

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA GESTIONALE**

**ANALISI DEL PROBLEMA DELL'ASSEGNAZIONE
DI TASK OPZIONALI A STAZIONI IN UN PROCESSO
DI ASSEMBLAGGIO MEDIANTE ALGORITMI DI
CLUSTERING: CASO STUDIO**

TESI DI LAUREA IN LOGISTICA INDUSTRIALE

RELATORE

Chiar.mo Prof. Alberto Regattieri

PRESENTATA DA

Matteo Tozzola

CORRELATORE

Dott. Francesco Pilati

III sessione VI appello A.A. 2017/2018

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. MODELLO DI OTTIMIZZAZIONE ALBP	5
2.1. MODELLO S-ALBP.....	5
2.2. MODELLO S-ALBP CONSIDERANDO TASK OPZIONALI.....	7
3. IL PROBLEMA DEL BILANCIAMENTO CON TASK OPZIONALI.....	11
4. CLUSTERING DEI TASK OPZIONALI.....	13
4.1. INDICE DI SIMILARITÀ	13
4.2. ALGORITMO DI CLUSTERING.....	22
4.3. VALORE DI SIMILARITÀ DI TAGLIO	24
5. ASSEGNAMENTO DEI TASK OPZIONALI ALLE STAZIONI – BILANCIAMENTO DELLA LINEA DI ASSEMBLAGGIO	29
5.1. BILANCIAMENTO MEDIANTE FUNZIONE DI OTTIMIZZAZIONE	31
6. PROCEDURA STANDARD DI ASSEGNAMENTO TASK OPZIONALI.....	35
7. CASO STUDIO	37
7.1. ANALISI PRELIMINARE.....	38
7.2. CALCOLO DEGLI INDICI X_{hi} , Y_{hi} , Z_{hi} , T_{hi}	40
7.3. CALCOLO DEGLI INDICI DI SIMILARITÀ S_{hi}	45
7.4. INDIVIDUAZIONE DEL VALORE DI TAGLIO	46
7.5. ALGORITMO UPGMA.....	47
7.6. BILANCIAMENTO LINEA DI ASSEMBLAGGIO	51
8. CLUSTER ANALYSIS.....	53
8.1. INDICE DI IMPIEGO TOTALE.....	53
8.2. DEVIAZIONI PERCENTUALI DALLA FREQUENZA MEDIA E DAL TEMPO MEDIO	54
9. CONCLUSIONI	60
10. BIBLIOGRAFIA	62

1. INTRODUZIONE

Il problema del bilanciamento di una linea di assemblaggio manuale, definito nel seguito mediante l'acronimo ALBP, rappresenta una delle maggiori sfide cui è sottoposta l'industria attuale. In particolare, la tendenza verso i principi della lean manufacturing rende necessario focalizzare l'attenzione, da parte delle aziende, sulla minimizzazione di due aspetti fondamentali di un processo di assemblaggio (M. Bortolini, M. Gamberi, M. Faccio, F. Pilati, 2017):

- il takt time;
- il rischio ergonomico.

Riveste una particolare rilevanza la definizione di un tempo massimo di cadenza della linea, in un'ottica pull, per governare in maniera efficiente e responsiva il ciclo produttivo. Conseguentemente, si pone il problema di quantificare il carico di lavoro assegnato ad una singola stazione di assemblaggio, coincidente, spesso, con il carico di lavoro assegnato al singolo operatore. La finalità è duplice:

- non sovraccaricare un operatore, allo scopo di permettere il costante rispetto del takt time stabilito per la linea e, al contempo, adeguarsi alle norme di sicurezza vigenti per quanto concerne il rischio ergonomico;
- non sottoutilizzare un operatore, evitando idle time e tempi di ozio dannosi per l'azienda dal punto di vista economico.

Il problema di ALBP tende quindi a individuare un bilanciamento ottimale della linea di assemblaggio, nel rispetto dei vincoli predefiniti.

La crescente customizzazione del prodotto emersa in tempi recenti ha tuttavia complicato la definizione del processo di assemblaggio. Se agli albori dei processi industriali la produzione era maggiormente rivolta alla serializzazione del prodotto, con la diffusione del Toyota Production System l'attenzione della produzione è tesa a soddisfare le specifiche esigenze e richieste del singolo cliente. Ciò si traduce nella necessità, da parte del responsabile del processo produttivo, di identificare quali siano i compiti che devono essere necessariamente svolti al fine del completamento del prodotto e, al contrario, quali sono i compiti da svolgere per soddisfare l'ordine specifico e che, di conseguenza, saranno richiesti solo per una certa percentuale degli ordini totali. Questa distinzione rende maggiormente complesso affrontare il problema del bilanciamento nella realtà, in quanto pur esistendo modelli appositi per supportare

le decisioni afferenti al bilanciamento della linea, quali ad esempio il metodo di Kottas-Lau, essi non considerano l'esistenza di task opzionali, che invece, come detto, rappresentano una quota crescente del portafoglio di compiti delle aziende manifatturiere.

In questa sede verrà quindi analizzato il problema di come includere i cosiddetti task opzionali all'interno del processo decisionale di bilanciamento di una linea di assemblaggio manuale, proponendo un modello algebrico basato sul clustering di detti task secondo un algoritmo considerante la similarità tra coppie di tali optional. Si andrà poi a valutare la bontà del modello proposto attraverso un caso pratico legato al settore automotive. Infine, si fornirà una procedura standard per approcciare un problema di questo tipo, volta a riassumere lo studio svolto nella presente tesi.

Essendo il problema presentato in questo elaborato affrontato, sotto punti di vista paralleli e complementari, anche da altri due laureandi in ingegneria, si rimanda, per un completo studio del problema e delle possibili soluzioni, alle tesi correlate evidenziate nell'apposita sezione della bibliografia.

2. MODELLO DI OTTIMIZZAZIONE ALBP

Come analisi preliminare del problema, si riporta la generica definizione di un modello di ottimizzazione di tipo ALBP, in particolare la versione più semplificata – e quindi non propriamente realistica – afferente alla produzione, lungo la linea di assemblaggio, di un singolo modello relativo ad uno specifico prodotto. Questa situazione, cui ci si riferisce come Single-Model Assembly Line Balancing Problem (Scholl, 1995), è, come detto, ragionevolmente irrealistica all'interno del comparto industriale attuale, in cui la varietà di prodotti lavorati da una determinata linea di assemblaggio è quasi sempre elevata, trattandosi di linee generalmente mixed- o multi-model.

Tuttavia, la costruzione di un modello di ottimizzazione derivante dall'analisi di una linea di assemblaggio multiprodotto non può prescindere dall'analisi di una linea monoprodotto, essendo la prima assimilabile a più linee di assemblaggio single-model che lavorano più modelli in sequenza impiegando le stesse risorse, in termini sia di attrezzature che di tempi.

2.1. Modello S-ALBP

La versione più basilica di un S-ALBP può essere costruita definendo m task ($i = 1, \dots, m$), da lavorare su una linea di assemblaggio composta da n stazioni ($j = 1, \dots, n$). Tale linea è cadenzata definendo uno specifico tempo ciclo, cui fanno riferimento tempi deterministici t_i relativi ai task da eseguire. Inoltre, come ulteriori ipotesi semplificative, si possono identificare i soli vincoli di precedenza tra task come restrizioni relative all'assegnamento task-stazione. La linea viene supposta lineare e one-sided, e con tutte le stazioni egualmente attrezzate, in maniera da non influenzare l'assegnamento e il conseguente bilanciamento con variabili relative alla tecnologia di cui dispongono le singole stazioni. In conseguenza di ciò, gli unici vincoli cui la soluzione di un problema di questo tipo deve sottostare sono il tempo ciclo e le precedenze tecnologiche definite dal diagramma delle precedenze costruito per il prodotto da realizzare.

La formulazione più semplice di un problema di questo tipo è stata proposta da Patterson e Albracht (1975). Essa considera tutti e soli i vincoli sopra riportati, definendo alcuni parametri e insiemi di utilità.

In particolare, vengono indicati come E_i e L_i rispettivamente la prima e l'ultima stazione cui il task i può essere assegnato, tenendo in considerazione sia il diagramma delle precedenze, sia il

tempo ciclo, sia il numero totale delle stazioni da cui è composta la linea. Viene quindi definito $SI = [E_i, L_i]$ l'intervallo di stazioni cui può essere assegnato un task nel rispetto di tali considerazioni. Considerando questi intervalli, uno per ogni task da realizzare, si definisce l'insieme B_j di task potenzialmente assegnabili alla j -esima stazione.

Introducendo le variabili binarie

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se il task } i \text{ è assegnato alla stazione } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

per ogni i e per ogni j appartenente a SI_i , è possibile definire un modello S-ALBP come

$$\sum_{j \in SI_i} x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i \in B_j} t_i \cdot x_{ij} \leq c, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j \in SI_h} j \cdot x_{hj} \leq \sum_{j \in SI_i} j \cdot x_{ij}, \quad (h, i) \in A, L_h \geq E_i \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad i = 1, \dots, m, \quad j \in SI_i$$

individuando A come l'insieme composto da coppie di task direttamente connessi da precedenze tecnologiche deducibili dai diagrammi.

I vincoli (1) sono i vincoli di assegnamento task-stazione. I vincoli (2) rappresentano la non eccedenza del tempo ciclo c stabilito per la linea cadenzata. I vincoli (3) rappresentano i vincoli di precedenza.

La funzione obiettivo da ottimizzare è individuabile secondo criteri differenti. Si può pensare di minimizzare il numero di stazioni impiegate, oppure di minimizzare il tempo ciclo dato un certo numero di stazioni.

2.2. Modello S-ALBP considerando task opzionali

Il modello S-ALBP costruito nel paragrafo precedente è, come detto, una grossa semplificazione della realtà industriale. Di conseguenza, può essere utile adattarlo ad una situazione che consideri anche la presenza nel processo produttivo di task opzionali da eseguire in fase di assemblaggio.

In tal modo si tende a partizionare l'insieme degli m task in (almeno) due parti. Escludendo i task mutuamente esclusivi (i cosiddetti task XOR), che rappresentano sottogruppi di task di cui uno solo, volta per volta, va eseguito, si possono ricondurre con buona approssimazione tutti i task costituenti un processo di assemblaggio in due sottoinsiemi:

- i task da eseguire sempre, obbligatori ai fini del completamento del processo produttivo. Essi, nel contesto analizzato, corrispondono ad operazioni di montaggio da eseguire necessariamente e rappresentano la struttura portante dell'intero processo. Idealmente, se anche solo uno di questi task non venisse eseguito, non si potrebbero eseguire le fasi successive, in quanto verrebbe bypassato un punto nel diagramma delle precedenze e in tal modo i task immediatamente a valle non potrebbero essere inizializzati, innescando un processo a catena. Nel seguito, questo sottoinsieme di task viene etichettato con la dicitura COST.
- i task da eseguire solo in presenza di precise condizioni. Tale sottoinsieme di task, indicato come OPT, rappresenta le operazioni di assemblaggio opzionali, da includere nel processo produttivo solo se esplicitamente richieste dall'ordine corrispondente al prodotto che si sta assemblando. Si noti che, in quest'ottica, si può parlare di task opzionali se, in un insieme di x commesse, anche solo una non richiede una precisa operazione di assemblaggio. Tale operazione verrà inserita in questo insieme di task opzionali e andrà considerata tale anche per le restanti $(x-1)$ commesse. Quindi un task viene definito obbligatorio se viene montato il 100% delle volte sul totale degli ordini esauriti. Se la percentuale di incidenza dell'assemblaggio di un determinato componente risultasse inferiore al 100%, allora il task corrispondente all'operazione analizzata andrà identificato come opzionale. Si può comunque facilmente osservare come, in un normale processo industriale, se su 10.000 ordini 9.999 richiedono l'assemblaggio di uno specifico componente, allora con ragionevole certezza anche il decimillesimo ordine richiederà l'esecuzione di tale operazione.

Questa partizione dell'insieme dei task disponibili in un processo industriale porta ad una prima grande conseguenza sul modello S-ALBP proposto nel paragrafo precedente. In particolare, decadono i vincoli di assegnamento (1) per i task opzionali, in quanto essi come detto non sono da eseguire necessariamente e quindi non è obbligatorio assegnarli ad una specifica stazione: tale assegnamento andrà effettuato solo se uno specifico ordine richiede l'esecuzione del task opzionale.

Già questo vincolo rappresenta una corposa eccezione al modello S-ALBP riportato in precedenza, e, in presenza di un'alta variabilità nella richiesta del singolo OPT da ordine a ordine, può rendere difficoltosa la modellazione di un problema di ottimizzazione apposito.

Per ridurre la complessità di modellazione di un modello S-ALBP con OPT è possibile considerare la creazione di alcuni cluster contenenti specifici OPT corrispondenti a task opzionali. A questi cluster potranno essere successivamente assegnate determinate stazioni sulle quali è possibile lavorare uno specifico OPT, escludendo l'assegnamento di stazioni di lavoro sulle quali, a causa di determinati fattori quali, ad esempio, le apparecchiature equipaggiate, non sarà possibile eseguire l'assemblaggio di alcuni o tutti gli OPT assegnati ad uno specifico cluster.

Per elaborare un modello molto semplice di bilanciamento della linea di assemblaggio che consideri anche l'assegnamento di task opzionali è stata considerata una linea di assemblaggio di tipo single-model, con l'ipotesi aggiuntiva di avere la possibilità di inserire buffer interoperazionali a valle di ogni stazione per rendere la linea asincrona.

Mantenendo la definizione di task e stazioni come nel modello base, si definisce C il numero di cluster cui vengono assegnati gli OPT e le stazioni ($c = 1, \dots, C$). Per evitare la creazione di cluster contenenti un numero troppo elevato di possibili stazioni assegnabili, viene definito un upper bound nel numero di stazioni assegnate al cluster, indicato con U_c . Inoltre, viene regolata la capacità massima dei buffer interoperazionali, supponendola non costante e pari a B_j .

Il modello S-ALBP corrispondente richiede la definizione di altre variabili, binarie e intere, in aggiunta alla precedente:

$$y_{ic} = \begin{cases} 1, & \text{se il task opzionale } i \text{ è assegnato al cluster } c \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} ;$$

$$z_{jc} = \begin{cases} 1, & \text{se la stazione } j \text{ lavora task del cluster } c \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} ;$$

$$A_j = \begin{cases} 1, & \text{se la stazione } j \text{ è impiegata} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} ;$$

$b_j = \text{capacità utilizzata del buffer a valle della stazione } j;$

$N_{jc} = \text{numero di stazioni assegnate alle lavorazioni nel cluster } c.$

e intende trovare il

$$\min \sum_{j=1}^n A_j \cdot j$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in COST \quad (4)$$

$$\sum_{c=1}^c y_{ic} \leq 1 \quad \forall i \in OPT \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^c z_{jc} \cdot A_j \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n N_{jc} \cdot A_j \leq U_c \quad c = 1, \dots, C \quad (7)$$

$$A_j \leq b_j \leq B_j \cdot A_j \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$x_{ij}, y_{ic}, z_{jc}, A_j \in \{0; 1\}$$

$$b_j, N_{jc} \text{ intere}$$

I vincoli (4) sono corrispondenti ai vincoli (1) del modello precedente ma considerano solo i task obbligatori. I vincoli (5) assegnano i task opzionali ai cluster. I vincoli (6) garantiscono la lavorazione dei task appartenenti ad un cluster solo ad un ristretto gruppo di stazioni. I vincoli (7) limitano il numero di stazioni che è possibile assegnare ad un cluster di modo da eliminare una soluzione ammissibile dell'assegnazione di tutte le stazioni ad un singolo cluster. I vincoli (8) delimitano l'utilizzo in capacità del buffer in relazione alla sua dimensione effettiva. Per

soddisfare i vincoli di precedenza che continuano a sussistere, vanno inseriti nel modello anche i vincoli (3) del modello precedente.

3. IL PROBLEMA DEL BILANCIAMENTO CON TASK OPZIONALI

Definito un modello di ottimizzazione raw, in cui comunque sono state contemplate ipotesi semplificative importanti e non si è tenuto conto di diversi altri aspetti che incidono notevolmente sul bilanciamento di una linea, quali, ad esempio, il tempo ciclo e l'efficienza assoluta della linea, esso ha evidenziato comunque un aspetto molto importante del problema del bilanciamento in presenza di task opzionali: il problema, non banale, di come assegnare tali task opzionali alle diverse stazioni può essere affrontato a partire dalla costruzione di cluster, ovvero di raggruppamenti di task OPT. Prendendo spunto dai fondamenti teorici della Group Technology, che, dal punto di vista delle attrezzature consente di raggruppare macchine che lavorano più o meno gli stessi prodotti in una o più fasi di lavorazione, si può integrare un ragionamento simile nell'analisi del problema del bilanciamento ALBP.

L'idea di base consiste nel raggruppare all'interno dello stesso cluster alcuni o tutti gli OPT che, analizzando lo storico della domanda di tali OPT, è possibile individuare essere stati assemblati insieme in una discreta percentuale degli ordini totali. Ciò significa che se un task opzionale viene eseguito per completare un nuovo ordine, se il clustering degli OPT è stato eseguito in maniera appropriata, allora ci sarebbe una probabilità relativamente elevata che almeno uno, se non tutti, i task confluiti nel medesimo cluster del task considerato possano essere perfezionati all'interno del medesimo ordine.

L'importanza di individuare uno o più sottoinsiemi di task opzionali che nel totale degli ordini sono montati spesso insieme si palesa nel momento in cui si studia il bilanciamento della linea di assemblaggio. Volendo assegnare il montaggio di questi task ad una stazione della linea, il buonsenso impone infatti di non assegnare task appartenenti ad uno stesso cluster ad una stessa stazione.

Questo perché, pur essendo i task opzionali per loro stessa natura da non montare sempre, e quindi la loro distribuzione sul totale degli ordini risulta discontinua in quanto esisteranno ordini che non richiedono l'assemblaggio di un determinato OPT, possono tuttavia essere individuate determinate correlazioni tra due o più OPT in termini di frequenza congiunta di assemblaggio.

Si consideri un esempio banale legato al settore automotive. Tra gli optional presenti nei vari listini possono comparire i sensori di parcheggio anteriori e posteriori. Essi, nella maggioranza dei modelli di automobile in circolazione, sono considerati optional e come tali solo una certa

percentuale degli ordini totali relativi ad uno specifico modello ne richiederanno l'assemblaggio.

Facendo un'analisi rapida, si può pensare che se un determinato ordine richiederà l'assemblaggio dei sensori di parcheggio anteriori, è molto probabile che verrà richiesto all'interno dello stesso ordine anche l'assemblaggio dei sensori di parcheggio posteriori, immaginiamo con una percentuale pari al 90% degli ordini che richiedono l'assemblaggio dei sensori anteriori.

È intuitivo osservare come, limitando l'analisi alla coppia di optional sensori anteriori – sensori posteriori, e restringendo il campo degli ordini a tutti e soli quelli che richiedono il montaggio dei sensori di parcheggio anteriori, il task di assemblaggio dei sensori posteriori si avvicina molto ad un caso in cui esso è richiesto dalla totalità degli ordini analizzati, ed è quindi, a meno delle eccezioni naturali derivanti dalla natura dei task opzionali, assimilabile ad un task classico. In pratica, restringendo l'analisi a gruppi di task che hanno frequenze di assemblaggio congiunte paragonabili, ovvero idealmente i cluster di OPT, ognuno di essi può essere assimilato ad un gruppo di task essenzialmente classici, per i quali la letteratura impone una distribuzione lungo tutta la linea di assemblaggio allo scopo di scongiurare pericoli di sovraccarico. Nel caso specifico dei task opzionali, tali pericoli di sovraccarico si avrebbero nel momento in cui sulla linea si presenta un ordine che richiede di montare tutti gli optional appartenenti allo stesso cluster.

A grandi linee la procedura di assegnamento dei task opzionali alle stazioni di una linea di assemblaggio per rispondere ad un problema di bilanciamento è articolata in due fasi sequenziali: una prima fase di clustering, in cui si identificano e si raggruppano quei task che sono richiesti contemporaneamente da una buona percentuale degli ordini totali; una successiva fase di assegnamento vero e proprio di tali task alle diverse stazioni, che tenga conto dei problemi relativi alla saturazione del tempo ciclo ed, eventualmente, consideri il controllo dei rischi ergonomici legati al carico di lavoro.

4. CLUSTERING DEI TASK OPZIONALI

Il primo step di una procedura di assegnamento di task opzionali ad una linea di assemblaggio di tipo single-model consiste nel trovare insiemi di OPT aventi un certo grado di similarità tra loro, allo scopo di perfezionare successivamente tecniche decisionali per l'assegnamento vero e proprio.

4.1. Indice di similarità

La fase di clustering dei task opzionali prevede inizialmente la realizzazione di una matrice simmetrica che consideri ogni OPT, e ne individui la similarità puntuale con ognuno dei rimanenti OPT mediante l'impiego di un indice di similarità.

Nell'ambito della ricerca in esame si è deciso di costruire un apposito indice di similarità problem oriented traendo libero spunto dall'indice di Gupta-Seifoddini elaborato nell'ambito della cellular manufacturing.

Data una matrice di incidenza OPT-ordine, in cui per ogni ordine viene indicato un 1 se tale ordine richiede un determinato OPT, e uno 0 altrimenti, è possibile indicare tre diversi parametri:

$$x_{hi}^k = \begin{cases} 1, & \text{se l'ordine } k \text{ richiede l'assemblaggio di entrambi i task } h \text{ e } i \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$y_{hi}^k = \begin{cases} 1, & \text{se l'ordine } k \text{ richiede l'assemblaggio di uno solo dei task } h \text{ e } i \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$z_{hi}^k = \begin{cases} 1, & \text{se l'ordine } k \text{ non richiede l'assemblaggio di nessuno dei task } h \text{ e } i \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

A titolo di esempio, si consideri la seguente matrice di incidenza OPT-ordine basata su un caso esemplificativo costituito da 10 OPT e 30 ordini.

	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
ORD1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
ORD2	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
ORD3	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0
ORD4	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
ORD5	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
ORD6	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
ORD7	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1
ORD8	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
ORD9	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
ORD10	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
ORD11	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
ORD12	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1
ORD13	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
ORD14	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
ORD15	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
ORD16	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
ORD17	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
ORD18	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD19	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
ORD20	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
ORD21	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
ORD22	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
ORD23	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0
ORD24	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
ORD25	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
ORD26	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
ORD27	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1
ORD28	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
ORD29	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
ORD30	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Tabella 4.1

A partire da questi tre coefficienti, è possibile ricavare tre parametri, X_{hi} , Y_{hi} e Z_{hi} rappresentabili come le sommatorie, su tutti gli ordini, dei corrispondenti valori di x_{hi}^k , y_{hi}^k e z_{hi}^k . Quindi:

$$X_{hi} = \sum_k x_{hi}^k$$

$$Y_{hi} = \sum_k y_{hi}^k$$

$$Z_{hi} = \sum_k z_{hi}^k$$

I valori sono ricavati focalizzando l'attenzione su una coppia di task opzionali alla volta, e ripetendo la medesima operazione per tutti i task in maniera sequenziale. A titolo di esempio, si consideri la coppia di task OPT1 e OPT2.

	OPT1	OPT2
ORD1	1	1
ORD2	0	0
ORD3	1	0
ORD4	0	1
ORD5	0	1
ORD6	1	1
ORD7	1	0
ORD8	0	1
ORD9	0	1
ORD10	1	1
ORD11	0	0
ORD12	1	1
ORD13	1	1
ORD14	0	0
ORD15	0	0
ORD16	1	1
ORD17	1	0
ORD18	1	0
ORD19	0	0
ORD20	0	0
ORD21	0	0
ORD22	1	1
ORD23	1	0
ORD24	1	0
ORD25	1	0
ORD26	0	1
ORD27	0	0
ORD28	1	1
ORD29	0	1
ORD30	0	1

Tabella 4.2

È possibile calcolare i valori puntuali di X_{hi} , Y_{hi} e Z_{hi} confrontando:

- Per X_{hi} gli ordini in cui entrambi gli ingressi della matrice hanno valore 1. Essi rappresentano gli ordini che richiedono l'assemblaggio sia dell'OPT1 che dell'OPT2. Nel caso specifico, $X_{1-2} = 8$;

- Per Y_{hi} gli ordini in cui gli ingressi della matrice sono coppie di valori del tipo (0,1) o (1,0). Essi rappresentano gli ordini che richiedono il montaggio di uno solo dei due OPT, indifferentemente da quale dei due è montato. Nel caso specifico, $Y_{1-2} = 14$;
- Per Z_{hi} gli ordini in cui gli ingressi della matrice sono entrambi 0. Essi rappresentano gli ordini che non richiedono l'assemblaggio né dell'OPT1 né dell'OPT2. Nel caso specifico, $Z_{1-2} = 8$.

Ripetendo la stessa operazione per tutte le coppie di OPT montabili, è possibile costruire tre diverse matrici: la prima contenente tutti i valori di X_{hi} per tutte le coppie di optional che è possibile montare; le altre due, analogamente, contengono tutti i valori di Y_{hi} e Z_{hi} .

Nell'esempio:

X_{hi}	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
OPT1										
OPT2	8									
OPT3	3	6								
OPT4	4	1	2							
OPT5	7	6	2	2						
OPT6	8	12	8	4	4					
OPT7	7	9	7	4	6	11				
OPT8	5	5	4	3	7	5	7			
OPT9	7	5	5	4	4	6	8	5		
OPT10	5	4	2	6	3	7	7	2	4	

Tabella 4.3

Y_{hi}	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
OPT1										
OPT2	14									
OPT3	19	13								
OPT4	16	22	15							
OPT5	13	15	18	18						
OPT6	16	9	11	18	21					
OPT7	18	15	13	18	17	12				
OPT8	18	18	15	16	11	20	16			
OPT9	14	18	13	14	17	18	14	16		
OPT10	16	18	17	8	17	14	14	20	17	

Tabella 4.4

Z_{hi}	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
OPT1										
OPT2	8									
OPT3	8	11								
OPT4	10	7	13							
OPT5	10	9	10	10						
OPT6	6	9	11	8	5					
OPT7	5	6	10	8	7	7				
OPT8	7	7	11	11	12	5	7			
OPT9	9	7	12	12	9	6	8	9		
OPT10	9	8	11	16	10	9	9	8	9	

Tabella 4.5

Trattasi di matrici simmetriche, la qual cosa è particolarmente rilevante se si analizza la costruzione dell'indice Y_{hi} . Infatti, qualora si fosse considerato non indifferente quale dei due ordini venisse montato, questa matrice non sarebbe stata simmetrica, ma avrebbe avuto valori diversi nelle celle OPT1-OPT2 e OPT2-OPT1, indicando rispettivamente quanti ordini richiedono il montaggio del solo OPT1 e del solo OPT2. La scelta di considerare indifferente nel computo dell'indice Y_{hi} quale dei due OPT viene effettivamente montato nel singolo ordine è dovuta al fatto che quello che interessa in questa analisi è l'incidenza, sul totale, di quanti ordini richiedono il montaggio di uno solo dei due OPT considerati. Infatti, ragionevolmente, più il valore di Y_{hi} è alto rispetto al totale degli ordini analizzati, maggiore è la percentuale di ordini che non richiedono il montaggio di entrambi gli OPT, e quindi i due task opzionali non possono essere considerati "molto simili" tra loro. Risulta quindi indifferente quale dei due sia effettivamente montato, in quanto il dato rilevante è insito nel fatto che nella pratica è realizzato solo uno dei due task.

Allo stesso modo, un ragionamento approfondito va fatto anche per gli indici Z_{hi} , che rappresentano il totale degli ordini che non richiedono l'esecuzione di nessuno dei due elementi di una coppia di task opzionali. In particolare, è stato necessario chiedersi se, qualora molti ordini non richiedano l'assemblaggio di nessun elemento di una coppia di OPT, allora questi OPT debbano essere considerati o meno simili tra loro. La risposta, a rigor di logica, dovrebbe essere affermativa: se molti ordini non richiedono l'assemblaggio né dell'OPTx né dell'OPTy, allora con una certa probabilità un nuovo ordine che non richiede l'assemblaggio dell'OPTx non richiederà neppure l'assemblaggio dell'OPTy, il che contribuisce ad aumentare la similarità tra i due OPT. Ciò implica il fatto che, nella presente analisi, la similarità tra due OPT è stabilita principalmente in base a quanti ordini, sul totale, richiedono la stessa condizione di assemblaggio o non assemblaggio tra gli elementi di tale coppia di OPT.

In altre parole, la similarità tra due OPT dovrebbe aumentare nel momento in cui molti ordini richiedono l'esecuzione di entrambi i task di assemblaggio connessi a tali OPT oppure, al contempo, se molti ordini non richiedono l'esecuzione di nessuno di tali task. Al contrario, la similarità tra due OPT dovrebbe diminuire solo ed esclusivamente se molti ordini richiedono l'esecuzione di uno solo dei task connessi.

Questa deduzione appare ragionevole, in quanto si può considerare la similarità tra due task opzionali come la condizione in cui, in un processo di assemblaggio relativamente ad un singolo ordine, tali task subiscono lo stesso processo decisionale, ovvero se sono montati entrambi o meno, e di contro definire un certo grado di dissimilarità tra tali task solo nel caso in cui la decisione relativa all'impiego o meno degli OPT correlati risulti diversa.

Tuttavia, per valutare la similarità tra due task, si è deciso di non soffermarsi solo su quella che potremmo definire la frequenza delle possibili combinazioni di utilizzo/non utilizzo dell'OPT per soddisfare un ordine produttivo. In effetti, una componente altrettanto importante, che come già detto incide largamente sul bilanciamento della linea, è rappresentata dal tempo effettivo di esecuzione del singolo task. Questo perché in un normale processo industriale il tempo è spesso indicato essere una risorsa scarsa, e di conseguenza può risultare determinante considerare anche i tempi di assemblaggio per bilanciare in maniera ottimale una linea di assemblaggio. Del resto, già nell'algoritmo di Kottas-Lau, al di là dei vincoli di precedenza, il tempo di esecuzione del task rappresenta una delle basi decisionali relative alle scelte di assegnamento task-stazione, quindi risulta ragionevole considerare i tempi di assemblaggio dei task opzionali in qualche maniera all'interno del processo di assegnamento degli OPT nei cluster.

La varianza dei tempi di assemblaggio degli OPT può essere particolarmente elevata, e dipende dalla complessità reale delle operazioni necessarie al fine di completare il task strutturato. Assegnare operazioni che richiedono tempi simili tra loro alla stessa stazione può essere controproducente in termini di produttività. Questo perché, supposto il tempo di assemblaggio di un componente OPT_x pari a T, e decidendo di assemblare sulla stessa stazione un componente OPT_y avente tempo di assemblaggio paragonabile a meno di leggere discrepanze, si avrebbe, nel caso in cui tali OPT venissero entrambi richiesti all'interno di uno stesso ordine, un tempo necessario all'espletamento di entrambi i task connessi pari a 2T, che, in caso di valori elevati, potrebbe comportare una sovrasaturazione della stazione in esame.

L'importanza di un'analisi non solo delle frequenze ma anche dei tempi di completamento dei task opzionali risulta quindi fondata e coerente con lo scopo della presente ricerca. In

particolare, può essere utile considerare la comparabilità dei tempi di esecuzione dei task singoli, analizzandoli a coppie.

Tale comparabilità di tempi è espressa mediante la seguente formulazione:

$$t_{hi}^k = \frac{\min(t_{k,h} ; t_{k,i})}{\max(t_{k,h} ; t_{k,i})} \quad (9)$$

dove $t_{k,h}$ e $t_{k,i}$ rappresentano i tempi di esecuzione del task rispettivamente h e i per quanto riguarda l'ordine k-esimo. Per semplicità, si può considerare tale tempo costante per tutti gli ordini; se così non fosse, occorrerebbe avere una tabella specifica con i tempi di processamento di ogni task opzionale per ogni singolo ordine.

Immaginiamo che questa ipotesi semplificativa, assolutamente ragionevole, sia effettivamente soddisfatta nell'esempio fin qui analizzato. Quindi valga:

$$t_{hi} = \frac{\min(t_h; t_i)}{\max(t_h; t_i)} \quad (9b)$$

Sia data quindi una tabella dei tempi corrispondenti all'esecuzione del task relativo all'assemblaggio del singolo OPT:

OPT _i	t _i (sec)
OPT1	350
OPT2	200
OPT3	220
OPT4	310
OPT5	140
OPT6	280
OPT7	220
OPT8	150
OPT9	240
OPT10	380

Tabella 4.6

Applicando l'equazione (9b), è possibile costruire una nuova matrice simmetrica relativa alla comparabilità dei tempi di assemblaggio in esame. Essa risulta come segue:

t_{hi}	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
OPT1										
OPT2	0,571									
OPT3	0,629	0,909								
OPT4	0,886	0,645	0,71							
OPT5	0,4	0,7	0,636	0,452						
OPT6	0,8	0,714	0,786	0,903	0,5					
OPT7	0,629	0,909	1	0,71	0,636	0,786				
OPT8	0,429	0,75	0,682	0,484	0,933	0,536	0,682			
OPT9	0,686	0,833	0,917	0,774	0,583	0,857	0,917	0,625		
OPT10	0,921	0,526	0,579	0,816	0,368	0,737	0,579	0,395	0,632	

Tabella 4.7

Si noti che, per come sono costruite le equazioni (9) e (9b), il valore della comparabilità dei tempi di assemblaggio sarà sempre compreso tra 0 e 1. Ragionevolmente, il valore 0 dovrebbe essere escluso in quanto nessun task dovrebbe avere tempo nullo di esecuzione.

Considerando anche quest'ultimo fattore, è stato possibile costruire un indice di similarità problem-oriented per un insieme di task opzionali. Formalmente,

$$S_{hi} = \frac{(X_{hi} + Z_{hi}) \cdot t_{hi}}{(X_{hi} + Z_{hi}) \cdot t_{hi} + (1,2 - t_{hi}) \cdot Y_{hi}} \quad (10)$$

Analizziamo gli aspetti focali di un indice così concepito.

In primo luogo, al crescere di X_{hi} , Z_{hi} e t_{hi} tale indice tende ad aumentare di valore, per un duplice motivo. Innanzitutto, se gli indici relativi a coppie di OPT che potremmo definire equiparabili (ovvero che indicano il montaggio di entrambi o il non montaggio di entrambi) aumentano di valore, e si noti che è sufficiente anche l'aumento di uno solo di essi, allora, a parità di ordini totali, il valore di Y_{hi} cala. Inoltre, un valore di comparabilità di tempi elevato fa sì che il coefficiente numerico $(1,2 - t_{hi})$ sia basso, il che fa comunque calare l'incidenza del numero totale di ordini che richiedono l'assemblaggio di uno solo dei due OPT. Si può osservare che, essendo il valore di t_{hi} variabile in un range tra 0 e 1, di nuovo 0 idealmente escluso, il valore di tale coefficiente è compreso tra 0,2 e 1,2, estremo superiore escluso.

Se, al contrario, gli indici X_{hi} , Z_{hi} e t_{hi} si abbassano, il valore dell'indice di similarità tenderà ad abbassarsi, in quanto aumenteranno i valori di Y_{hi} e del coefficiente connesso. In pratica, potremmo definire l'addendo $(1,2 - t_{hi}) \cdot Y_{hi}$ a denominatore un coefficiente di penalizzazione per quelle che potrebbero essere considerate eccezioni, ovvero quelle situazioni in cui l'ordine non richiede l'assemblaggio di entrambi gli OPT ma di solo uno di essi, e che quindi rappresentano un fattore di non comunanza degli OPT in esame. Tale insieme di eccezioni deve di conseguenza far abbassare l'indice di similarità in maniera conforme all'effettiva entità di queste divergenze e discrepanze. Quindi, se dall'analisi di un insieme di ordini risulta che per una coppia qualsiasi di OPT vi sono pochi casi eccezionali che potremmo definire "1-0" e i tempi differiscono per valori piccoli, in proporzione alla durata effettiva dei due task, allora il coefficiente penalizzante tende maggiormente verso un valore nullo e, di conseguenza, l'indice di similarità tende al valore massimo. Si noti che l'indice di similarità così concepito assume valori sempre compresi tra 0 e 1. In particolare, risulterà pari a 0 quando nell'insieme di ordini sono presenti solo casi "1-0" e invece pari a 1 se sono presenti solo casi di coppie di OPT "1-1" oppure "0-0".

L'importanza del valore 1,2 nel coefficiente di penalizzazione è deducibile analizzando il caso in cui t_{hi} risulti essere pari a 1 per una coppia di task (h,i). Ciò significa che la comparabilità dei tempi è assoluta, in altre parole i due task hanno lo stesso tempo di esecuzione, come nel caso degli OPT 3 e 7 dell'applicazione esemplificativa. In una situazione di questo tipo, sarebbe facile ipotizzare un coefficiente moltiplicativo degli Y_{hi} pari al complemento a uno della comparabilità dei tempi. In questo modo, però, in caso di piena comparabilità ($t_{hi} = 1$) il valore di $(1 - t_{hi})$ tenderebbe a zero, il che porterebbe ad un coefficiente di penalizzazione per i casi "1-0" nullo anche in presenza di eccezioni, che a sua volta indicherebbe un indice di similarità pari a 1 nonostante la presenza di tali eccezioni.

Chiaramente ciò non è ammissibile, quindi si è aumentato il valore numerico di una certa quantità tale da scongiurare queste problematiche. Il valore 1,2 è stato scelto in maniera assolutamente arbitraria, per quanto rappresenti una giusta via di mezzo per salvaguardare l'eccessiva diluizione di valori di comparabilità di tempi comunque alti e al contempo scongiurare l'eccessiva penalizzazione di valori di comparabilità piuttosto bassi. Tale deduzione è stata supportata da opportuni test di valutazione della bontà della scelta effettuata.

Tornando all'esempio, una volta definito un possibile indice di similarità per il problema in esame, è possibile calcolarlo puntualmente per ogni coppia di OPT considerati.

Ne deriva una matrice di similarità così costruita:

S _{hi}	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4	OPT5	OPT6	OPT7	OPT8	OPT9	OPT10
OPT1										
OPT2	0,5092									
OPT3	0,3894	0,8033								
OPT4	0,7117	0,2971	0,5917							
OPT5	0,3954	0,5833	0,4292	0,2872						
OPT6	0,6364	0,7742	0,7663	0,6696	0,2344					
OPT7	0,4234	0,7575	0,8674	0,4914	0,4630	0,7401				
OPT8	0,2706	0,5263	0,5683	0,3717	0,8579	0,2876	0,5353			
OPT9	0,6040	0,6021	0,8091	0,6750	0,4195	0,6249	0,7874	0,4875		
OPT10	0,7428	0,3422	0,4162	0,8539	0,2527	0,6453	0,5159	0,1971	0,4597	

Tabella 4.8

4.2. Algoritmo di clustering

Una volta elaborata la matrice di similarità è possibile procedere col clustering degli OPT utilizzando un apposito algoritmo di clustering.

La scelta dell'algoritmo da utilizzare è ricaduta sull'algoritmo UPGMA (Unweighted Pair-Group Method using Arithmetic average). Tale algoritmo, come riporta la letteratura, rappresenta una mediazione tra gli algoritmi di clustering maggiormente conservativi, come il CLINK, che considera il minimo indice di similarità tra gli OPT confluiti in un cluster e quelli rimasti fuori, e lo SLINK, che considera invece il valore massimo di tale similarità.

L'UPGMA ne calcola invece un valore medio, secondo la formula (11)

$$SR = \frac{1}{r \cdot t} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t S[X_i, X_j] \quad (11)$$

ove r e t rappresentano la popolazione rispettivamente del cluster R e del cluster T, X_i e X_j rappresentano invece gli elementi i-esimo e j-esimo dei cluster in esame. I nuovi indici di similarità ricalcolati mediante tale algoritmo rappresentano quindi una media pesata sul

prodotto fra gli elementi appartenenti ai cluster delle somme dei coefficienti di similarità degli OPT considerati.

È possibile applicare tale algoritmo al caso esemplificativo in esame.

Innanzitutto, si individua il valore di similarità massimo tra quelli calcolati. In particolare, risulta essere $S[\text{OPT3}, \text{OPT7}] = 0,8674$.

I due OPT individuati andranno a formare un primo cluster C1. A questo punto, utilizzando l'algoritmo UPGMA è possibile ricalcolare gli indici di similarità. Ne deriva la seguente matrice con gli indici ricalcolati:

	OPT3-7	OPT1	OPT2	OPT4	OPT5	OPT6	OPT8	OPT9	OPT10
OPT3-7									
OPT1	0,4064								
OPT2	0,7804	0,5092							
OPT4	0,5415	0,7117	0,2971						
OPT5	0,4461	0,3954	0,5833	0,2872					
OPT6	0,7532	0,6364	0,7742	0,6696	0,2344				
OPT8	0,5518	0,2706	0,5263	0,3717	0,8579	0,2876			
OPT9	0,7982	0,6040	0,6021	0,6750	0,4195	0,6249	0,4875		
OPT10	0,4661	0,7428	0,4162	0,8	0,2528	0,6453	0,1970	0,4597	

Tabella 4.9

Si procede individuando il successivo valore di similarità massimo (nel caso quello esistente tra gli OPT 5 e 8) e si ricalcolano gli indici, inserendo gli OPT 5 e 8 in un nuovo cluster, C2.

	OPT3-7	OPT5-8	OPT1	OPT2	OPT4	OPT6	OPT9	OPT10
OPT3-7								
OPT5-8	0,4990							
OPT1	0,4064	0,3330						
OPT2	0,7804	0,5548	0,5092					
OPT4	0,5415	0,3294	0,7117	0,2971				
OPT6	0,7532	0,2610	0,6364	0,7742	0,6696			
OPT9	0,7982	0,4535	0,6040	0,6021	0,6750	0,6249		
OPT10	0,4661	0,2249	0,7428	0,4162	0,8539	0,6453	0,4597	

Tabella 4.10

Nuovamente viene individuato il valore massimo di similarità, corrispondente a quello esistente tra gli OPT 4 e 10, che vengono inseriti in un nuovo cluster, C3, e si ricalcolano gli indici.

Tale procedura va ripetuta a ogni iterazione dell'algoritmo. Il valore massimo di similarità tende a diminuire ad ogni iterazione, e gli OPT tendono a confluire in un certo numero di cluster più o meno popolati.

4.3. Valore di similarità di taglio

Virtualmente, un algoritmo UPGMA consente di proseguire con il clustering delle risorse, o, come in questo caso, degli OPT finché non siano raggruppati tutti dentro un unico cluster. Ciò è possibile evitando la definizione di un valore cosiddetto di taglio in presenza del quale, una volta che l'indice di similarità massimo da considerare nello step preliminare della n-esima iterazione risulti inferiore a tale valore, l'algoritmo si ferma generando una soluzione accettabile per il valore di similarità desiderato. In realtà è sempre un bene, nell'applicazione di un algoritmo di clustering, definire tale valore, per evitare la formazione di cluster con all'interno elementi con forte dissimilarità rispetto a quella massima desiderata.

La scelta del corretto valore di taglio non è univocamente definibile per ogni problema, e dipende fortemente dalle scelte effettuate a monte della procedura. In particolare, generalmente dipende, tra gli altri fattori, dall'indice di similarità scelto, sia esso general purpose o problem oriented, e anche dal tipo di algoritmo di clustering impiegato.

Un valore di taglio ottimale può essere definito in due modi principali:

- Arbitrariamente, definendo a priori un valore di similarità al di sotto del quale non si intende andare. Questa rappresenta un'alternativa che fornisce risultati moderatamente approssimativi, e sicuramente inficiati dall'eccessiva soggettività;
- In base al percentile del numero di aggregazioni, considerando un range di similarità pari, ad esempio, al 50° o 75° percentile di aggregazioni che tiene conto del numero di nodi, corrispondenti alle aggregazioni di risorse (o OPT) effettuate nell'applicazione dell'algoritmo di clustering. Questa metodologia è maggiormente oggettiva rispetto alla precedente, ma richiede un maggiore sforzo computazionale.

Nel presente studio, si è deciso di proporre la preventiva fissazione di un valore di taglio ottimale a partire dal calcolo della media semplice dei valori degli indici di similarità individuati a monte del processo di clustering. In tal modo, si pensa di evitare lo sforzo computazionale di determinare tutte le aggregazioni fino alla situazione dell'individuazione di un unico cluster contenente tutti gli OPT, e, al contempo, si desidera ridurre i problemi derivanti dall'eccessiva arbitrarietà nella scelta.

In seguito, il valore medio degli indici di similarità può essere eventualmente corretto in base all'effettiva distribuzione degli indici stessi lungo il range 0-1.

Se i valori degli indici di similarità tra OPT sono tutti distribuiti tra un estremo inferiore e uno superiore che tra loro differiscono di una quantità non superiore a 0,5 allora è possibile considerare come valore di taglio la media semplice. Questo perché i valori degli indici di similarità sono distribuiti in un intervallo relativamente stretto, quindi si suppone che scegliere un valore di taglio corrispondente al valore medio degli indici stessi possa fornire risultati accettabili in termini di prestazioni dell'algoritmo di clustering, ovvero si possano ottenere cluster con elementi legati tra loro da buoni valori di similarità.

Se diversamente i valori degli indici di similarità sono contenuti in un intervallo i cui estremi differiscono per quantità maggiori di 0,5 può risultare opportuno aumentare il valore di taglio in maniera proporzionale all'ampiezza della forbice tra il valore minimo e il valore massimo degli indici di similarità; si può pensare in particolare di aggiungere al valore medio degli indici individuati mediante la procedura evidenziata una quantità pari a 0,1 se la differenza tra il valore di similarità minimo e massimo è compresa tra 0,5 e 0,8, e pari a 0,2 se tale differenza è superiore a 0,8. In tal modo, detta M la media aritmetica dei valori degli indici di similarità, V_{min} e V_{max} i valori minimo e massimo degli indici stessi, il valore di taglio V_T dell'algoritmo di clustering UPGMA può essere identificato come segue:

- Se $V_{\max} - V_{\min} < 0,5$ allora $VT = M$;
- Se $0,8 < V_{\max} - V_{\min} \leq 0,5$ allora $VT = M + 0,1$;
- Se $V_{\max} - V_{\min} \geq 0,8$ allora $VT = M + 0,2$.

Una scelta di questo tipo è coerente con la necessità di confrontarsi con valori di similarità eventualmente molto diversi tra loro, che tenderebbero a peggiorare le prestazioni dell'algoritmo di clustering in quanto scegliendo la media semplice risulterebbero inclusi all'interno dei cluster OPT con valori di similarità molto diversi tra loro. Essendo tale similarità calcolata in termini di comparabilità in tempi e frequenze di richiesta, c'è il rischio che gli OPT siano quindi eccessivamente diversi o in durata o in richiesta contemporanea di assemblaggio o non assemblaggio, e di conseguenza si potrebbero considerare afferenti allo stesso cluster task OPT che in realtà sono montati insieme poco spesso oppure hanno durata non comparabile.

Una doverosa precisazione va fatta sui problemi derivanti dall'impiego del valore minimo e massimo degli indici di similarità per il calcolo del valore ottimale di taglio. Consideriamo un esempio in cui il calcolo dei valori di S_{hi} abbia fornito i seguenti risultati per un campione di 30 coppie di task opzionali:

- Per 20 coppie di task S_{hi} superiore a 0,9;
- Per 8 coppie S_{hi} superiore a 0,6 e inferiore a 0,8;
- Per 2 coppie S_{hi} inferiore a 0,2.

La media matematica tende, in prima battuta, a valori prossimi a 0,8. La differenza tra il valore massimo di similarità e il valore minimo può essere considerata prossima a 0,8, e verosimilmente anche superiore. In questo caso, il valore ottimale di taglio sarebbe $M + 0,2 = 1$. Ciò significherebbe essenzialmente includere all'interno di cluster solo OPT aventi tra loro similarità pari a 1. Essendo questa cosa molto estrema, si può pensare di escludere a priori dal calcolo della media le coppie di task aventi valori di indici di similarità eccessivamente divergenti dalla maggioranza degli altri. In tal modo, nell'esempio, essendo la differenza tra valori massimo e minimo del sottoinsieme di coppie di task così considerato inferiore a 0,5, il valore di taglio risulta essere la media semplice M dei valori degli indici di similarità del sottoinsieme. In generale, escludendo quelle che potrebbero essere definite divergenze, si ottiene un duplice risultato:

- Le coppie di task corrispondenti a valori di similarità molto bassi verrebbero automaticamente escluse dal clustering, nel senso che sicuramente i task aventi tali valori di similarità non confluiranno nello stesso cluster;
- Si ottengono valori di indici di similarità quanto più possibile concentrati, che comportano l'individuazione di un valore di taglio performante per l'algoritmo di clustering considerato.

Non bisogna comunque abusare del taglio delle cosiddette divergenze nei valori di similarità. Se infatti tali indici sono più o meno uniformemente distribuiti lungo tutto l'intervallo [0;1] è buona norma considerare tutti gli indici individuati allo scopo del calcolo della media, che andrà poi corretta in base all'effettiva differenza tra il valore minimo e il valore massimo degli indici.

È inoltre chiaro che questa procedura risente della necessità di stabilire in maniera del tutto arbitraria se valori di indici di similarità eccessivamente difforni dai restanti vadano esclusi o meno dal calcolo della media per identificare un buon valore di taglio per l'UPGMA. Norme di buonsenso stabilirebbero di escludere valori solo se essi rappresentano una percentuale effettivamente molto piccola del totale degli indici calcolati, e se essi differiscono eccessivamente dai valori della maggioranza degli indici. Se ciò non è verificato, si procede comprendendo tutti i valori degli indici di similarità nel calcolo del valore medio e, conseguentemente, del valore di taglio mediante le regole precedentemente delineate.

Nell'esempio in fase di studio, non essendo presenti valori particolarmente divergenti dagli altri (anche il valore minimo assoluto, 0,19701, è di poco inferiore al penultimo valore, 0,23438, a sua volta di poco inferiore al terzultimo, 0,25275), il valore medio di similarità è calcolato considerando l'interezza degli indici di similarità individuati, e risulta essere pari a 0,5483. La differenza tra il valore massimo e il valore minimo del totale degli indici è pari a 0,67304. In base alle regole in precedenza indicate, essendo tale differenza compresa tra 0,5 e 0,8, va aggiunto un valore pari a 0,1 al valore medio individuato. Il valore di taglio indicato mediante questa procedura è pari a 0,6483.

In conseguenza di ciò, evitando di riportare ogni passaggio dell'algoritmo UPGMA, si identificano i seguenti cluster di OPT:

C1: OPT1-4-10;

C2: OPT2-3-6-7-9;

C3: OPT5-8;

OPT FUORI CLUSTER: nessuno.

L'esecuzione dell'algoritmo UPGMA è stata fermata in corrispondenza della creazione di un nodo con similarità $S = 0,5111$ inferiore al valore di taglio prefissato, come evidenziato dal dendrogramma in figura 4.1 descrivente l'esempio.

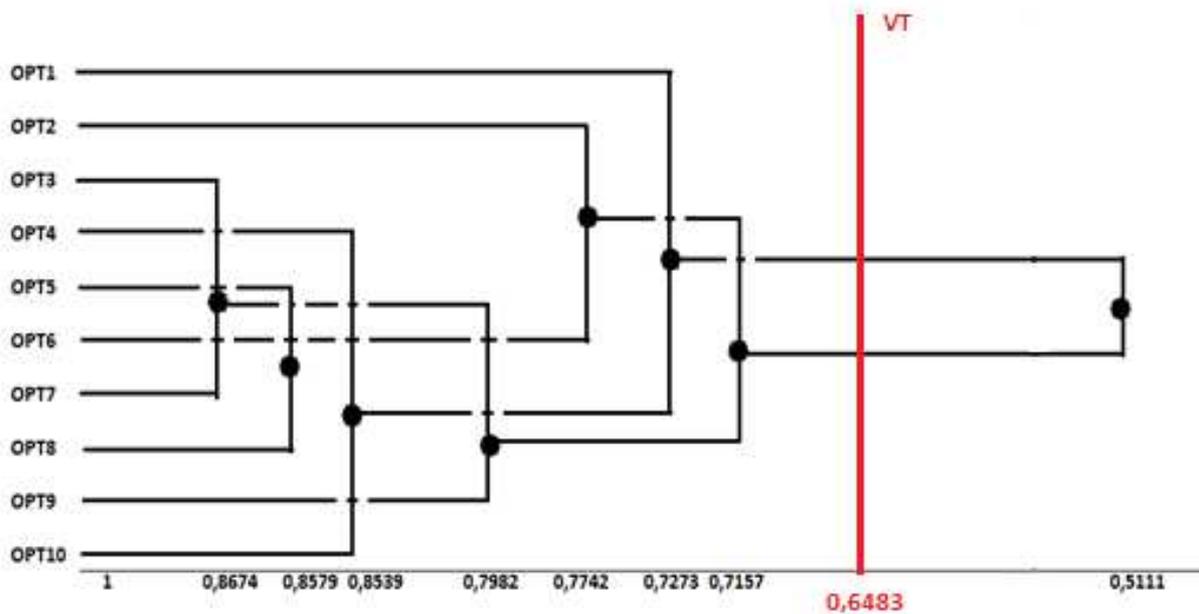


Figura 4.1

Dal dendrogramma sono facilmente identificabili i valori di similarità corrispondenti alla formazione dei cluster di OPT, all'inserimento di OPT all'interno di cluster preesistenti, e alla fusione di due cluster.

5. ASSEGNAMENTO DEI TASK OPZIONALI ALLE STAZIONI – BILANCIAMENTO DELLA LINEA DI ASSEMBLAGGIO

Ora che i cluster sono stati costruiti

- identificando le relazioni tra OPT nell'archivio ordini disponibili;
- stabilendo le compatibilità dei tempi di assemblaggio dei singoli OPT;
- individuando un indice di similarità problem oriented intelligente per identificare le similarità tra coppie di OPT, e costruendo un'apposita matrice di similarità;
- applicando l'algoritmo UPGMA alla matrice di similarità per individuare cluster di OPT individuando un valore di similarità di taglio per interrompere il clustering in presenza di valori di similarità inferiori a tale valore,

è possibile introdurre il fulcro centrale e la motivazione di tale procedura di clustering, ovvero come assegnare gli OPT alle stazioni.

Inizialmente verranno riportate alcune considerazioni meramente qualitative che sono state tuttavia il motore della mia ricerca.

Lo scopo principale di questo studio è stato capire come assegnare un gruppo di task opzionali, e quindi non da eseguire necessariamente all'interno di ogni ciclo produttivo, ad un insieme di stazioni che costituiscono una linea di assemblaggio single-model già caricata dei cosiddetti task obbligatori, ovvero quelli che invece sono necessari per la completa realizzazione del prodotto coinvolto nel processo di produzione, mediante per esempio l'algoritmo di Kottas-Lau.

La questione principale che si deve affrontare all'interno di un processo decisionale di questo tipo è il fatto che, pur caricando una stazione j con un insieme (composto da 1 o più elementi) di task opzionali, essi, per loro natura, non sono da eseguire sempre, e quindi tale decisione è affetta da una qualche aleatorietà. Un ordine X potrebbe richiedere l'assemblaggio di tutti gli optional i i cui task correlati sono assegnati alla stessa stazione, impegnando l'operatore per il massimo del tempo assegnato alla stazione corrispondente; di contro, l'ordine successivo potrebbe non richiedere l'assemblaggio di nessuno di tali OPT, e quindi i tempi dei task corrispondenti non vengono conteggiati per quell'ordine, facendo sì che il carico complessivo di lavoro sia limitato ai soli task obbligatori, per quell'ordine e per quella stazione.

Si può facilmente osservare che esiste una grande varietà di situazioni intermedie, tanto maggiore quanto più sono i task opzionali assegnati ad una stazione. Il verificarsi di una di queste situazioni è verosimilmente casuale: note le probabilità che un ordine richieda un certo sottogruppo di task opzionali, per esempio analizzando lo storico della domanda, ove disponibile, si verificherà per ogni ordine una di queste situazioni intermedie o “estreme” con una certa probabilità corrispondente. All’opposto, risulta assolutamente prevedibile e ottimizzabile la sequenza con la quale gli ordini che richiedono o meno l’esecuzione di un determinato gruppo di task OPT arrivano alle singole stazioni di lavorazione, e di conseguenza è possibile ottimizzare l’impiego delle attrezzature e la ripartizione del tempo operatore disponibile.

Risulta pertanto non banale assegnare i task opzionali alle stazioni della linea tenendo presente la grande varietà di situazioni in cui si può incorrere. Come principio zero si potrebbe pensare di assegnare task opzionali alle stazioni cercando di non eccedere il tempo disponibile. Rimane però una soluzione subottima, in quanto mantenendo solo il rispetto del tempo di ciclo come vincolo per assegnare task alle stazioni, si rischia di caricare un operatore con n task opzionali da eseguire spesso e un altro operatore con m task opzionali che, nella pratica, non saranno eseguiti con la stessa frequenza.

L’idea di base di agglomerare task opzionali, e corrispondenti OPT, in cluster mediante la procedura analizzata ha come scopo proprio pervenire ad un bilanciamento maggiormente ragionato. La costruzione di questi cluster è stata sviluppata mediante l’impiego di un indice di similarità che considera, premiando con un certo peso, le coppie di task aventi una medio-alta percentuale di ordini che richiedono o l’esecuzione di entrambi detti task o non ne richiedono nessuno, fatte salve le esistenti eccezioni, e che hanno tempi di esecuzione tutto sommato comparabili. Lo scopo della normale concezione di cluster è individuare un insieme di risorse che, avendo caratteristiche comuni, andranno inserite, ad esempio, all’interno di una stessa ala dell’impianto industriale al fine di limitare le movimentazioni di materiale intercellulari e promuovere invece le movimentazioni intracellulari. Invece, nella presente analisi, lo scopo finale della suddivisione in cluster dei task opzionali è stato stabilire, nel computo totale degli OPT che possono essere coinvolti nel processo di assemblaggio quali, tra questi, non devono assolutamente, a meno che non sia necessario per questioni pratiche, essere assegnati alla stessa stazione di assemblaggio. Questo perché, se il clustering è stato eseguito nella maniera corretta, nei vari cluster andranno a confluire task OPT che sono eseguiti spesso insieme.

Di conseguenza, evitare l'assegnamento di task appartenenti allo stesso cluster alla stessa stazione si traduce nell'impedire che il tempo ciclo di un operatore si esaurisca realizzando sempre lo stesso gruppo di task, in quanto se un certo task appartenente ad un cluster è eseguito, allora con buona probabilità anche i task connessi perché appartenenti allo stesso cluster (e quindi molto simili in termini di frequenza e di tempi) andranno eseguiti. Inoltre, dal momento che nel calcolo degli indici di similarità tra OPT viene considerata anche la comparabilità tra tempi di lavorazione, evitare di assegnare task dello stesso cluster ad un operatore tende a ridurre la probabilità che il tempo ciclo venga ecceduto.

In definitiva, la costruzione dei cluster serve in questo caso a identificare quali siano quei task opzionali che, per motivazioni legate alla frequenza di richiesta e al tempo necessario alla lavorazione, non dovrebbero essere assegnate alla stessa stazione.

È altresì chiaro che, nella pratica, non sempre risulterà facile evitare di assegnare OPT dei cluster alla stessa stazione e allo stesso operatore, e le motivazioni sono le più varie. Possono esistere vincoli dettati dai diagrammi delle precedenze, oppure dettati dalle attrezzature disponibili, oppure dalla necessità di avere a bordo linea uno spazio per lo stoccaggio sufficiente e disponibile solo presso determinate stazioni.

Va inoltre considerata l'esistenza di task che, a causa della interruzione dell'algoritmo di clustering UPGMA al raggiungimento del valore di similarità di taglio, non sono inseriti all'interno di nessun cluster. Questi task, definiti "fuori cluster", vanno trattati con cura nella procedura di assegnamento alle stazioni.

Il problema si prefigura quindi di non semplice soluzione, e sicuramente richiede l'implementazione di tecniche di ricerca operativa applicate ad hoc a casi reali, per considerare l'interezza dei vincoli esistenti che influenzano il processo industriale. Ciò nonostante, questa procedura può essere interpretata come il classico punto di partenza per uno studio maggiormente dettagliato del problema, e maggiormente aderente alla realtà organizzativa del singolo impianto o della singola linea.

5.1. Bilanciamento mediante funzione di ottimizzazione

Uno studio di questo tipo è stato perfezionato dai colleghi Irene Carpi e Federico Disanto nell'analisi del problema dal punto di vista della ricerca operativa. In particolare, è stato

approfondito il problema del bilanciamento di una linea di assemblaggio manuale considerando l'esistenza contemporanea sulla linea di:

- task classici;
- task opzionali;
- task XOR,

ovvero la situazione più vicina possibile alla realtà industriale.

Per modellare un problema di ottimizzazione di questo tipo, sono stati considerati i seguenti indici:

- $k = 1, \dots, K$ stazioni d'assemblaggio.
- $j = 1, \dots, J$ task classici+ XOR.
- $n = 1, \dots, N$ optional non appartenenti a nessun cluster.
- $o, l = 1, \dots, O$ optional appartenenti ad un cluster.
- $c = 1, \dots, C$ cluster.
- $s, r = 1, \dots, S$ $J+N+O$ insieme unione degli insiemi di task, OPT clusterizzati e OPT non clusterizzati

con annessi parametri

- T_o Tempo di assemblaggio optional clusterizzato o-esimo.
- T_c Tempo di assemblaggio medio del cluster c-esimo.
- T_j Tempo di assemblaggio del task j-esimo (classico e XOR).
- T_n Tempo di assemblaggio optional non clusterizzato n-esimo.
- $F_o = \frac{D_o}{NO}$ Frequenza di richiesta dell'optional clusterizzato o-esimo.
- $F_n = \frac{D_n}{NO}$ Frequenza di richiesta dell'optional non clusterizzato n-esimo.
- $F_c = \frac{D_c}{NO}$ Frequenza di richiesta media del cluster c-esimo.
- D_c Domanda media del cluster c-esimo.
- D_o Domanda dell'opt o-esimo nel campione di storico analizzato.
- D_n Domanda dell'opt n-esimo nel campione di storico analizzato.
- NO Numero ordini totale nel campione di storico analizzato.
- I_o Ingombro dell'optional o-esimo.
- I_j Ingombro del task j-esimo.
- I_n Ingombro dell'optional n-esimo.

- M_k Area magazzino stazione k-esima.
- P_o Set di predecessori tecnologici dell'optional o-esimo.
- P_j Set di predecessori tecnologici del task j-esimo.
- P_n Set di predecessori tecnologici dell'optional n-esimo.
- g Percentuale di sovraccarico massima della singola stazione.
- CT Tempo ciclo.
- $O_{max} = \lceil \frac{(N+O)}{K} \rceil + 1$ Numero massimo di optional assegnabili alla singola stazione.
- $TH = \frac{(\sum_{s=1}^S T_s + \sum_{s=1}^S F_s T_s)}{2LBK}$ Takt time teorico calcolato come la media dei tempi non pesati, e quelli pesati alla frequenza di richiesta dell'optional ($F_s=1$ per i task classici).
- $LBK = \lceil \frac{\sum_{s=1}^S T_s}{CT} \rceil$
- $C_{olc} = \begin{cases} 1 & \text{se la coppia di optional } (o, l) \text{ appartiene ad uno stesso cluster} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

e variabili

- $X_{ok} = \begin{cases} 1 & \text{se l'optional } o - \text{esimo viene assegnato alla stazione } k - \text{esima} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $X_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{se il task } j - \text{esimo viene assegnato alla stazione } k - \text{esima} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $X_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{se l'optional } n - \text{esimo viene assegnato alla stazione } k - \text{esima} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $X_{sk} = \begin{cases} 1 & \text{se il task } o \text{ l'optional viene assegnato alla stazione } k - \text{esima} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $O_{olk} = \begin{cases} 1 & \text{se la coppia di optional } (o, l) \text{ viene assegnata alla } k - \text{esima stazione} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

La funzione obiettivo risultante è nella forma

$$\text{Min} \left[\text{Max}_k \left(\sum_{j=1}^J T_j X_{jk} + \sum_{n=J+1}^N F_n T_n X_{nk} + \sum_{o=N+1}^O F_o T_o X_{ok} + \sum_{o=N+1}^O \sum_{l=N+1}^O \left(\frac{O_{olk}}{2} \right) \sum_{c=1}^C T_c^{(0,5+F_c)} \left(\frac{C_{olc}}{2} \right) \right) \right]$$

soggetta ai vincoli

$$\sum_{k=1}^K X_{nk} = 1 \quad \forall n$$

$$\sum_{k=1}^K X_{ok} = 1 \quad \forall o$$

$$\sum_{k=1}^K X_{jk} = 1 \quad \forall j$$

$$\sum_{j=1}^J I_j X_{jk} + \sum_{n=J+1}^N I_n X_{nk} + \sum_{o=N+1}^O I_o X_{ok} \leq M_k \quad \forall k$$

$$\sum_{k=1}^K k X_{sk} \geq \sum_{k=1}^K k X_{rk} \quad \forall (s,r) | r \in P_s$$

$$\sum_{n=J+1}^N X_{nk} + \sum_{o=N+1}^O X_{ok} \leq O_{max} \quad \forall k$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J T_j X_{nk} + \sum_{n=J+1}^N T_n X_{nk} + \sum_{o=N+1}^O T_o X_{ok}}{TH} \leq g \quad \forall k$$

$$O_{olk} \geq X_{ok} + X_{lk} - 1 \quad \forall k, \forall o, \forall l, \quad o \neq l$$

$$X_{ok}, X_{nk}, X_{jk}, X_{sk}, O_{olk} \in [0,1] \quad \forall o, \forall n, \forall j, \forall s, \forall l$$

Per un'analisi più dettagliata di parametri, variabili e modello si rimanda alle trattazioni correlate riportate nell'apposita sezione della bibliografia.

6. PROCEDURA STANDARD DI ASSEGNAMENTO TASK OPZIONALI

Per riassumere, si può descrivere un diagramma di flusso esprimente i passi di una procedura standardizzata per assegnare i task opzionali alle varie stazioni della linea di assemblaggio.

Tale procedura rappresenta un'analisi sintetica dello studio riportato finora, seguendo con ordine i passi elencati per pervenire alla creazione dei cluster di OPT.

Nel dettaglio:

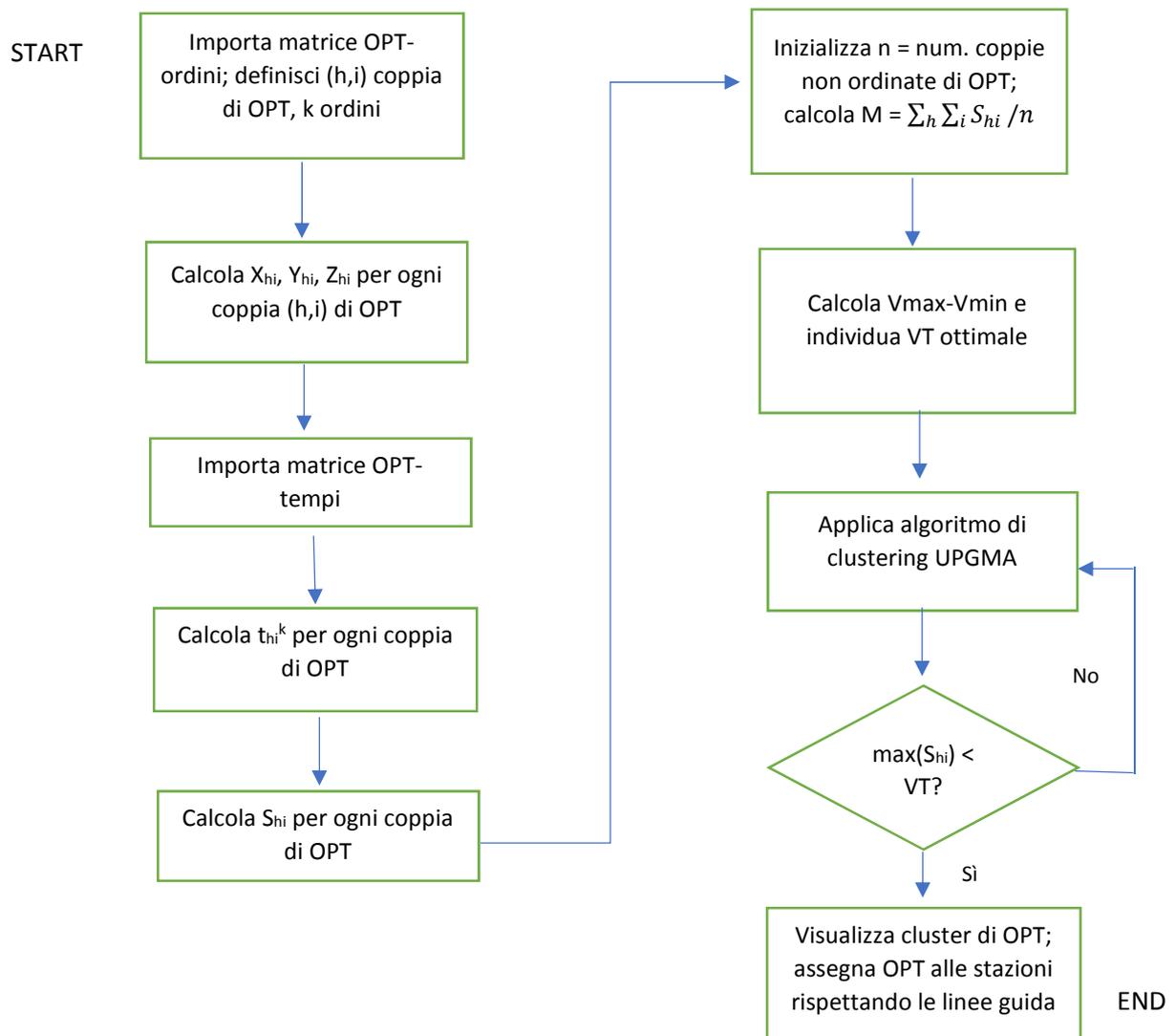


Figura 6.1

All'interno di tale procedura sono presenti alcuni passaggi critici.

In primo luogo è di fondamentale importanza avere piena conoscenza del processo industriale da analizzare, in termini di frequenze di domanda del singolo OPT, di frequenze di domanda

congiunta di coppie di OPT e di tempi di processamento dei task connessi. Questo perché in assenza di alcune informazioni non è possibile procedere col successivo step di calcolo degli indici di similarità. Conseguentemente, è necessario analizzare, ordine per ordine, la richiesta di esecuzione dei task opzionali in base all'effettiva richiesta o meno di assemblaggio dello specifico OPT.

In aggiunta, le operazioni di elaborazione richieste dall'esecuzione dell'algoritmo di clustering UPGMA rappresentano uno dei momenti maggiormente critici, in quanto, al crescere delle agglomerazioni in nodi, aumenta contestualmente lo sforzo computazionale per il ricalcolo degli indici di similarità. Inoltre, in questo stesso contesto, risulta assolutamente importante la corretta individuazione del valore ottimale di taglio, allo scopo di ottenere cluster di OPT con la desiderata similarità interna. Le linee guida che prevedono il calcolo del valore medio degli indici di similarità e la sua eventuale correzione in base all'effettiva distribuzione o concentrazione degli indici stessi sono passi assolutamente importanti che devono essere seguiti con logica e attenzione al fine di pervenire ad un buon valore di taglio dell'algoritmo di clustering. Dal momento che i cluster formati dovranno successivamente essere impiegati come input per il bilanciamento vero e proprio, occorre che essi siano individuati con buoni valori di similarità.

Infine, il bilanciamento della linea considerando tutti i tipi di task da eseguire, opzionali, classici e XOR, può non risultare di semplice implementazione. A supporto si possono impiegare le considerazioni pratiche di massima proposte a livello concettuale e, per un'analisi sicuramente più prossima all'ottimale, si può procedere all'impiego della funzione obiettivo in presenza dei vincoli riportati nel precedente paragrafo 5.1.

7. CASO STUDIO

L'analisi condotta rappresenta uno studio ragionato di una tematica nuova e su cui la sensibilizzazione manageriale e progettuale non è ancora saldamente radicata all'interno del comparto industriale, sebbene rappresenti una diretta conseguenza delle sfide relative alla customizzazione del prodotto che un impianto produttivo deve ad oggi affrontare in maniera sempre più massiccia.

È altresì chiaro che un'analisi di questo tipo rappresenta solo un input, un punto di partenza per studi che trattino l'argomento in maniera maggiormente approfondita, e sviluppino di conseguenza tecniche e indicazioni volte a migliorare l'effettiva applicazione di queste tecniche a casi reali e fortemente complessi.

La complessità di un caso reale in cui vi è la coesistenza all'interno delle operazioni da svolgere in un processo di assemblaggio manuale di task classici e di task manuali è influenzata da una molteplicità di aspetti molto diversi tra loro.

In primo luogo, l'analisi delle correlazioni esistenti tra i diversi OPT, in un normale sistema produttivo, è spesso da eseguire su un numero molto elevato di ordini. A meno che non si tratti di commesse speciali, che richiedono prodotti di grande complessità e, spesso, anche di grandi dimensioni – per esempio, la produzione all'interno dell'ingegneria navale – infatti, l'ammontare di ordini da soddisfare in un certo lasso di tempo può essere anche dell'ordine delle svariate centinaia o migliaia. Si pensi al settore automotive, dove in media l'output di una linea di assemblaggio è una macchina al minuto. Come conseguenza diretta, l'analisi volta a individuare, per una data coppia di OPT, quanti ordini richiedono l'assemblaggio di entrambi, di uno solo dei due o di nessuno di essi può risultare essere uno sforzo che può richiedere del tempo se questa analisi non fosse supportata da strumenti software capaci di snellire il processo di calcolo degli indici X_{hi} , Y_{hi} e Z_{hi} .

In aggiunta, anche il numero di OPT presenti nel portafoglio può essere elevato, e di conseguenza i valori degli indici da calcolare risultano molteplici. In sostanza, detto n il numero di OPT presenti nel database, il numero di valori dei vari indici (X_{hi} , Y_{hi} , Z_{hi} , t_{hi} e S_{hi}) risulta essere pari a $(n-1)!$. Chiaramente in corrispondenza di elevati valori di n si produrranno moltissimi valori degli indici.

La complessità del bilanciamento della linea può essere funzione anche del numero di stazioni effettivamente disponibili, delle attrezzature di cui sono disposte, dello spazio reale disponibile

a bordo linea, del tempo ciclo e della produttività, e, più in generale, di tutti quelli che potremmo definire parametri tecnologici della linea. Ciò è vero soprattutto considerando la coesistenza di diversi tipi di task (classici e opzionali) aventi ciascuno un proprio tempo di esecuzione, e, nel caso dei task opzionali, una frequenza di esecuzione sempre inferiore a quella dei task classici ma che risente di un'elevata variabilità di valori in relazione al totale degli ordini.

La complessità risulta essere superiore rispetto ai classici casi accademici, come l'esempio 10 OPT su 30 ordini utilizzato per introdurre l'algoritmo di clustering. Per questo motivo, può essere utile verificare l'efficacia della metodologia di clustering precedentemente delineata a un caso più corposo e sicuramente maggiormente vicino alla realtà industriale.

7.1. Analisi preliminare

Il caso studio elaborato è adattato dalla realtà industriale del settore automotive. In particolare, nell'ottica di un sistema di assemblaggio single-model, si è considerato un solo modello di autovettura, indicato nel seguito come MODx, avente un portafoglio di possibili optional pari a 24 OPT. Si è considerato un totale di 1000 ordini, corrispondente ad un funzionamento della linea di assemblaggio per circa 16 ore, al netto di eventuali fermi macchina dovuti a cause contingenti, ovvero due turni da otto ore ciascuno. Si è ipotizzato il tasso di produzione della linea pari a 1 unità/min.

Per ogni OPT è noto lo storico, ovvero quale percentuale degli ordini ha mediamente richiesto un determinato OPT in un certo intervallo di tempo. Inoltre, sono note le stringhe relative ad ogni ordine in cui si evidenziano mediante valori 1 quali OPT sono richiesti dall'ordine e con 0 gli OPT non richiesti. Una porzione esemplificativa di tale database corrispondente a 80 righe di ordine è compresa in figura 7.1. In figura 7.2 è presentata un'analisi di Pareto relativa alle richieste aggregate degli OPT in esame. In aggiunta, è disponibile anche una seconda matrice relativa ai tempi unitari di assemblaggio per ciascun task opzionale. Si è considerato un tempo di processamento identico per ogni ordine. Tali dati sono riportati in figura 7.3.

I dati relativi alla domanda del singolo OPT sono stati elaborati incrociando articoli specifici presenti su varie testate specializzate nel settore automotive e non su dati reali relativi a un'azienda specifica.

Ordine	Fari fendinebbia anteriori	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente	Adaptive cruise control	Luci emergenza	Sens. parch. ant.	Sens. parch. post.	Telecam. post.	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneu.	Controllo di corsia	Parcheggi assistito	Protezione sportelli
ORD001	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
ORD002	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
ORD003	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1
ORD004	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
ORD005	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
ORD006	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
ORD007	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
ORD008	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
ORD009	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
ORD010	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
ORD011	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
ORD012	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
ORD013	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
ORD014	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1
ORD015	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
ORD016	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ORD017	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
ORD018	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
ORD019	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
ORD020	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
ORD021	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
ORD022	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
ORD023	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
ORD024	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
ORD025	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD026	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
ORD027	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
ORD028	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
ORD029	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
ORD030	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
ORD031	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
ORD032	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
ORD033	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD034	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
ORD035	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
ORD036	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
ORD037	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0
ORD038	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
ORD039	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ORD040	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
ORD041	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ORD042	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
ORD043	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
ORD044	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
ORD045	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
ORD046	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
ORD047	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
ORD048	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
ORD049	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
ORD050	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORD051	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
ORD052	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
ORD053	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
ORD054	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
ORD055	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD056	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
ORD057	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
ORD058	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
ORD059	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD060	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
ORD061	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
ORD062	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
ORD063	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
ORD064	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
ORD065	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
ORD066	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
ORD067	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
ORD068	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
ORD069	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
ORD070	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
ORD071	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
ORD072	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
ORD073	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
ORD074	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
ORD075	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
ORD076	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
ORD077	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0													

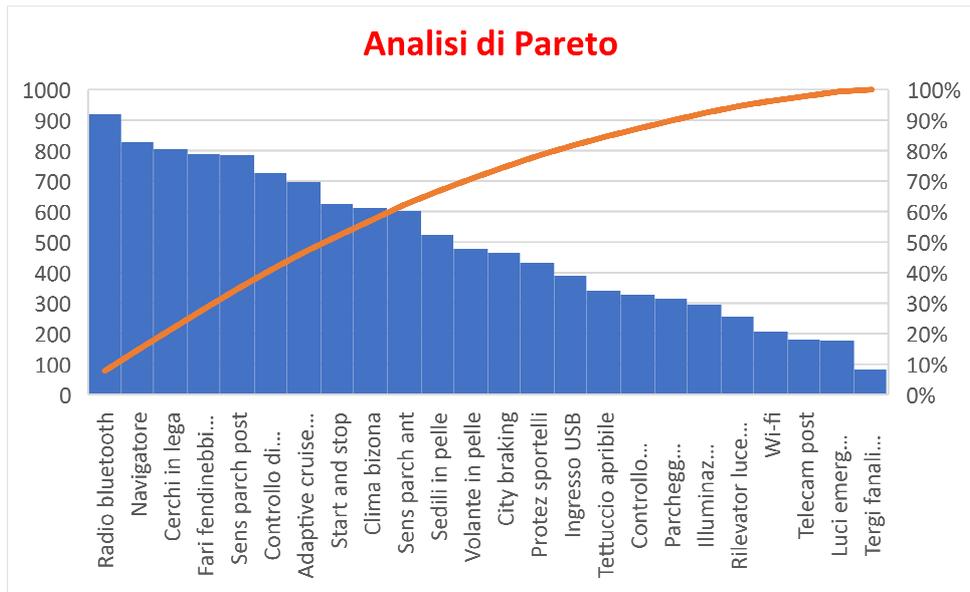


Figura 7.2

	t (sec)		
		Adaptive cruise control	240
		Luci emerg automat	260
Fari fendinebbia anteriori	540	Sens parch ant	300
Tergi fanali anteriori	150	Sens parch post	335
Tettuccio apribile	770	Telecam post	405
Cerchi in lega	230	City braking	625
Clima bizona	680	Start and stop	640
Navigatore	200	Rilevator luce pioggia	290
Radio bluetooth	310	Controllo pressione pneum	220
Ingresso USB	180	Controllo di corsia	285
Sedili in pelle	205	Parchegg assistito	440
Volante in pelle	260	Protez sportelli	100
Wi-fi	480		
Illuminaz ambient led	315		

Figura 7.3

7.2. Calcolo degli indici X_{hi} , Y_{hi} , Z_{hi} , t_{hi}

A partire dai dati in possesso, è stato possibile calcolare gli indici di supporto necessari per l'individuazione degli indici di similarità OPT-OPT; in particolare si sono ottenute quattro

diverse matrici di incidenza corrispondenti a ciascuno di tali parametri. Esse sono riportate nel seguito.

X _{hi}	Fan fendinebbia anteriore	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente led	Adaptive cruise control	Luci emergenza automat	Sens parch ant	Sens parch post	Telecam post	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneum	Controllo di corsia	Parchegg assistito	Protezione sportelli		
Fan fendinebbia anteriore																										
Tergi fanali anteriori	44																									
Tettuccio apribile	170	32																								
Cerchi in lega	402	73	263																							
Clima bizona	307	49	214	480																						
Navigatore	497	73	280	670	507																					
Radio bluetooth	461	76	310	738	561	808																				
Ingresso USB	193	35	140	317	239	322	367																			
Sedili in pelle	271	50	194	433	321	443	484	202																		
Volante in pelle	253	43	168	385	300	403	440	193	418																	
Wi-fi	97	13	62	173	126	178	189	96	108	99																
Illuminazione ambiente led	141	26	95	237	179	244	264	106	166	152	60															
Adaptive cruise control	346	60	241	560	417	581	641	390	352	314	139	204														
Luci emergenza automat	90	16	58	137	115	140	160	66	98	89	39	48	177													
Sens parch ant	287	39	207	495	358	498	557	242	319	293	136	176	422	103												
Sens parch post	365	56	274	635	475	647	725	311	418	376	166	227	550	141	602											
Telecam post	90	16	57	142	105	149	169	69	95	85	40	45	129	36	143	180										
City braking	226	43	158	389	284	386	423	184	245	227	96	139	316	73	416	438	98									
Start and stop	311	53	208	493	380	512	572	240	343	308	127	174	428	111	380	497	121	290								
Rilevatore luce pioggia	130	22	88	215	152	214	241	100	128	122	53	70	169	40	156	200	47	120	160							
Controllo pressione pneum	164	33	111	256	203	273	305	135	166	157	68	100	231	61	202	264	65	161	215	92						
Controllo di corsia	376	65	247	591	446	588	667	297	375	342	157	204	513	137	435	566	138	339	459	192	244					
Parchegg assistito	150	25	99	259	196	254	289	130	159	148	69	89	224	51	251	312	57	193	193	83	115	232				
Protezione sportelli	236	34	158	359	265	351	399	158	230	212	98	123	284	75	260	340	79	202	271	120	152	323	137			

Figura 7.4

In figura 7.4 sono riportati i valori degli indici X_{hi} esprimenti l'ammontare complessivo degli ordini che richiedono l'assemblaggio di entrambi i componenti di una specifica coppia di task.

In figura 7.5 sono riportati i valori degli indici Y_{hi} esprimenti l'ammontare degli ordini che richiedono l'assemblaggio di solo uno dei due elementi di una coppia di task OPT.

In figura 7.6 sono riportati i valori degli indici Z_{hi} esprimenti l'ammontare degli ordini che non richiedono l'esecuzione di nessuno dei due task opzionali considerati.

Yhi	Fari fendinebbia anteriori	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente led	Adaptive cruise control	Luci emergenza automat	Sens parch ant	Sens parch post	Telecam post	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneum	Controllo di corsia	Parchegg assistito	Protezione sportelli
Fari fendinebbia anteriori	493																							
Tettuccio apribile	498	361																						
Cerchi in lega	484	743	620																					
Clima bizona	494	597	524	456																				
Navigatore	414	766	609	292	425																			
Radio bluetooth	493	850	639	246	407	130																		
Ingresso USB	501	404	451	561	523	574	574																	
Sedili in pelle	480	509	478	463	494	467	475	511																
Volante in pelle	468	475	482	511	488	499	515	481	166															
Wi-fi	511	266	425	667	567	680	748	406	517	487														
Illuminazione ambiente led	512	329	448	627	550	637	687	475	490	470	385													
Adaptive cruise control	503	662	557	382	475	364	334	419	519	547	628	587												
Luci emergenza automat	495	230	403	709	559	726	776	436	507	477	308	379	522											
Sens parch ant	525	602	529	417	497	434	406	508	489	493	538	547	456	574										
Sens parch post	552	746	578	319	446	319	253	553	474	510	661	628	383	681	183									
Telecam post	497	232	407	700	581	710	760	432	515	487	308	387	620	286	496	605								
City braking	510	463	490	492	508	521	537	487	500	488	481	484	531	497	235	374	449							
Start and stop	499	599	549	442	475	428	398	534	463	485	578	573	466	580	466	415	562	509						
Rilevatore luce pioggia	493	296	421	630	563	656	692	446	525	489	358	413	616	354	546	641	342	481	560					
Controllo pressione pneum	498	347	448	622	534	611	637	449	522	492	401	426	565	385	527	586	379	472	523	401				
Controllo di corsia	472	681	574	350	446	379	311	523	502	520	621	616	399	631	459	380	631	514	433	599	568			
Parchegg assistito	510	347	456	600	532	633	653	443	520	494	383	432	563	389	413	474	379	392	551	403	412	576		
Protezione sportelli	457	448	457	519	513	558	552	506	497	485	444	483	562	460	514	537	454	493	514	448	457	513	472	

Figura 7.5

Zhi	Fari fendinebbia anteriori	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente led	Adaptive cruise control	Luci emergenza automat	Sens parch ant	Sens parch post	Telecam post	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneum	Controllo di corsia	Parchegg assistito	Protezione sportelli
Fari fendinebbia anteriori																								
Tergi fanali anteriori	463																							
Tettuccio apribile	332	607																						
Cerchi in lega	114	184	117																					
Clima bizona	199	354	262	64																				
Navigatore	89	161	111	38	68																			
Radio bluetooth	46	74	51	16	32	62																		
Ingresso USB	306	561	409	122	238	104	59																	
Sedili in pelle	249	441	328	104	185	90	41	287																
Volante in pelle	279	482	350	104	212	98	45	326	416															
Wi-fi	392	721	513	160	307	142	63	498	375	414														
Illuminazione ambiente led	347	645	457	136	271	119	49	419	344	378	555													
Adaptive cruise control	151	278	202	58	108	55	25	191	129	139	233	209												
Luci emergenza automat	415	754	539	154	326	134	64	498	395	434	653	573	301											
Sens parch ant	188	359	264	88	145	68	37	250	192	214	326	277	122	323										
Sens parch post	83	198	148	46	79	34	22	136	108	114	173	145	67	178	215									
Telecam post	413	752	536	158	314	141	71	499	390	428	652	568	251	678	361	215								
City braking	264	494	352	119	208	93	40	329	255	285	423	377	153	430	349	188	453							
Start and stop	190	348	243	65	145	60	30	226	194	207	295	253	106	309	154	88	317	201						
Rilevatore luce pioggia	377	682	491	155	285	130	67	454	347	389	589	517	215	606	298	159	611	399	280					
Controllo pressione pneum	338	620	441	122	263	116	58	416	312	351	531	474	204	554	271	150	556	367	262	507				
Controllo di corsia	152	254	179	59	108	33	22	180	123	138	222	180	88	232	106	54	231	147	108	209	188			
Parchegg assistito	340	628	445	141	272	113	58	427	321	358	548	479	213	560	336	214	564	415	256	514	473	192		
Protezione sportelli	307	518	385	122	222	91	49	336	273	303	458	394	154	465	226	123	467	305	215	432	391	164	391	

Figura 7.6

t_{hi}	Fan fendinebbia anteriori	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente	Adaptive cruise control	Luci emergenza automat	Sens parch ant	Sens parch post	Telecam post	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneum	Controllo di corsia	Parcheggi assistito	Protezione sportelli	
Fan fendinebbia anteriori	1																								
Tergi fanali anteriori	0,278	1																							
Tettuccio apribile	0,701	0,195	1																						
Cerchi in lega	0,426	0,652	0,299	1																					
Clima bizona	0,794	0,221	0,883	0,338	1																				
Navigatore	0,37	0,75	0,26	0,87	0,294	1																			
Radio bluetooth	0,574	0,484	0,403	0,742	0,456	0,645	1																		
Ingresso USB	0,333	0,833	0,234	0,783	0,265	0,9	0,581	1																	
Sedili in pelle	0,38	0,732	0,266	0,891	0,301	0,976	0,661	0,878	1																
Volante in pelle	0,481	0,577	0,338	0,885	0,382	0,769	0,839	0,692	0,788	1															
Wi-fi	0,889	0,313	0,623	0,479	0,706	0,417	0,646	0,375	0,427	0,542	1														
Illuminazione ambiente	0,583	0,476	0,409	0,73	0,463	0,635	0,984	0,571	0,651	0,825	0,656	1													
Adaptive cruise control	0,444	0,625	0,312	0,958	0,353	0,833	0,774	0,75	0,854	0,923	0,5	0,762	1												
Luci emergenza automat	0,481	0,577	0,338	0,885	0,382	0,769	0,839	0,692	0,788	1	0,542	0,825	0,923	1											
Sens parch ant	0,556	0,5	0,39	0,767	0,441	0,667	0,968	0,6	0,683	0,867	0,625	0,952	0,8	0,867	1										
Sens parch post	0,62	0,448	0,435	0,687	0,493	0,597	0,925	0,537	0,612	0,776	0,698	0,94	0,716	0,776	0,896	1									
Telecam post	0,75	0,37	0,526	0,568	0,596	0,494	0,765	0,444	0,506	0,642	0,844	0,778	0,593	0,642	0,741	0,827	1								
City braking	0,864	0,24	0,812	0,368	0,919	0,32	0,496	0,288	0,328	0,416	0,768	0,504	0,384	0,416	0,48	0,536	0,648	1							
Start and stop	0,844	0,234	0,831	0,359	0,941	0,313	0,484	0,281	0,32	0,406	0,75	0,492	0,375	0,406	0,469	0,523	0,633	0,977	1						
Rilevatore luce pioggia	0,537	0,517	0,377	0,793	0,426	0,69	0,935	0,621	0,707	0,897	0,604	0,921	0,828	0,897	0,967	0,866	0,716	0,464	0,453	1					
Controllo pressione pneum	0,407	0,682	0,286	0,957	0,324	0,909	0,71	0,818	0,932	0,846	0,458	0,698	0,917	0,846	0,733	0,657	0,543	0,352	0,344	0,759	1				
Controllo di corsia	0,528	0,526	0,37	0,807	0,419	0,702	0,919	0,632	0,719	0,912	0,594	0,905	0,842	0,912	0,95	0,851	0,704	0,456	0,445	0,983	0,772	1			
Parcheggi assistito	0,815	0,341	0,571	0,523	0,647	0,455	0,705	0,409	0,466	0,591	0,917	0,716	0,545	0,591	0,682	0,761	0,92	0,704	0,688	0,659	0,5	0,648	1		
Protezione sportelli	0,185	0,667	0,13	0,435	0,147	0,5	0,323	0,556	0,488	0,385	0,208	0,317	0,417	0,385	0,333	0,299	0,247	0,16	0,156	0,345	0,455	0,351	0,227	1	

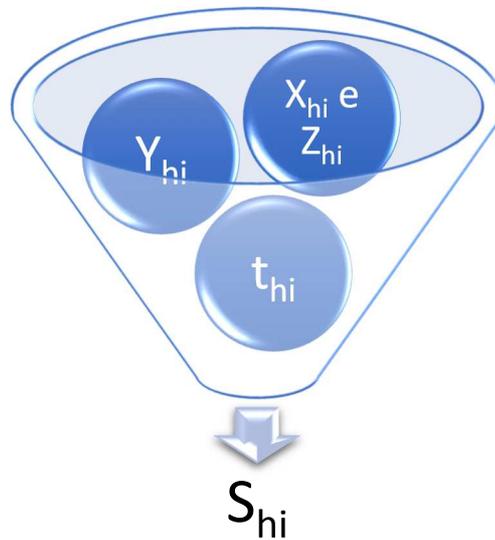
Figura 7.7

In figura 7.7 sono riportati i valori delle comparabilità dei tempi t_{hi} espressi mediante la formulazione

$$t_{hi} = \frac{\min(t_h; t_i)}{\max(t_h; t_i)} \quad (9b)$$

Tali indici sono essenziali ai fini del calcolo dell'indice di similarità problem-oriented.

7.3. Calcolo degli indici di similarità S_{hi}



Una volta individuati i valori dei parametri X_{hi} , Y_{hi} , Z_{hi} e t_{hi} per ogni coppia non ordinata (h,i) di optional, è possibile procedere con il calcolo dei rispettivi indici di similarità mediante la formula

$$S_{hi} = \frac{(X_{hi} + Z_{hi}) \cdot t_{hi}}{(X_{hi} + Z_{hi}) \cdot t_{hi} + (1,2 - t_{hi}) \cdot Y_{hi}} \quad (10)$$

analizzata nell'apposita sezione 4.1.

Si ottiene la matrice di similarità individuata in figura 7.8. Tale matrice fungerà da base applicativa per l'algoritmo di clustering UPGMA.

Si noti che, come tutte le matrici individuate nel paragrafo precedente, anch'essa risulta essere simmetrica, a causa della costruzione di tutti gli indici fin qui riportati, compreso l'indice di similarità. Ciò avviene perché tali indici sono calcolati per coppie non ordinate di OPT, in conformità all'uso pratico per il quale sono stati costruiti. Non si vuole, infatti, stabilire relazioni tra optional in base alla loro reale successione temporale di esecuzione all'interno di un dato ordine, bensì solamente individuare la loro richiesta congiunta all'interno degli ordini presenti nel piano di produzione e la loro similarità in termini di frequenza e di tempi.

Shi	Fari fendinebbia anteriori	Tergi fanali anteriori	Tettuccio apribile	Cerchi in lega	Clima bizona	Navigatore	Radio bluetooth	Ingresso USB	Sedili in pelle	Volante in pelle	Wi-fi	Illuminazione ambiente led	Adaptive cruise control	Luci emergenza automat	Sens parch ant	Sens parch post	Telecam post	City braking	Start and stop	Rilevatore luce pioggia	Controllo pressione pneum	Controllo di corsia	Parchegg assistito	Protezione sportelli
Fari fendinebbia anteriori																								
Tergi fanali anteriori	0,237																							
Tettuccio apribile	0,586	0,255																						
Cerchi in lega	0,37	0,292	0,169																					
Clima bizona	0,667	0,132	0,717	0,319																				
Navigatore	0,387	0,337	0,151	0,865	0,305																			
Radio bluetooth	0,485	0,107	0,222	0,832	0,472	0,886																		
Ingresso USB	0,277	0,77	0,228	0,595	0,205	0,69	0,41																	
Sedili in pelle	0,334	0,601	0,237	0,77	0,256	0,832	0,576	0,723																
Volante in pelle	0,432	0,506	0,296	0,729	0,329	0,642	0,686	0,595	0,906															
Wi-fi	0,732	0,493	0,594	0,249	0,522	0,2	0,282	0,399	0,34	0,464														
Illuminazione ambiente led	0,474	0,573	0,389	0,48	0,34	0,39	0,675	0,501	0,552	0,713	0,658													
Adaptive cruise control	0,368	0,357	0,218	0,865	0,315	0,799	0,784	0,698	0,696	0,734	0,297	0,55												
Luci emergenza automat	0,406	0,756	0,367	0,535	0,269	0,403	0,401	0,638	0,651	0,846	0,649	0,783	0,753											
Sens parch ant	0,438	0,321	0,3	0,712	0,37	0,62	0,859	0,492	0,58	0,728	0,483	0,761	0,705	0,659										
Sens parch post	0,465	0,169	0,293	0,741	0,464	0,679	0,909	0,396	0,536	0,638	0,416	0,682	0,705	0,462	0,929									
Telecam post	0,628	0,596	0,532	0,278	0,415	0,222	0,357	0,436	0,407	0,548	0,842	0,745	0,374	0,742	0,621	0,592								
City braking	0,712	0,225	0,685	0,314	0,76	0,251	0,378	0,25	0,273	0,358	0,657	0,436	0,294	0,349	0,685	0,575	0,59							
Start and stop	0,704	0,14	0,649	0,351	0,801	0,32	0,506	0,211	0,297	0,352	0,549	0,341	0,342	0,27	0,423	0,522	0,465	0,808						
Rilevatore luce pioggia	0,454	0,643	0,386	0,534	0,3	0,415	0,612	0,571	0,565	0,755	0,645	0,824	0,581	0,844	0,775	0,592	0,74	0,405	0,323					
Controllo pressione pneum	0,341	0,712	0,278	0,705	0,244	0,666	0,452	0,724	0,761	0,712	0,48	0,652	0,714	0,793	0,585	0,461	0,575	0,317	0,268	0,72				
Controllo di corsia	0,468	0,268	0,249	0,792	0,4	0,698	0,879	0,503	0,597	0,745	0,374	0,656	0,78	0,65	0,817	0,799	0,453	0,367	0,436	0,752	0,578			
Parchegg assistito	0,67	0,428	0,52	0,34	0,507	0,261	0,43	0,394	0,369	0,498	0,839	0,66	0,393	0,604	0,652	0,658	0,844	0,688	0,522	0,644	0,505	0,463		
Protezione sportelli	0,178	0,606	0,126	0,345	0,117	0,361	0,23	0,457	0,409	0,334	0,208	0,278	0,293	0,356	0,267	0,222	0,238	0,137	0,124	0,332	0,42	0,282	0,207	

Figura 7.8

7.4. Individuazione del valore di taglio

Prima di applicare l'algoritmo UPGMA per il clustering degli OPT occorre individuare il valore di taglio ottimale in corrispondenza del quale interrompere l'algoritmo stesso allo scopo di individuare i cluster formati.

Seguendo la procedura descritta nel paragrafo 4.3 della presente tesi, occorre in primo luogo calcolare la media M dei valori degli indici di similarità. Essa in particolare risulta pari a 0,5039.

Si può notare che non ci sono valori che costituiscono particolari divergenze dalla maggioranza degli altri, questo perché anche i valori di similarità più bassi non si discostano molto da quelli immediatamente più alti. Si ha in pratica una distribuzione abbastanza uniforme dei valori degli indici rispetto agli altri. Di conseguenza, per il calcolo di M si è proceduto includendo tutti i valori degli indici calcolati.

Si procede successivamente con la correzione eventuale di tale valore di taglio in base alla distribuzione reale dei valori degli indici di similarità lungo l'intervallo [0;1] dei possibili valori che può assumere. Si calcola quindi $V_{max}-V_{min}$. Si può osservare che $V_{max} = 0,9292$ mentre $V_{min} = 0,1065$. Il valore della differenza tra questi due valori risulta pertanto essere pari a 0,8227. In base alla procedura delineata, essendo tale differenza superiore a 0,8 occorre correggere il valore M aggiungendo una quantità pari a 0,2.

In definitiva, il valore di taglio reale relativo all'algoritmo UPGMA risulta essere $M + 0,2 = 0,7039$. Se, in una n-esima iterazione dell'algoritmo di clustering il valore di similarità massimo da utilizzare come input risulta inferiore a tale VT, allora l'algoritmo verrà fermato e verranno definiti i cluster risultanti dalle aggregazioni di nodi eseguite in precedenza.

7.5. Algoritmo UPGMA

Nell'applicazione di un algoritmo UPGMA si procede iterativamente con i seguenti passi:

1. Individuazione valore massimo di similarità;
2. Inserimento degli OPT o dei cluster di OPT all'interno del medesimo cluster;
3. Ricalcolo degli indici di similarità mediante la formulazione

$$SR = \frac{1}{r \cdot t} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t S [X_i, X_j] \quad (11);$$

4. Costruzione della matrice di similarità ridotta. A ogni passo dell'algoritmo di clustering infatti il numero di righe e di colonne si riduce di un'unità contestualmente all'inclusione di un OPT o di un cluster all'interno di un altro cluster con il quale ha il massimo valore di similarità;
5. Ripeti da step 1.

I valori degli indici di similarità massimi individuati nello step 1 di ogni iterazione tendono a convergere più o meno rapidamente verso il valore di taglio consentendo un più o meno rapido stop all'esecuzione dell'algoritmo di clustering.

A titolo esemplificativo, si riportano alcuni passi dell'algoritmo di clustering. I nomi degli OPT sono stati abbreviati per ragioni di maggiore chiarezza.

1^a iterazione:

Vmax = 0,9292 tra sensori di parcheggio anteriori e sensori di parcheggio posteriori

C1 = sensori anteriori + sensori posteriori

	C1
C1	
fari	0,451522
tergi	0,244638
tetto	0,296581
cerch	0,726341
clima	0,417141
navi	0,649317
radio	0,883872
usb	0,443957
sedili	0,558056
volnt	0,682689
Wi-fi	0,449486
led	0,721536
cruise	0,704692
emerg	0,560177
telec	0,606319
brake	0,629619
start	0,472577
luce	0,683441
press	0,522878
corsia	0,808225
parch	0,654921
sport	0,244386

Figura 7.9

In figura 7.9 sono riportati i valori degli indici di similarità ricalcolati con (11). Il resto della matrice di similarità rimane invariato.

2^a iterazione:

V_{max} = 0,9059

C2 = sedili in pelle + volante in pelle

	C1	C2
C1		
C2	0,620373	
fari	0,451522	0,383149
tergi	0,244638	0,553468
tetto	0,296581	0,266806
cerch	0,726341	0,749308
clima	0,417141	0,292454
navi	0,649317	0,737112
radio	0,883872	0,630918
usb	0,443957	0,659173
Wi-fi	0,449486	0,402382
led	0,721536	0,632634
cruise	0,704692	0,715019
emerg	0,560177	0,748222
telec	0,606319	0,477569
brake	0,629619	0,315476
start	0,472577	0,324515
luce	0,683441	0,660003
press	0,522878	0,736301
corsia	0,808225	0,671417
parch	0,654921	0,433924
sport	0,244386	0,371562

Figura 7.10

3^a iterazione:

V_{max} = 0,8861

C3: radio bluetooth + navigatore

4^a iterazione:

V_{max} = 0,8651

C4: cerchi in lega + cruise control

5^a iterazione:

V_{max} = 0,8436

C5 = telecamera posteriore + parcheggio assistito

6^a iterazione:

Vmax = 0,8435

C6 = luci di emergenza automatiche + rilevatore luce e pioggia

7^a iterazione:

Vmax = 0,8404

C5 = telecamera posteriore + parcheggio assistito + wi-fi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1						
C2	0,620373					
C3	0,766594	0,684015				
C4	0,715516	0,732164	0,819873			
C5	0,63062	0,455747	0,317797	0,346177		
C6	0,621809	0,704113	0,457524	0,600721	0,682263	
fari	0,451522	0,383149	0,436302	0,368653	0,64902	0,430256
tergi	0,244638	0,553468	0,221952	0,324288	0,511967	0,699587
tetto	0,296581	0,266806	0,186286	0,193504	0,526161	0,376635
clima	0,417141	0,292454	0,388418	0,317113	0,461338	0,284593
usb	0,443957	0,659173	0,550182	0,646336	0,415092	0,604589
Wi-fi	0,449486	0,402382	0,241066	0,273246	0,840412	0,647068
led	0,721536	0,632634	0,532681	0,515333	0,702568	0,803579
brake	0,629619	0,315476	0,314228	0,30356	0,638952	0,377118
start	0,472577	0,324515	0,412937	0,346504	0,493677	0,26921
press	0,522878	0,736301	0,558748	0,709167	0,540105	0,756105
corsia	0,808225	0,671417	0,78829	0,7861	0,458317	0,700703
spport	0,244386	0,371562	0,295578	0,319002	0,22238	0,344155

Figura 7.11

8^a iterazione:

Vmax = 0,8199

Si uniscono i cluster C3 e C4

	C1	C2	C3	C4
C1				
C2	0,620373			
C3	0,766594	0,684015		
C4	0,715516	0,732164	0,819873	
C5	0,570242	0,437959	0,29222	0,321867

Figura 7.12

Procedendo, si arriva alla 16^a iterazione in cui il valore massimo di similarità risulta essere pari a $0,6943 < 0,7039$. In presenza di ciò, l'algoritmo viene interrotto e si possono indicare quelli che sono i cluster di OPT risultanti.

In particolare, si individuano 6 cluster di optional che racchiudono 21 dei 24 OPT studiati.

Cluster:

C1 = sensori di parcheggio anteriori e posteriori + controllo di corsia + radio bluetooth + navigatore + cerchi in lega + cruise control

C2 = volante in pelle + sedili in pelle + controllo di pressione pneumatici

C3 = telecamera posteriore + parcheggio assistito + wi-fi

C4 = luci di emergenza automatiche + rilevatore luce e pioggia + illuminazione ambientale led

C5 = city braking + start and stop + clima bizona

C6 = tergi fanali anteriori + ingresso USB

OPT fuori cluster: fari fendinebbia anteriori, tettuccio apribile, protezione sportelli.

7.6. Bilanciamento linea di assemblaggio

La presente clusterizzazione degli OPT può successivamente essere impiegata come input per un bilanciamento della linea di assemblaggio manuale.

La linea guida principale sarebbe evitare l'assegnamento di OPT appartenenti allo stesso cluster alle stesse stazioni, cercando di spalmarli il più possibile lungo le stazioni dell'intera linea.

Tuttavia, tale ragionamento si basa su un'ipotesi semplificativa di non avere task classici da eseguire per ogni ordine.

Il presente caso studio è stato approfondito da Irene Carpi e Federico Disanto mediante l'impiego del modello di ottimizzazione che considera anche l'esistenza di task classici e XOR. In particolare, è stata ipotizzata l'esistenza di 100 ulteriori task da eseguire per ognuno dei mille ordini analizzati, con tempi di processamento specifici.

Successivamente, mediante l'impiego del software di supporto alla ricerca operativa AMPL, e supponendo di conoscere il diagramma delle precedenze complessivo contenente tutti i task indipendentemente dalla loro natura, è stato possibile pervenire ad una soluzione ottimale del caso studio in esame. In particolare, sono stati individuate tre possibili soluzioni, comprendenti l'impiego di 26, 28 e 30 stazioni, in cui i task complessivamente eseguiti sono spalmati in maniera essenzialmente uniforme lungo la linea. Per una visualizzazione esaustiva della soluzione si rimanda comunque alle tesi di Federico Disanto e Irene Carpi esplicitate nell'apposita sezione della bibliografia. Vi è comunque da tenere in conto l'effettiva possibilità e altresì la convenienza di aprire un numero di stazioni come indicato nella soluzione oppure se è necessario fissare preventivamente un upper bound.

8. CLUSTER ANALYSIS

A valle della procedura di clustering degli OPT, è ragionevole proporre un'analisi per determinare l'effettivo grado di ottimalità del raggruppamento in cluster dei task opzionali. Questo soprattutto per dedurre in maniera immediata le performance effettive dell'algoritmo di clustering impiegato, e stabilire se possano essere fatti interventi migliorativi all'interno dell'analisi.

Si procede quindi ad una cluster analysis andando a specificare alcuni KPI (Key Performance Indicators) opportuni per valutare specifici aspetti prestazionali del clustering.

In particolare, per il calcolo numerico esemplificativo dei KPI indicati, si fa riferimento al caso studio trattato nel capitolo precedente.

8.1. Indice di impiego totale

Un primo indicatore, semplice e intuitivo da individuare, è rappresentato da quanti ordini richiedono l'assemblaggio di tutti gli OPT che sono confluiti in un determinato cluster. Se il valore di tale KPI è sufficientemente alto, allora è indicativo del fatto che il clustering ha asservito allo scopo prefissato, ovvero raggruppare tra loro OPT che sono spesso assemblati insieme.

L'importanza di calcolare questo indicatore risiede nel fatto che, nella formulazione (10) per il calcolo dell'indice di similarità, un valore di similarità elevato non è frutto solo degli ordini che richiedono l'assemblaggio di entrambi i membri di una coppia di OPT ma è anche influenzato dagli ordini che non richiedono l'esecuzione di nessuno dei due task opzionali considerati. Inoltre, sono state considerate anche le comparabilità dei tempi di assemblaggio, che hanno comunque un'incidenza quanto più i tempi di esecuzione sono vicini o lontani tra loro indipendentemente dall'effettiva combinazione di assemblaggio-non assemblaggio dei due task in un dato insieme di ordini. In altre parole, non è detto, per quanto sia auspicabile, che la quasi totalità degli ordini richiedano l'assemblaggio di tutti gli elementi del cluster c-esimo.

La formulazione di un indice di performance di questo tipo è la seguente:

$$IT_c = \text{indice di impiego totale} = \frac{\text{numero ordini che richiedono tutti gli OPT del cluster } c}{\text{ordini totali}} \quad (12)$$

Calcolando tale indicatore per ogni cluster si ottiene:

CLUST	IT
C1	0,197
C2	0,137
C3	0,012
C4	0,015
C5	0,176
C6	0,035

Si può subito notare come i valori degli indicatori di impiego totale non sono elevati. Questo in parte perché in realtà non andrebbe considerato a denominatore il totale degli ordini, bensì *la massima richiesta tra gli OPT nel cluster*. Questo perché ci sono OPT che sul totale ordini hanno richieste notevolmente basse che influenzano in maniera massiccia il rendimento di tale indicatore. Considerare solo gli ordini che richiedono l'OPT a richiesta massima all'interno di uno specifico cluster e, tra questi, conteggiare il totale degli ordini che richiedono l'esecuzione di tutti i task che sono congiunti nello stesso cluster dell'OPT considerato, può risultare una più opportuna analisi prestazionale.

Inoltre, per la formulazione della similarità come espressa dalla (10), la similarità tra OPT aumenta anche in corrispondenza di un non assemblaggio di entrambi gli OPT considerati nel calcolo di ogni S_{hi} . Di conseguenza, per come sono definiti, è normale che gli indici di impiego totale possano venire relativamente bassi.

Analizzando, per esempio, il cluster C1 l'indice di impiego totale esprime come vi sia un 19,7% di possibilità che un nuovo ordine, 1001, richieda l'assemblaggio di tutti gli elementi del cluster.

8.2. Deviazioni percentuali dalla frequenza media e dal tempo medio

Due ulteriori indicatori di performance possono essere individuati andando a calcolare, per ogni cluster definito a valle dell' algoritmo UPGMA, quali sono la richiesta media degli OPT nel cluster e il loro tempo medio di assemblaggio. Successivamente, si può andare a calcolare, per ogni OPT interno al cluster, la deviazione assoluta e percentuale della richiesta e del tempo di assemblaggio puntuali rispetto alla media del cluster.

Per il caso studio in esame, si hanno le seguenti tabelle relative ai tempi e alle frequenze di richiesta:

C1	Cerchi in lega	Navigatore	Radio bluetooth	Adaptive cruise control	Sens parch ant	Sens parch post	Controllo di corsia			C4	Illuminaz ambient led	Rilevator luce pioggia	Luci emerg automat
f	805	828	918	698	602	785	727			f	297	256	178
t	230	200	310	240	300	335	285			t	315	290	260
C2	Sedili in pelle	Volante in pelle	Controllo pressione pneum							C5	Clima bizona	City braking	Start and stop
f	525	477	329							f	611	465	624
t	205	260	220							t	680	625	640
C3	Telecam post	Wi-fi	Parchegg assistito							C6	Tergi fanali anteriori	Ingresso USB	
f	180	208	313							f	84	390	
t	405	480	440							t	150	180	

Figura 8.1

dove f rappresenta la frequenza unitaria di richiesta per ogni OPT e t rappresenta il tempo di assemblaggio richiesto dal singolo task opzionale.

Per ogni cluster, si può calcolare la media aritmetica delle frequenze e dei tempi di assemblaggio, e individuare per ogni OPT la deviazione assoluta dalla media così calcolata, espressa come differenza tra il valore di frequenza (o di tempo) del singolo OPT e il valore medio di frequenza (o di tempo) del cluster cui appartiene l'OPT, il tutto incluso in valore assoluto per rendere tale grandezza positiva. In figura 8.2 è riportato un istogramma relativo alla deviazione dalle frequenze medie, caratterizzate dalle barre rosse. Le barre blu invece identificano la domanda relativa al singolo OPT.

Successivamente, calcolando il rapporto tra la deviazione assoluta e la frequenza di richiesta del singolo OPT è possibile trovare la deviazione percentuale del singolo OPT dalla media, ovvero di quale percentuale l'OPT considerato si discosta dalla media. Tale percentuale è calcolata considerando a denominatore la richiesta sul totale ordini dell'OPT considerato. I dati derivanti da tale analisi sono riportati in figura 8.3.

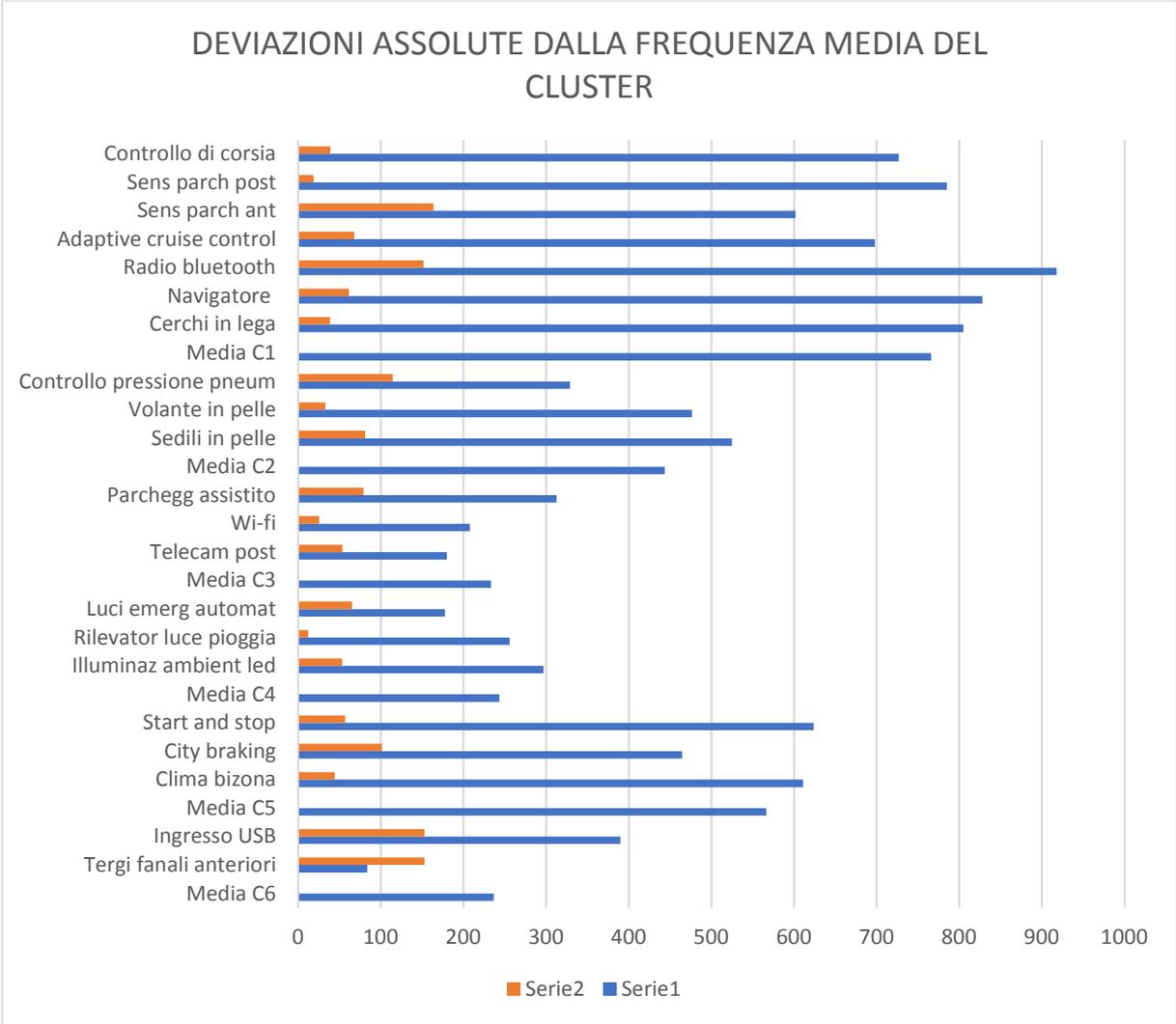


Figura 8.2

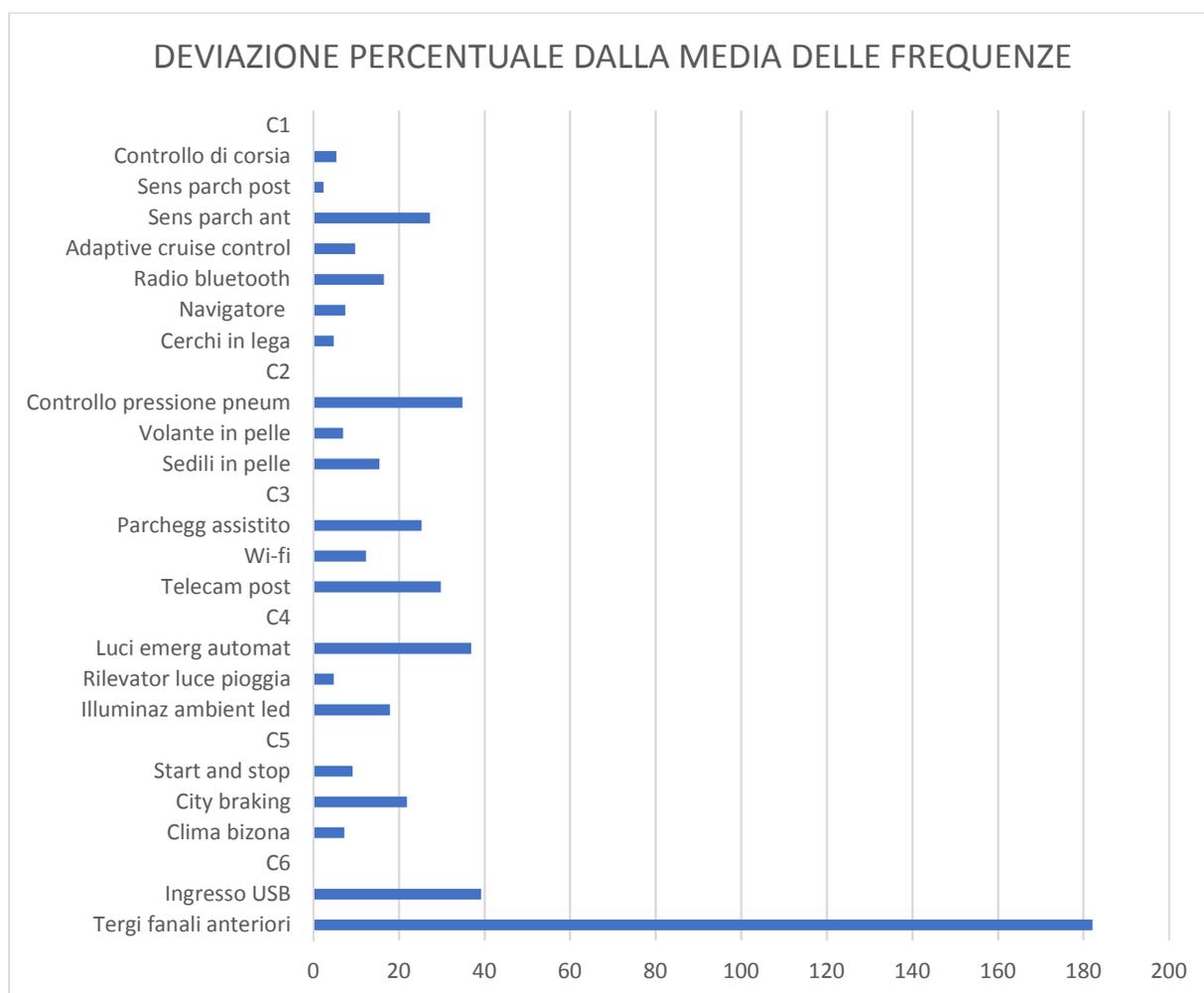


Figura 8.3

Dalla figura 8.3 si evince come dal punto di vista delle frequenze di richiesta i cluster funzionino abbastanza bene, in quanto, con le dovute eccezioni, quasi tutti i valori percentuali degli scostamenti si collocano al di sotto del 20% dei valori unitari di domanda del singolo OPT. L'unica grossa eccezione è rappresentata dal cluster C6, in cui uno scostamento del 182% dalla media rispetto alla domanda effettiva dell'OPT "tergi fanali anteriori" è dovuto in larga parte alla differenza di domanda esistente tra gli OPT inclusi in tale cluster, come si può evincere dalla figura 8.1.

Nelle figure 8.4 e 8.5 sono riportati i grafici relativi ai calcoli analoghi eseguiti considerando i tempi di assemblaggio di ogni OPT.

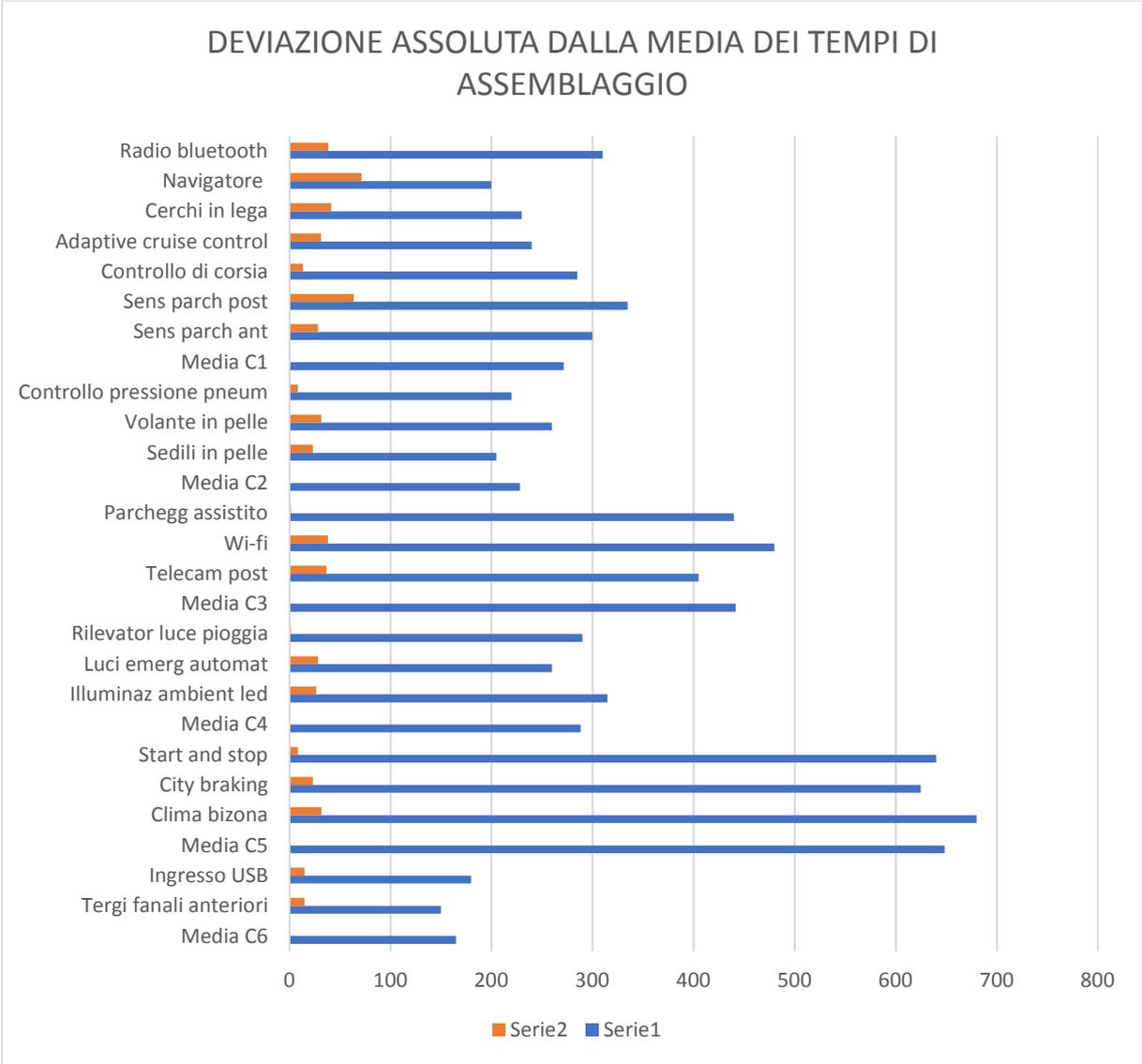


Figura 8.4

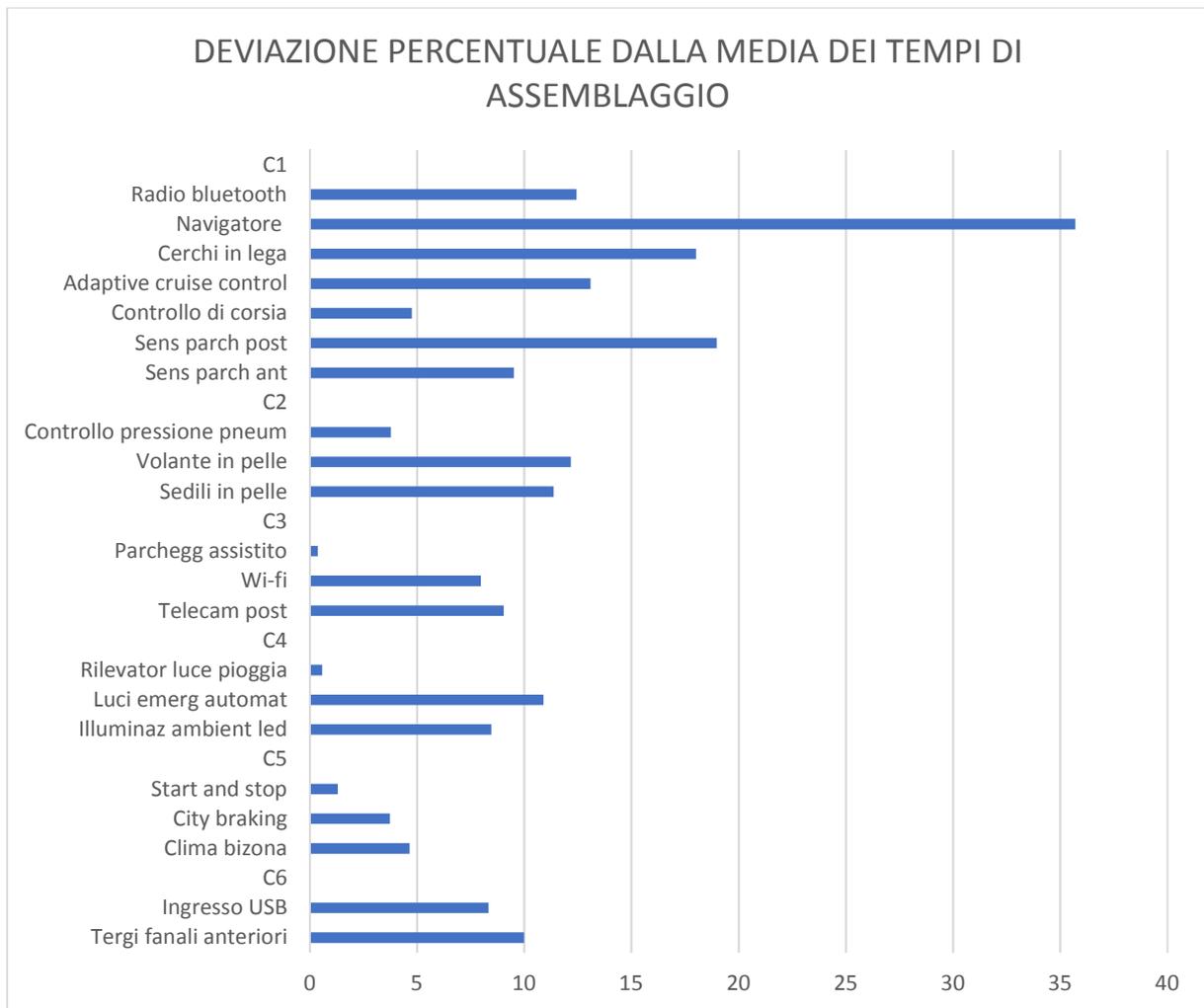


Figura 8.5

Si può notare come, in linea generale, le deviazioni dai tempi medi siano molto più contenute in termini percentuali rispetto alle deviazioni dalle frequenze, fatte salve le eccezioni; in altre parole si può concludere che il clustering eseguito sul caso studio in esame ottimizza in particolar modo le deviazioni dalla media dei tempi di assemblaggio, ma funziona in generale meno bene per quanto riguarda le deviazioni dalle frequenze di richiesta.

9. CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto come scopo quello di offrire una procedura ragionata per affrontare il problema del bilanciamento di una linea di assemblaggio considerando l'esistenza all'interno di un normale processo industriale non solo di task la cui esecuzione è richiesta dal 100% degli ordini, ma anche di operazioni che fanno parte di un pacchetto di opzioni aggiuntive proposte per soddisfare bisogni, esigenze e desideri specifici di un determinato cliente o gruppo di clienti. La customizzazione del prodotto, ponendo a disposizione un ampio ventaglio di scelte, è oggi un fattore di vantaggio competitivo per le aziende, in un'ottica che tende alla mass customization.

Di conseguenza, il problema di come gestire un processo industriale comprendente, immersi in una certa quantità di task classici, un numero più o meno grande di task opzionali, richiesti da un sottoinsieme degli ordini totali, è di non semplice soluzione e richiede una certa sensibilità e conoscenza del processo stesso.

La procedura illustrata nella presente tesi non intende essere autoconclusiva. La cluster analysis relativa al caso studio trattato ha evidenziato come ci siano decisi margini di miglioramento per quanto riguarda l'efficienza di un algoritmo di clustering volto a raggruppare OPT in gruppi che portino al loro assegnamento alle diverse stazioni componenti la linea. Inoltre, lo stesso indice di similarità formulato rappresenta il risultato di uno studio che può e deve essere raffinato in un'ottica di miglioramento continuo delle performance dei vari passaggi della procedura illustrata.

Per l'algoritmo UPGMA si può stabilire in maniera diversa il valore ottimale di taglio, considerando metodologie diverse dal calcolo della media semplice, come, per esempio, sfruttando la teoria relativa ai valori di taglio in corrispondenza di un dato percentile.

In definitiva, l'analisi proposta rappresenta un'analisi decisamente parziale, che richiede sforzi integrativi e migliorativi in studi futuri allo scopo di perfezionare una procedura di supporto a decisioni che ricoprono un ruolo determinante nei processi del panorama competitivo globale a livello produttivo.

Esempi di studi implementabili possono riguardare l'utilizzo di un indice di similarità diverso e possibilmente migliore. Oppure, come detto, l'accantonamento di un processo di selezione del valore di similarità di taglio basato sulla media aritmetica dei valori degli indici di similarità

in favore di metodologie meno di massima e che considerino anche parametri maggiormente legati al processo reale da ottimizzare.

In conclusione, lo scopo principale dello studio condotto non è assolutamente fornire un manuale contenente regole assolutamente da seguire. All'opposto nasce con la consapevolezza di essere migliorabile, modificando le equazioni e le formule fornite, implementando scelte differenti per l'individuazione dei cluster, e seguendo strategie differenti per il bilanciamento finale della linea.

La finalità ultima è stata piuttosto fornire una procedura standard, corredata di proposte ragionate di metodologie di calcolo, per l'assegnamento di task opzionali ad una linea di assemblaggio. Essa si compone principalmente di tre fasi:

1. Analisi del database relativo agli OPT considerati: nella presente analisi sono stati considerati solo la frequenza più o meno congiunta di richieste di coppie di OPT considerando gli ordini in ingresso, e i tempi necessari per l'espletamento del task di assemblaggio correlato;
2. Clustering degli OPT: rappresenta il cuore della procedura in esame, in quanto consente, qualora eseguito con motivazioni e strumenti ragionevoli, di individuare gruppi di task la cui esecuzione più o meno congiunta è richiesta da un certo ammontare di ordini e pertanto rischia di rappresentare uno dei classici colli di bottiglia che peggiorano le prestazioni della linea qualora non fossero trattati con attenzione;
3. Assegnamento effettivo dei task OPT considerando l'interezza dei task lavorabili nel processo produttivo di assemblaggio.

Tale processo dovrebbe rappresentare una solida base di appoggio per qualunque processo decisionale affine al problema del bilanciamento di task opzionali. Un problema sicuramente dagli ampi risvolti futuri in un mondo industriale in rapida e continua mutazione.

10. BIBLIOGRAFIA

Tesi correlate:

Carpi, I. (2019): *Bilanciamento di linee di assemblaggio con optional – ingombri*

Disanto, F. (2019): *Sviluppo di un modello matematico per integrare il feeding dei materiali nella progettazione di una linea di montaggio multiprodotto*

Libri e paper scientifici:

Scholl, A. (1995): *Balancing and sequencing of assembly lines*

Rekiek B., Dolgui A., Delchambre A., Bratcu A. (2002): *State of art of optimization methods for assembly line design*

Hu S.J et al. (2011): *Assembly system design and operations for product variety*

Bortolini M., Faccio M., Gamberi M., Pilati F. (2017): *Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk*

Battini D., Faccio M., Persona A., Sgarbossa F. (2008): *Balancing-sequencing procedure for a mixed-model assembly system in case of finite buffer capacity*

Yamashita H., Altiok T. (1998): *Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines*

Bryan A., Hu S.J., Koren Y. (2007): *Concurrent design of product families and assembly systems*

Kottas J.F., Lau H. (1981): *A stochastic line balancing procedure*

Perlich C., Rosset S. (2007): *Identifying bundles of product options using mutual information clustering*

Modrak V., Marton D., Bednar S. (2014): *The influence of mass customization strategy on configuration complexity of assembly systems*

Pareschi A., Ferrari E., Persona A., Regattieri A. (2002): *Logistica integrata e flessibile*