MatLab 7.0	
3.	Efficacia delle celle e problemi di programmazione delle parti	x	x			x					.								.		x	Si	12	(25 x 20)	SS (PPO, SPT, ODD e FIFO)	C Language	
4.	Min. movimentazioni intercellulare e i vuoti	x				x			x						x							Si	8	(30 x 50)	CLASS, Minimum spanning tre, Clustering , GA ed NN	C Language	
5.	Mass. l'efficacia del gruppo (CF)	x															x					Si	15	(40 x 100)	SA, TS, GA, Ant System e Competitive NN	-	
6.	Min. movimenti intercellulari e dei costi di installazione della macchina	x	x			x					.			.							x	No	20	-	-		MatLab ™ e Xpress-MP
7.	Mass. l'efficacia del gruppo (CF)	x															.	.			x	Si	40	(37 x 53)	Zodiac, TSP-GA, GA, Graphic, PSO, Evolutionary Strategy	MatLab 74	
8.	Min movimenti inter e intracellulari, configurazioni dei percorsi e guasti delle macchine	x	x											x								Si	10	(40 x 43)	SA e Branch&Bound	MatLab	
9.	Mass. l'efficienza di produzione: min. setup ed scambi di strumenti					x									x							Si	11	-	Omega, Direct Clustering e Similarità	-	
10.	Mass. l'efficacia ed efficienza del gruppo (CF)	x	x			x			x								.				x	Si	28	(40 x 40)	Zodiac e Grafics	-	
11.	Mass. l'efficacia del gruppo (CF)	x																.		.	x	Si	30	(37 x 53)	PSO, Semi-Intelligent PSO e Intelligent PSO	MatLab 7.14	
12.	Min. movimenti intercellulari	x	x			x			x								x					Si	5	(12 x 12)	SA, TS, Fuzzy e Similarità	MatLab R2010a	
13.	Controllo di diversi costi operativi		x			x			x													Si	40	-	FF, RR and GA	Lingo 9 e MatLab R2010	
14.	Min. movimenti inter e intracellulari	x							x		x											Si	67	(40 x 100)	Multi-star Local Search	-	
15.	Mass. l'efficacia del gruppo (CF)	x									.										x	Si	35	(40 x 100)	GA, EA, ES, GA e HybridGA	C Language	
16.	Min. le movimentazioni inter e intracellulari e la somma dei costi vari	x	x						x	x	x											Si	2	(5 x 22)	Altri Programmazioni Matematiche	Lingo 8 e Surface Pro 4.0	

(I) Obiettivi

O1 = massimizzare l'indipendenza delle celle
O2 = costi diversi (operazionali, modifiche, riconfigurazioni, subfornitura, setup, giacenze, ecc.)
O3 = utilizzo e carico della macchina

(II) Vincoli

V1 = sequenza operativa di macchina o parte
V2 = disponibilità di macchine dello stesso tipo
V3 = tempi di processo / utilizzo
V4 = pianificazione di processo
V5 = processi multi periodo

(III) Classifica del metodo

MP= programmazione matematica
H= euristica
CA= analisi di cluster
TS= tabu search
SA= simulated annealing
ACO= ant colony optimization
GA= algoritmo genetico
PSO= particle swarm optimisation
SS= scatter search
F= fuzzy
NN= neural networks
HY= hybrid

(IV) Comparazioni

C1= Se il metodo è stato comparato con un altro (Si o No)
C2= numero di problemi valutati / comparati
C3= dimensione massima di (macchine x parti)

Tabella 9 Analisi delle moderne metodologie per Cell Formation

Diverse conclusioni possono essere tratte dalla Tabella 9 come:

- La maggior parte delle formulazioni propone principalmente l'obiettivo di massimizzare l'efficacia della *Cell Formation*.
- La metodologia ibrida ha ricevuto recentemente l'attenzione per la *Cell Formation* considerando costi diversi, essendo comparati con parecchi metodologie e utilizzando matrice di ampia lunghezza, la maggior parte di queste hanno come obiettivo massimizzare l'efficacia.
- Le metodologie euristiche e di analisi di cluster non presentano formulazioni negli articoli presi per questo elaborato.
- La metodologia di programmazione matematica è stata utilizzata principalmente a fini di minimizzare le movimentazioni inter e intracellulari considerando pianificazioni di processo.
- La metodologia di *Tabu Search* è stata utilizzata da una tecnica proposta in cui si consentono gli scambi di strumenti dentro le operazioni.
- Le recenti tecniche tendono ad essere confrontati con lunghi matrice di macchine – parti.
- Le tecniche moderne si orientano ad avere in conto multipli obiettivi, utilizzando metodi complessi e robusti.

Capitolo 4. Worker assignment

Il problema di assegnazione dei lavoratori, *Worker Assignment*, è generalmente definito come l'assegnazione di n tipi di attività a m lavoratori per ciascun periodo di tempo entro un orizzonte temporale specifico al fine di ottimizzare una funzione obiettivo specifica. La maggior parte degli studi relativi al problema di assegnazione dei lavoratori lo ha definito un problema di ottimizzazione lineare, che rappresenta di per sé un problema impegnativo da risolvere, anche per piccoli casi. La complessità di questo problema aumenta quando si aggiungono termini non lineari alla formulazione matematica.

La maggior parte del lavoro in quest'area si è concentrata sullo sviluppo di algoritmi e tecniche per aumentare la capacità di soluzione esistente per risolvere casi più grandi del problema di assegnazione dei lavoratori. Tuttavia, la considerazione dell'apprendimento attraverso il trasferimento di conoscenze, così come altri fattori organizzativi come la dimensionalità del sistema, la struttura produttiva e la complessità delle attività, è stata esaminata in modo molto meno approfondito.

4.1. Worker task assignment

Il problema di assegnazione delle attività del lavoratore, *Worker task assignment*, consiste nel determinare il modo migliore per assegnare la forza lavoro disponibile a diverse attività in un sistema al fine di ottenere un output di sistema specifico o ottimizzare una misura di prestazione specifica. In generale, il problema della cessione del lavoratore è stato descritto considerando la minimizzazione del costo totale della cessione come funzione obiettivo e matrice dei costi per le diverse possibilità di cessione del lavoratore. Tuttavia, spesso misure diverse dal costo sono interessanti in scenari di gestione più realistici, come produttività del sistema, bilanciamento del carico di lavoro o profitti organizzativi.

4.2. La matrice tridimensionale Part-Machine-Worker

Nonostante un gran numero di articoli pubblicati sulla CF, tutti sono limitati a una rappresentazione bidimensionale della CF e considerano parti e macchine. In una situazione di fabbrica reale, non solo il raggruppamento di macchine e parti può portare a una migliore produttività, ma anche l'assegnazione dei lavoratori ha un ruolo importante nell'utilizzo delle risorse di produzione. Un modo per aumentare la produttività è organizzare il lavoratore adatto a realizzare le parti adatte con macchine idonee. Poiché i lavoratori hanno un ruolo importante nel fare lavori sulle macchine, l'assegnazione dei lavoratori alle celle diventa un fattore cruciale per il pieno utilizzo del CM. Considerando macchine, parti e lavoratori, una matrice di incidenza tridimensionale (cubica) macchina-parte-lavoratore $R = [r_{imw}]$ può essere utilizzata per risolvere la CF. La matrice R è una matrice zero-one dell'ordine $P \times M \times W$ dove P è il numero di parti, M è il numero di macchine e W è il numero di lavoratori. Se $r_{imw} = 1$, significa che la parte i può essere elaborata sulla macchina j con il lavoratore w , 0 altrimenti.

Come si vede in Figura 6, il numero "0" è definito un vuoto nella formazione cellulare in uno spazio tridimensionale. Troppi vuoti possono portare a un minor utilizzo delle celle. Il numero "1" mostra un elemento eccezionale (EE) che si verifica nei seguenti casi:

- Una parte deve lasciare una cella per essere elaborata su una macchina assegnata ad un'altra cella.
- Una parte necessita di un lavoratore specifico che è stato assegnato a un'altra cella.

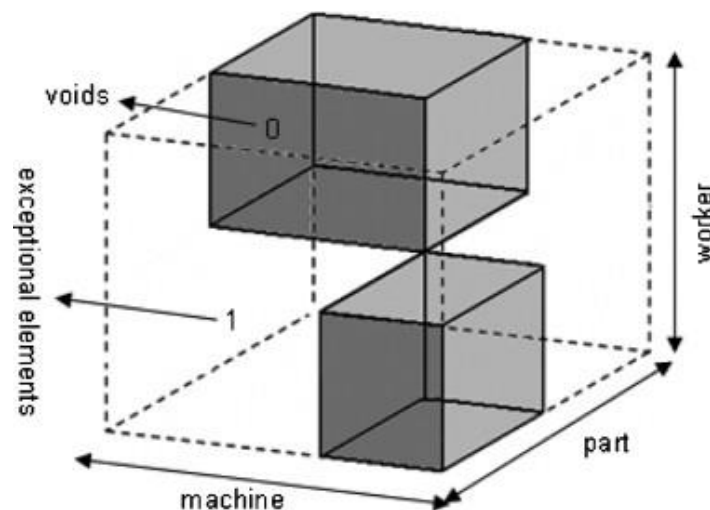


Figura 6 Matrice tridimensionale nella CF

4.2.1. Problemi umani nella Cellular Manufacturing

L'importanza delle problematiche umane è sottolineata dal fatto che ciascuna delle caratteristiche di cui sopra ha una componente umana significativa. Uno studio rapido di articoli pubblicati mostrerà al lettore che mentre la *Cellular Manufacturing* è un'area di ricerca popolare, c'è una singolare assenza di articoli che trattano l'elemento umano nella CM. Ci sono varie ragioni per questo, incluso il fatto che questi problemi sono in genere difficili da quantificare. È stato ampiamente documentato l'assenza di ricerche nel settore del collocamento dei lavoratori basate sulle loro capacità tecniche e umane. La mancanza di comprensione del lato umano nella CM può ridurre significativamente i benefici che derivano da questa modalità di produzione.

Uno dei punti principali del *Cellular Manufacturing* è la considerazione dell'essere umano dal momento in cui questo fattore ha ridotto notevolmente i benefici dell'utilità della produzione cellulare. (Bidanda, Ariyawongrat, Needy, Norman, & Tharmmaphornphilas, 2005) affermano che è importante per la corretta attuazione del CM, che si concentra sia su questioni tecniche (formazione e progettazione delle cellule) sia su questioni umane. Ma sfortunatamente, le questioni umane in genere non vengono esaminate rigorosamente tanto spesso quanto le questioni tecniche, citando:

“Mentre la produzione cellulare è un'area di ricerca popolare, vi è una singolare assenza di articoli che trattano dell'elemento umano nella Cellular Manufacturing. Ci sono varie ragioni per questo, incluso che questi problemi sono in genere difficili da quantificare. È stato ben documentato l'assenza di ricerche nel campo del collocamento dei lavoratori basato sia sulle loro capacità tecniche che umane.”

Una valutazione completa delle questioni umane rilevanti che sono applicabili al CM studiando la letteratura non solo su quest'area, ma anche nell'area generale dell'implementazione della tecnologia. Si identificano otto grandi aree di problemi umani:

1. Strategie di assegnazione dei lavoratori
2. Identificazione delle competenze
3. Formazione del lavoratore
4. Comunicazione

5. Autonomia
6. Sistema di ricompensa / compensazione
7. Lavoro di squadra
8. Gestione dei conflitti

4.3. Sviluppo del Worker Assignment nella Cell Formation

Nell'elenco sottostante sono stati indicati i principali approcci riguardanti l'introduzione del *Worker Assingment* all'interno della *Cell Formation*. I cui sono stati presi dalle riviste scientifiche.

Autore e anno	Approccio
(Min & Shin, 1993)	Crea un prototipo di GT tridimensionale. Il loro metodo inserisce il terzo fattore, operatore, nella matrice di incidenza ordinata di parti e macchine.
(Pa Rkin & Li, 1997)	Propongono un algoritmo per GT <i>N-dimensional</i> . Il loro algoritmo si concentrava su ciascuna matrice di incidenza, ordinandole separatamente.
(Li, 2003)	Mostra un metodo per risolvere il problema GT multidimensionale. Questo metodo può considerare tutte le matrici di incidenza contemporaneamente senza considerare ciascuna matrice di incidenza separatamente.
(Mahdavi, Aalaei, Paydar, & Solimanpur, 2012)	Risolve un modello matematico per la CF basato su una matrice di incidenza tridimensionale macchina-parte-lavoratore che minimizza il numero totale di elementi e vuoti eccezionali nel <i>Cellular Manufacturing</i> .
(Askin & Huang, 2001)	Formula un modello <i>Integer Programming</i> per un problema di assegnazione e formazione del lavoratore aggregato da utilizzare nella conversione di un ambiente di produzione organizzato in modo funzionale in un accordo CM.
(Suresh & Slomp, 2001)	Fornisce un modello di allenamento incrociato e collega la formazione del team al problema della <i>Cell Formation</i> .

Tabella 10 Sviluppo del Work Assignment nella Cell Formation

Autore e anno	Approccio
(Bidanda, Ariyawongrat, Needy, Norman, & Tharmmaphornphila s, 2005)	Studia una panoramica e una valutazione della vasta gamma di problemi umani coinvolti nella produzione cellulare sulla base di un'ampia revisione della letteratura. Hanno elencato otto diversi e importanti problemi umani nella Cellular Manufacturing come: strategie di assegnazione dei lavoratori, identificazione delle competenze, formazione, comunicazione, autonomia, sistemi di ricompensa / compensazione, lavoro di squadra e gestione dei conflitti.
(Aryanezhad, Deljoo, & Mirzapour Al-e-hashen, 2008)	Presenta un modello matematico per affrontare la <i>Cell Formation</i> dinamica e il problema di assegnazione dei lavoratori considerando la flessibilità di instradamento delle parti e la flessibilità della macchina e anche la promozione dei lavoratori da un livello di abilità.
(Mahdavi, Aalaei, Paydar, & Solimanpur, 2011)	Presenta un approccio basato sulla programmazione di obiettivi sfocati per risolvere un modello matematico multi-obiettivo del problema di formazione delle cellule e la pianificazione della produzione in sistemi di produzione cellulare virtuali dinamici considerando la flessibilità del lavoratore.
(Othman, Bhuiyan, & Gouw, 2012)	Considera un modello di pianificazione della forza lavoro, Workforce Planning (WP), che include alcuni aspetti umani quali capacità, formazione, personalità e motivazione dei lavoratori. Hanno presentato un modello di programmazione non lineare multi-obiettivo per ridurre al minimo i costi di assunzione, licenziamento, formazione e straordinari e minimizzare il numero di lavoratori licenziati più produttivi. Lo scopo è determinare il numero di lavoratori per ciascun tipo di lavoratore, il numero di lavoratori formati e il numero di ore di straordinario.

Tabella 10 Sviluppo del Work Assignment nella Cell Formation (continuata)

Conclusione

Questo elaborato ha presentato un'analisi della letteratura per la *Cell Formation*, concentrandosi sulle principali ricerche negli ultimi dieci anni e l'evoluzione nell'inserimento del lavoratore nelle soluzioni. Un elenco significativo, ma non esaustivo, di sedici articoli di ricerca è stato identificato e classificato sulla base di diverse metodologie impiegate. Tutte le formulazioni proposte sono state classificate e valutate sulla base di obiettivi, vincoli, metodologie di soluzione utilizzate, risultati confrontati ottenuti e tecniche di soluzione applicate e per la assegnazione del lavoratore sono descritte gli approcci sviluppati di dieci principali ricerche. La ricerca sulla *Cell Formation* è un'area attiva con molti articoli pubblicati; in questa recensione si applicano serie di elementi inclusi nell'agenda di ricerca proposta da (Papaioannou & Wilson, 2010) come la classifica di obiettivi in massimizzare l'indipendenza delle celle, costi diversi e l'utilizzo / carico della macchina; i vincoli si sequenza operativa, disponibilità di macchine, tempi di processo, pianificazione e prezzi multiperiodo. D'altra parte, (Bidanda, Ariyawongrat, Needy, Norman, & Tharmmaphornphilas, 2005) sottolinea la scarsa quantità di articoli che trattano la risorsa umana nella *Cell Formation*, avendo caratteristiche importanti nel contesto di manifattura, per i quali sono state descritte le principali ricerche che aggiungono più realismo nei modelli.

I metodi recenti si concentrano negli approcci ibridi che sono strumenti potenti per problemi complessi quello indica che i ricercatori dovrebbero concentrarsi maggiormente su più obiettivi anziché su singoli obiettivi.

Bibliografia

- Aljaber, N., Wonjang, B., & Chen, C.-L. (1997). A tabu search approach to the cell formation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 32 (1), 169-185. doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(96\)00208-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(96)00208-2)
- Arizono, I., Kato, M., Yamamoto, A., & Ohta, H. (1995). A new stochastic neural network model and its application to grouping parts and tools in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 33 (6), 1535-1548. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549508930227>
- Aryanezhad, M., Deljoo, V., & Mirzapour Al-e-hashen, S. (2008). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 329-342. doi:[10.1007/s00170-008-1479-4](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1479-4)
- Askin, R., & Chiu, K. (2007). A graph partitioning procedure for machine assignment and cell formation in group technology. *International Journal of Production Research*, 28 (8), 1555-1572.
- Askin, R., & Huang, Y. (2001). Forming effective worker teams for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 39(11), 2431-2451. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540110040466>
- Bajestani, M., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A., & Khoshkhou, G. (2009). A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem. *Computers & Operations Research*, 36(3), 777-794. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.10.026>
- Ballaku, A. (1985). An investigation of part family/machine group formation in designing a cellular manufacturing system. Unpublished PhD thesis. *University of Wisconsin-Madison*.
- Bidanda, B., Ariyawongrat, P., Needy, K., Norman, B., & Tharmmaphornphilas, W. (2005). Human related issues in manufacturing cell design, implementation, and operation: a

- review and survey. *Computers & Industrial Engineering*, 48 (3), 507-523.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2003.03.002>
- Boctor, F. (1991). A linear formulation of the machine-part cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 29 (2), 343-356. doi:[doi:10.1080/00207549108930075](https://doi.org/10.1080/00207549108930075)
- Brown, E., & Sumichrast, R. (2001). CF-GGA: A grouping genetic algorithm for the cell formation problem. *International Journal of Production*, 39(16), 3651-3669.
doi:<https://doi.org/10.1080/00207540110068781>
- Burbidge, J. (1992). Change to group technology: process organization is obsolete. *International Journal of Production Research*, 30 (5), 1209-1219.
doi:<https://doi.org/10.1080/00207549208942951>
- Burbidge, J. L. (1971). Production flow analysis for planning group technology. *Production Engineer*, 50 (4.5), 139-152.
- Bychkov, I., & Batsyn, M. (2018). An efficient exact model for the cell formation problem with a variable number of production cells. *Computers & Operations Research*, 91, 112-120.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.009>
- Chan, H., & Milner, D. (1982). Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing Systems*, 1 (1), 65-75.
- Chan, W., Chan, C., & Ip, W. (2003). A heuristic algorithm for machine assignment in cellular layout. *Computers & Industrial Engineering*, 44 (1), 49-73.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00184-5)
- Chandrasekharan, M., & Rajagopalan, R. (1986). MODROC: An extension of rank order clustering for group technology. *International Journal of Production Research*, 24 (5), 1221-1233.
- Chandrasekharan, M., & Rajagopalan, R. (1986). ZODIAC: An algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells. *International Journal of Production Research*, 25 (6), 835-850. doi:<https://doi.org/10.1080/00207548708919880>

- Chen, D.-S., Chen, H.-C., & Park, J.-M. (1996). An improved ART neural net for machine cell formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(1-2), 1-6. doi:[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02457-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02457-0)
- Chu, C.-H. (1993). Manufacturing cell formation by competitive learning. *International Journal of Production Research*, 31 (4), 829-843. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549308956760>
- Chu, C.-H., & Hayya, J. (1991). A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation. *International Journal of Production Research*, 29 (7), 1475-1487. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549108948024>
- Clerc, M. (2000). Discrete Particle Swarm Optimization, illustrated by the Traveling Salesman Problem. In S. i. Computing, *New Optimization Techniques in Ingeneering* (pp. 219-239). doi:https://doi.org/10.1007/978-3-540-39930-8_8
- Corne, D., Jerram, N. R., Knowles, J., & Oates, J. (2001). PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization. *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/239062948>
- Corne, D., Knowles, J., & Oates, M. (2000). Proceedings of sixth international conference on parallel problem solving from nature. In B. H. Springer, *The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization* (pp. 839-848). doi:https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_82
- Danilovic, M., & Ilic, O. (2019). A novel hybrid algorithm for manufacturing cell formation problem. *Expert Systems with Applications*, 135, 327-350. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.06.019>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. doi:<https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dobado, D., Lozano, S., Bueno, J., & Larrañeta, J. (2002). Cell formation using a Fuzzy Min-Max neural network. *International Journal of Production Research*, 40(1), 93-107. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540110073064>

- Dorigo, M., & Di Caro, G. (1999). *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic*. Maidenhead, UK: McGraw-Hill Ltd.
doi:<https://homes.luddy.indiana.edu/jbollen/I501F13/readings/dorigo99ant.pdf>
- Eglese, R. (1990). Simulated annealing: A tool for operational research. *European Journal of Operational Research*, 46 (3), 271-281. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90001-R](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90001-R)
- Ferreira Ribeiro, J., & Pradin, B. (1993). A methodology for cellular manufacturing design. *International Journal of Production Research*, 31 (1), 235-250.
- Fonseca, C., & Fleming, P. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *IEE colloquium on 'genetic algorithms for control systems engineering'*.
doi:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.48.9077&rep=rep1&type=pdf>
- Glover, F. (1977). Heuristics for Integer Programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1), 156-166. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- Gómez, A., Ferrary, F., Canto dos Santos, J., & Chiwiacowsky, L. (2015). Cell formation problem: An multithreading Tabu search for setup time optimization for limited machine magazines: A New Solution For A Classical Problem. *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*.
doi:<https://doi.org/10.5220/0005063403320339>
- Gonçalves, J., & Resende, M. (2004). An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation. *Computers & Industrial Engineering*, 47(2-3), 247-273.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.07.003>
- Hajela, P., & Lin, C.-Y. (1992). Genetic search strategies in multicriterion optimal design. *Structural optimization*, 4, 99-107. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01759923>
- Hazarika, M., & Laha, D. (2018). Genetic Algorithm approach for Machine Cell Formation with Alternative Routings. *International Conference on Processing of Materials, Minerals and Energy*, 5(1), 1766-1775. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.274>

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press. Retrieved from <https://mitpress.mit.edu/books/adaptation-natural-and-artificial-systems>
- Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computation, IEEE world congress on computational intelligence*. doi:<https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.350037>
- Ibrahim, S., Jarboui, B., & Rebaï, A. (2012). Problem, An Estimation of Distribution Algorithm for Part Cell Formation. In V. Modrák, & R. Pandian, *Operations Management Research and Cellular Manufacturing Systems: Innovative Methods and Approaches* (pp. 164-188). Advisory Board. doi:10.4018/978-1-61350-047-7.ch008
- Joines, J., Culbreth, C., & King, R. (1996). Manufacturing cell design: an integer programming model employing genetic algorithms. *IIE Transactions*, 28(1), 69-85. doi:<https://doi.org/10.1080/07408179608966253>
- Jouzani, J., Barzinpour, F., Shafia, M., & Fathian, M. (2014). Applying simulated annealing to a generalized cell formation problem considering alternative routings and machine reliability. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 31, 1450021 (26 pages) . doi:<https://doi.org/10.1142/S0217595914500213>
- Kao, Y., & Moon, Y. (1991). A unified group technology implementation using the backpropagation learning rule of neural networks. *Computers & Industrial Engineering*, 20(4), 425-437. doi:[https://doi.org/10.1016/0360-8352\(91\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0360-8352(91)90015-X)
- Kaparthi, S., & Suresh, N. (1992). Machine-component cell formation in group technology: a neural network approach. *International Journal of Production Research*, 30 (6), 1353-1367. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549208942961>
- Kashan, A., Karimi, B., & Noktehdan, A. (2014). A novel discrete particle swarm optimization algorithm for the manufacturing cell formation problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73, 1543-1556. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5906-4>

- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, 1942-8.
doi:<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kernighan, B., & Lin, S. (1970). An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *The Bell System Technical Journal*, 49 (2), 291-307.
- Kiang, M. (2001). Extending the Kohonen self-organizing map networks for clustering analysis. *Computational Statistics & Data Analysis*, 38(2), 161-180.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(01\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00040-8)
- Kim, C., Baek, J.-G., & Baek, J.-K. (2004). A two-phase heuristic algorithm for cell formation problems considering alternative part routes and machine sequences. *International Journal of Production Research*, 42 (18), 3911-3927.
doi:<https://doi.org/10.1080/00207540410001704078>
- King, J. (1980). Machine-component group formation in group technology. *Omega: The International Journal of Management Science*, 8 (2), 193-199.
- King, J. (1980). Machine-component grouping in production flow analysis: An approach using rank order clustering algorithm. *International Journal of Production Research*, 18 (2), 213-232.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *American Association for the Advancement of Science*, 220 (4598), 671-680.
doi:[10.1126/science.220.4598.671](https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671)
- Knowles, J., & Corne, D. (2000). Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy. *Evolutionary Computation*, 8(2), 149-172.
doi:<https://doi.org/10.1162/106365600568167>
- Kumar, K., Kuisak, A., & Vanelli, A. (1986). Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 24(3), 387-397.
doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90032-9)
- Kusiak, A. (1987). The generalized group technology concept. *International Journal of Production Research*, 25 (4), 561-569. doi:<https://doi.org/10.1080/00207548708919861>

- Kusiak, A., & Chung, Y. (1991). GT/ART: Using neural networks to form machine cells. *Manufacturing Review*, 44 (4), 293-301.
- Lee, H., Malavé, C., & Ramachandran, S. (1992). A self-organizing neural network approach for the design of cellular manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 325-332. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01577273>
- Lee, K.-M., Yamakawa, T., & Lee, K.-M. (1997). Machine-part grouping for cellular manufacturing systems: a neural network approach. *1st International Conference of*, 2, 575-580. doi:<https://doi.org/10.1109/KES.1997.619439>
- Li, M.-L. (2003). The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology. *International Journal of Production Economics*, 86(2), 121-131. doi:[https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00010-0)
- Lu, H., & Yen, G. (2003). Rank-density-based multiobjective genetic algorithm and benchmark test function study. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(4), 325-343. doi:<https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.812220>
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 1 (14), 281-297.
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M., & Solimanpur, M. (2011). Multi-objective cell formation and production planning in dynamic virtual cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 49(21), 6517-6537. doi:<https://doi.org/10.1080/00207543.2010.524902>
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M., & Solimanpur, M. (2012). A new mathematical model for integrating all incidence matrices in multi-dimensional cellular manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 214-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.007>
- Mahdavi, I., Kaushal, O., & Chandra, M. (2001). Graph-neural network approach in cellular manufacturing on the basis of a binary system. *International Journal of Production Research*, 39 (13), 2913-2922. doi:<https://doi.org/10.1080/0020754011005914>

- Mahdavi, I., Paydar, M., Solimanpur, M., & Hiedarzade, A. (2009). Genetic algorithm approach for solving a cell formation problem in cellular manufacturing. *Expert Systems with Applications*, 32(3 (2)), 6598-6604. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.054>
- Mahmoodian, V., Jabbarzadeh, A., Rezazadeh, H., & Barzinpour, F. (2017). A novel intelligent particle swarm optimization algorithm for solving cell formation problem. *Neural Computing and Application*, 31, 801-815. doi:<https://doi.org/10.1007/s00521-017-3020-x>
- McAuley, J. (1972). Machine grouping for efficient production. *Production Engineering*, 51 (2), 53-57.
- Min, H., & Shin, D. (1993). Simultaneous formation of machine and human cells in group technology: a multiple objective approach. *International Journal of Production Research*, 31(10), 2307-2318. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549308956859>
- Modrák, V., & Semanco, P. (2012). Developments in Modern Operations Management and Cellular Manufacturing. In V. Modrák, & R. Pandian , *Operations Managment Research and Cellular Manufacturing Systems. Innovative Methods and Approaches* (pp. 1-20). Advisory Board. doi:10.4018/978-1-61350-047-7.ch001
- Moon, Y. (1992). Establishment of a neurocomputing model for part family/machine group identification. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 173-182. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01477600>
- Mosier, C. (1989). An experiment investigating the application of clustering procedures and similarity coefficients to the GT machine cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 27 (10), 1811-1835.
- Mukattash, A., Adil, M., & Tahboub, K. (2002). Heuristic approaches for part assignment in cell formation. *Computers & Industrial Engineering*, 42 (2-4), 329-341. doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00020-7)
- Murata, T., & Ishibuchi, H. (1995). Application of Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA) Optimization in Machining Processes. In *Optimization of Manufacturing Processes-Springer Series in Advanced Manufacturing* (pp. 185-199). Perth - Australia. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-19638-7_8

- Offodile, O., Abraham Mehrez, & John Grznar. (1994). Cellular Manufacturing: A Taxonomic Review Framework. *Journal of Manufacturing System*, 13 (3), 196-220.
- Onwubolu, G., & Mutingi, M. (2001). A genetic algorithm approach to cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 39(1-2), 125-144. doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(00\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00074-7)
- Othman, M., Bhuiyan, N., & Gouw, G. (2012). Integrating workers' differences into workforce planning. *Computers and Industrial Engineering*, 63(4), 1096-1106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.06.015>
- Pa Rkin, R. E., & Li, M.-L. (1997). The multi-dimensional aspects of a group technology algorithm. *International Journal of Production Research*, 35(8), 2345-2358. doi:<https://doi.org/10.1080/002075497194886>
- Pachayappan, M., & Pannerselvam, R. (2015). Hybrid Genetic Algorithm for Machine-Component Cell Formation. *Computer Science & Communications*, 7(3), 107-122. doi:<http://dx.doi.org/10.4236/iim.2015.73010>
- Papaioannou, G., & Wilson, J. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 206 (3), 509-521. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.020>
- Papaioannou, G., & Wilson, J. M. (2012). A tabu search algorithm for the cell formation problem with part machine sequencing. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 37(2), 97-127. doi:<https://doi.org/10.2478/v10209-011-0008-7>
- Purcheck, G. (1974). Combinatorial Grouping— A Lattice-Theoretic Method for the Design of Manufacturing Systems. *Journal of Cybernetics*, 4(3), 27-60. doi:<https://doi.org/10.1080/01969727408621680>
- Rajagopalan, R., & Batra, J. (1975). Design of cellular production systems A graph-theoretic approach. *International Journal of Production Research*, 13 (6), 567-579.

- Salam, A., Ahmad, I., & Al-Madani, S. (2002). Particle swarm optimization for task assignment problem. *Microprocessors and Microsystems*, 26(8), 363-371. doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-9331\(02\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0141-9331(02)00053-4)
- Sankaran, S., & Rodin, E. (1990). Multiple objective decision making approach to cell formation: A goal programming model. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(9), 71-81. doi:[https://doi.org/10.1016/0895-7177\(90\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90079-3)
- Saraç, T., & Ozcelik, F. (2012). A genetic algorithm with proper parameters for manufacturing cell formation problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 1047-1061. doi:<https://doi.org/10.1007/s10845-010-0446-8>
- Schaffer, J. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proceedings of the international conference on genetic algorithm and their applications*, 93-101.
- Seifoddini, H., & Wolfe, P. (1986). Application of the similarity coefficient method in group technology. *IIE Transactions*, 18 (3), 271-277.
- Selim, M. S., Askin, R.G., Vakharia, A. J. (1998). Cell Formation in group technology: review evaluation and directions for future research. *Computers and Industrial Engineering*, 34 (1), 3-20. doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00147-2)
- Soleymanpour, M., Vrat, P., & Shankar, R. (2002). A transiently chaotic neural network approach to the design of cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 40(10), 2225-2244. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540210122284>
- Solimanpur, M., Saeedi, S., & Mahdavi, I. (2010). Solving cell formation problem in cellular manufacturing using ant-colony-based optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 1135-1144. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2587-5>
- Souilah, A. (1995). Simulated annealing for manufacturing systems layout design. *European Journal of Operational Research*, 82 (3), 592-614. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0336-V](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0336-V)

- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3), 221-248. doi:<https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221>
- Srinivasan, G., & Narendran, T. (1990). GRAFICS: a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. *International Journal of Production Research*, 29(3), 463-478. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549108930083>
- Suresh, N., & Slomp, J. (2001). A multi-objective procedure for labour assignments and grouping in capacitated cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 39(18), 4103-4131. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540110072966>
- Talbi, E.-G. (2002). A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8, 541-564. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1016540724870>
- Tavana, M., Shahdi-Pashaki, S., Teymourian, E., Santos-Arteaga, F., & Komaki, M. (2018). A discrete cuckoo optimization algorithm for consolidation in cloud computing. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 495-511. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.001>
- Uddin, M., & Shanker, K. (2002). Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm. *International Journal of Production*, 76(3), 219-228. doi:[https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00164-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00164-5)
- Vakharia, A., & Chang, Y. (1997). Cell formation in group technology: A combinatorial search approach. *International Journal of Production Research*, 35 (7), 2025-2044. doi:<https://doi.org/10.1080/002075497195056>
- Venugopal, V., & Narendran, T. (1994). Machine-cell formation through neural network models. *International Journal of Production Research*, 32 (9), 2105-2116. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549408957061>
- Venugopal, V., & Narendran, T. T. (1992). A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 22(4), 469-480. doi:[https://doi.org/10.1016/0360-8352\(92\)90022-C](https://doi.org/10.1016/0360-8352(92)90022-C)

- Vohra, T., Chen, D.-S., Chang, J., & Chen, H.-C. (1990). A network approach to cell formation in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 28 (11), 2075-2084. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549008942854>
- Wang, X., Tang, J., & Yung, K.-I. (2010). A scatter search approach with dispatching rules for a joint decision of cell formation and parts scheduling in batches. *International Journal of Production Research*, 48(12), 3513-3534. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540902922828>
- Wemmerlov, U., Johnson, & D.J. (1997). Cellular manufacturing at 46 user plants: implementation experiences and performance improvements. *International Journal of Production Research*, 35 (1), 29-49.
- William, M., Schweitzer, P., & White, T. (1972). Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique. *Operations Research*, 20 (5), 925-1073.
- Won, Y., & Lee, K. (2004). Modified p-median approach for efficient GT cell formation. *Computers & Industrial Engineering*, 46 (3), 495-510. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.01.010>
- Wu, N., & Salvendy, G. (1993). A modified network approach for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 31 (6), 1409-1421. doi:<https://doi.org/10.1080/00207549308956798>
- Xu, H., & Wang, H.-P. (1989). Part family formation for GT applications based on fuzzy mathematics. *International Journal of Production Research*, 27 (9), 1637-1651. doi:<https://doi.org/10.1080/00207548908942644>
- Xue, G., & Offodile, O. (2020). Integrated optimization of dynamic cell formation and hierarchical production planning problems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106155 (. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106155>
- Zhao, C., & Zhiming, W. (2000). A genetic algorithm for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives. *International Journal of Production*, 38(2), 385-395. doi:<https://doi.org/10.1080/002075400189473>

- Zitzler, E. (1999). Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications. Unpublished Thesis for Doctoral degree. *Swiss Federal Institute of Technology Zurich*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.433.2828&rep=rep1&type=pdf>
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 257-271. doi:<https://doi.org/10.1109/4235.797969>
- Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *Swiss Federal Institute Technology*. doi:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.22.4617>
- Zolfagha Ri, S., & Liang, M. (1997). An objective-guided ortho-synapse Hopfield network approach to machine grouping problems. *International Journal of Production Research*, 35(10), 2773-2792. doi:<https://doi.org/10.1080/002075497194444>