



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA DEI SISTEMI
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI

RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

***Job rotation nelle linee di montaggio single e
mixed-model con robot cooperanti: sviluppo di uno
strumento software per il bilanciamento***

SINTESI

RELATORI

Prof. Ing. Gino Dini
Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

Ing. Michela Dalle Mura
Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

IL CANDIDATO

Simone Corsinovi
s.corsinovi93@live.it

Sessione di Laurea Magistrale del 17/02/2021

Job rotation nelle linee di montaggio single e mixed-model con robot cooperanti: sviluppo di uno strumento software per il bilanciamento

Simone Corsinovi

Sommario

Il presente elaborato verte sullo sviluppo di un software per il bilanciamento delle linee di montaggio di uno o più modelli di prodotto, considerando l'impiego di robot cooperanti e l'adozione di una Job rotation, allo scopo di migliorare il benessere degli operatori riducendo l'insorgere sia di infortuni fisici sia di infortuni acustici.

Nella prima parte del lavoro è stato analizzato lo stato dell'arte dei modelli di bilanciamento delle linee di assemblaggio single e mixed-model, considerando la strategia di Job rotation e l'adozione di robot cooperanti col fine di minimizzare i rischi ergonomici degli operatori quali sforzo fisico e rumore percepito. Successivamente, è stato sviluppato il software e applicato ad un caso di studio analizzandone la soluzione. L'aspetto innovativo di questo lavoro è stato l'impiego di una Job rotation nel problema di bilanciamento di linea manuale con la presenza di robot cooperativi, per livellare tra gli operatori sia il dispendio energetico sia il rumore percepito mediante una loro rotazione tra le stazioni.

Abstract

This paper focuses on the development of software for balancing the assembly lines of one or more models, considering the use of cooperative robots and the adoption of a Job rotation.

In the first part of the work we analyzed the state of the art of balancing models of single and mixed-model assembly lines, considering the strategy of Job rotation and the adoption of cooperative robots in order to minimize the ergonomic risks of operators such as physical effort and perceived noise. In the work, a software tool has than been developed and applied to a case study for analyzing the solution. The innovative aspect of this work was the introduction of Job rotation in the manual line balancing problem with the presence of cooperative robots, to smooth both the energy expenditure and the perceived noise between the operators through their rotation between the stations.

1. Introduzione

Nel lontano 1913, quando Henry Ford introdusse per la prima volta la catena di montaggio nell'industria manifatturiera come una procedura standard, l'unico obiettivo era il perseguimento di un'ottimizzazione della linea di montaggio sotto il punto di vista della produttività, senza dare alcuna considerazione alla salute dei lavoratori. Solo nel 1959 con la nascita della IEA (International Ergonomics Association) si cominciò a dare un maggior peso al concetto di ergonomia per contribuire ad una miglior qualità della vita lavorativa. Tra i principali rischi ergonomici cui un operatore può andare in contro su una linea di assemblaggio ci sono: infortuni fisici dovuti al sollevamento di carichi eccessivi e danni al sistema uditivo a causa di un elevato rumore sull'impianto. Nelle industrie questi rischi ergonomici possono essere ridotti impiegando una job rotation e utilizzando dei robot cooperativi. L'adozione di una job rotation permette una distribuzione più equa dei rischi ergonomici tra i lavoratori mentre l'impiego di robot cooperanti contribuisce ad un calo della spesa energetica. Alla luce di queste considerazioni, è stato deciso di proporre un algoritmo multi-obiettivo in grado di bilanciare una linea di montaggio single e mixed model, eseguendo un'analisi sia sui costi necessari per progettare la linea sia sui rischi ergonomici.

2. Obiettivi del lavoro svolto

Per poter sviluppare il software, è stato inizialmente effettuato uno studio sia sulle tipologie di linee di assemblaggio presenti in letteratura, sia sui metodi impiegati per effettuare un loro bilanciamento. Dato che l'aspetto principale di questo problema è quello di ottimizzare l'ergonomia, è stato analizzato lo stato dell'arte sui metodi valutativi dei rischi causati sia dai movimenti e sforzi fisici, sia dal rumore percepito dagli operatori. Successivamente, è stato approfondito l'impiego della job rotation e l'utilizzo dei robot cooperanti nelle industrie. Lo strumento software è stato implementato su Matlab mediante l'impiego degli algoritmi genetici.

3. Stato dell'arte

Il **rischio ergonomico legato ai movimenti e alle posture** assunte dai lavoratori, in letteratura viene misurato mediante due metodi diversi: 1) attraverso **indici ergonomici** che valutano il rischio di infortuni fisici in base a valutazioni posturali; 2) analisi del rischio mediante una valutazione del **dispendio energetico**: viene impiegato il metodo di Garg che permette di calcolare l'energia spesa in kcal. Il dispendio energetico dipende sia dai movimenti compiuti nell'eseguire un'operazione di assemblaggio, sia da parametri specifici dell'operatore, come peso, età e genere.

In letteratura, per analizzare il **rischio ergonomico legato al rumore** percepito dai lavoratori, viene misurato inizialmente la **DOSE rumore [%]**, formula che misura in percentuale, l'esposizione sonora media ponderata nel tempo totale per un singolo lavoratore, in una giornata lavorativa di 8 ore. La DOSE rumore può essere convertita in **TWA** "Time Weighted Average" [dB(A)] ed esprime il livello sonoro medio ponderato su otto ore; la formula è:
$$TWA = 16.61 \log_{10} (D/100) + 90$$

Dove: D è la DOSE rumore; 90 è il limite del rumore imposto in dB(A) che dipende dalla normativa impiegata; 16,61 è una costante.

La lettera "A" affiancata all'unità di misura del decibel rappresenta un filtro, ed indica che il livello di pressione sonora misurato, è identico a quello percepito dall'orecchio umano. Per ridurre il rischio ergonomico degli operatori sul luogo di lavoro, molto diffuso è lo strumento organizzativo di **job rotation**, che consiste nel far ruotare i dipendenti tra varie postazioni durante il turno lavorativo. Analogamente, su una linea di assemblaggio, viene previsto uno spostamento periodico di un lavoratore tra diverse stazioni, mantenendo sempre un eguale livello di responsabilità. Applicare una job rotation efficace porta numerosi vantaggi:

1) **abilità multi-tasking**: i lavoratori sono meno specializzati, dato che viene meno la ripetitività di esecuzione ma acquisiscono una migliore flessibilità che permette loro di svolgere diversi compiti e ottenere competenze diversificate. Gli operatori memorizzano operazioni diverse grazie ad una loro collocazione presso diverse stazioni.

2) **contrasto delle emergenze**: in tempi di urgenza dovuti ad un'assenza di un operatore, avere a disposizione operatori che possono essere collocati presso stazioni diverse permette di affrontare situazioni insolite con maggiore sicurezza.

3) **contrasto della monotonia**: si ritiene che una rotazione del lavoro abbia la capacità di ridurre la noia e la monotonia vissuta dagli operatori che lavorano nelle stesse stazioni per lunghi periodi di tempo.

4) **riduzione rischi ergonomici**: programmando una job rotation efficace, è possibile ridurre lo stress muscoloscheletrico e distribuire i vari carichi su tutto il corpo. Oltre ad un bilanciamento dello sforzo fisico, è possibile far ruotare i lavoratori per contrastare i danni uditivi a causa della presenza di stazioni più rumorose di altre sulla linea.

La maggior parte dei lavori che impiegano la job rotation nelle linee di assemblaggio hanno come obiettivo un'ottimizzazione dell'ergonomia. Generalmente, la modalità con la quale un'azienda definisce la propria strategia di job rotation dipende: dall'obiettivo che vuole perseguire, dal numero di operatori coinvolti nella rotazione e dalla durata della rotazione. Gli obiettivi principali nell'attuare una rotazione dei lavoratori tra le stazioni presenti sulla linea sono: prevenzione infortuni alla schiena, riduzione esposizione al rumore, prevenzione

accumulo fatica, riduzione ripetizione task, prevenzione infortuni sugli arti superiori. Il range di rotazione, nonché il numero di operatori coinvolti ad ogni rotazione, secondo Jeon e Jeong può essere classificato mediante tre tipologie diverse:

- Jo range rotation: tipologia di job rotation dove un cluster di lavoratori ruota sempre nel medesimo cluster di stazioni su una linea di montaggio.
- Ban range rotation: tipologia di job rotation dove gli operatori vengono collocati ad ogni rotazione su qualsiasi stazione presente sulla linea.
- Jo-Ban rotation: tipologia di job rotation dove nel breve periodo (ogni ora o due ore) ogni cluster di operatori ruota sempre nel medesimo gruppo di stazioni, mentre medio periodo (ogni giorno o settimana) ogni cluster di operatori si sposta su un altro gruppo di stazioni.

A seguito di un'analisi della letteratura scientifica, è stato osservato che la job rotation viene impiegata principalmente in un turno di lavoro di 8 ore, con una rotazione degli operatori ogni due ore circa. Tra le metodologie attualmente impiegate in industria per ridurre il rischio ergonomico, vi sono anche i **robot cooperativi**, o cobot, tecnologia emergente nel campo dei nuovi sistemi di produzione che permette di avere vantaggi sia della produzione automatizzata sia della produzione manuale. L'introduzione di una coesistenza uomo-robot è dovuta al fatto che le aziende non possono automatizzare in maniera efficiente qualsiasi operazione, poiché una tecnologia robotica non fornisce un alto grado di flessibilità: per ovviare a ciò è possibile sfruttare le risorse umane in collaborazione con i robot. Una collaborazione uomo-robot combina i punti di forza dell'uno e dell'altro, annullando le rispettive debolezze. I punti di forza degli umani sono la flessibilità, adattabilità, capacità decisionali, manualità e creatività mentre la forza, velocità, resistenza e precisione sono proprietà possedute dal robot. Di conseguenza, si hanno dei vantaggi sia dovuti ad una migliore qualità ed efficienza della produzione, sia ad un migliore stato di salute dei lavoratori dato che il robot compirà i lavori più stressanti e ripetitivi. Muller sulla base del lavoro di Kluge ha sviluppato un approccio per capire se un'operazione debba essere eseguita dall'operatore, dal robot o in cooperazione in base all'attrezzatura e alle skill richieste. Nelle stazioni in cui lo spazio viene condiviso dai robot e dai lavoratori, indicato come "Workplace sharing systems", entrambi svolgono alternativamente compiti di manipolazione componenti e assemblaggio. Si possono avere due configurazioni diverse:

- L'operatore esegue l'attività di assemblaggio e il robot esegue l'attività di manipolazione;
- L'operatore esegue un'attività di manipolazione e il robot esegue un'attività di assemblaggio;

Nel caso in cui le stazioni vengano condivise sia dal punto di vista dello spazio sia dal punto di vista del tempo, indicato come “Workplace and Time sharing systems” oltre ai due casi precedenti, si possono avere altre due configurazioni dove gli attori in gioco sono in grado di eseguire le attività in maniera congiunta:

- il robot e l’uomo eseguono congiuntamente un compito di manipolazione;
- il robot e l’uomo eseguono congiuntamente un’attività di assemblaggio;

4. Definizione e implementazione dello strumento software

Alla luce delle analisi effettuate sullo stato dell’arte, è stato definito l’algoritmo genetico e implementato su Matlab. Il **problema di bilanciamento di linea** sviluppato presenta i seguenti obiettivi:

1) **Minimizzazione dei costi**: vengono valutati i costi orari relativi alle risorse assegnate su ciascuna stazione quali operatori, robot ed equipaggiamento (avvitatore, pressa e alimentatori a vibrazione). Il costo di ogni operatore è proporzionale al livello di skill posseduto.

2) **Massimizzazione del livellamento della spesa energetica media** tra i lavoratori.

3) **Massimizzazione del livellamento del rumore percepito** in un turno dai lavoratori.

Gli obiettivi riguardanti l’aspetto ergonomico sono stati modellati sulla base della deviazione standard. La **job rotation** impiegata ha lo scopo di allocare i vari lavoratori nelle stazioni presenti lungo la linea di assemblaggio, in modo da livellare nel miglior modo possibile sia il **dispendio energetico** sia il **rumore percepito** tra gli stessi in un turno di lavoro. In un turno di lavoro di 8 ore, sono state definite 4 rotazioni, ciascuna della durata di 2 ore. Ad ogni rotazione ogni operatore può essere allocato su una qualsiasi stazione purché abbia un livello di skill uguale o superiore a quello richiesto dalla stazione, e collocato su una stazione diversa da quella occupata alla rotazione precedente. I **robot cooperativi** sono stati utilizzati per il loro supporto nella manipolazione di componenti con un certo carico oltre che a far eseguire loro, dove possibile, semplici attività di montaggio. Più precisamente, si può avere uno dei seguenti casi:

- Il robot esegue sia la parte di manipolazione di un componente sia il relativo montaggio, se non è richiesto il supporto di un operatore e/o di una particolare attrezzatura.
- Il robot esegue un’operazione insieme all’operatore e più precisamente il robot esegue la parte del compito di manipolazione, mentre l’operatore esegue la parte di assemblaggio.

Di seguito viene spiegato il calcolo della spesa energetica media e del rumore percepito per

valutare gli obiettivi ergonomici.

Per valutare i **rischi ad infortuni fisici** dovuti ad affaticamento, è stato valutato il dispendio energetico [kcal] dei lavoratori mediante il modello di Garg in base al loro consumo di ossigeno nell'eseguire le operazioni di montaggio, nonché in base ai parametri fisici degli operatori. La valutazione del dispendio energetico è preferibile alle altre metodologie poiché risulta correlata all'assegnazione dei task alle stazioni. Ciò è dovuto al fatto che la spesa energetica di ciascun lavoratore viene calcolata in base alle caratteristiche fisiche e ai movimenti compiuti nell'eseguire un'operazione. Il fattore ergonomico fisico di ogni operatore viene valutato, calcolando il rapporto tra il **dispendio energetico** nel compiere le operazioni di montaggio e il proprio **limite di spesa energetica**. Il **dispendio energetico** di ogni operatore j sulla stazione i è:

$$E_{i,j} = \sum_k Eop_{k,j} + Ea_{i,j} \text{ [Kcal]}$$

Il primo addendo indica la spesa energetica compiuta dall'operatore j nell'eseguire le operazioni di montaggio k assegnate alla stazione i, mentre il secondo addendo corrisponde all'energia spesa da parte dell'operatore j durante il tempo di attesa sulla stazione i.

L'energia nel compiere un'operazione di montaggio k è uguale a:

$$Eop_{k,j} = \sum_{mmg=1}^{Nmmg} \dot{E}_{pos} * t_{mmg} + \sum_{mmg=1}^{Nmmg} \Delta E_{mov-mmg} + \sum_{mm\bar{g}=1}^{Nmm\bar{g}} E_{mm\bar{g},j} \text{ [Kcal]}$$

- *mmg*: micromovimento generico valutato mediante il modello di Garg;
- *mm \bar{g}* : micromovimento generico valutato mediante il concetto di MET;
- *E_{mm \bar{g} ,j}*: dispendio energetico dell'operatore j nel compiere i micromovimenti valutati mediante il concetto di MET [Kcal];
- *$\Delta E_{mov-mmg}$* : dispendio energetico dell'operatore j nel compiere i micromovimenti valutati mediante il modello di Garg [Kcal];
- *\dot{E}_{pos}* : dispendio energetico dovuta alla posizione assunta nel compiere un micromovimento *mmg* [Kcal/min];
- *t_{mmg}*: durata della postura nel compiere il micromovimento *mmg* [min].

I movimenti che non vengono analizzati da Garg, sono valutati mediante il concetto di MET. Il MET è un costo energetico, il cui valore unitario corrisponde al consumo di ossigeno in condizioni di riposo. Sapendo che 2,5 METs corrispondono al costo energetico nel compiere un movimento sulle linee di assemblaggio effettuate in piedi, è possibile calcolare il dispendio energetico. Il **limite di spesa energetica** di ogni operatore è uguale a:

$$E_{OELj} = OEL_j * T_c * 0.0143 \text{ [kcal]}$$

dove: OEL_j è il 35% del tasso massimo di spesa energetica dell'operatore j [W]; T_c è il tempo ciclo [min]; 0.0143 è un fattore di conversione.

Il tasso massimo di spesa energetica di ciascun operatore, dipende dal massimo consumo di ossigeno, nonché dal genere, età e indice di massa grassa.

Dato che ogni operatore viene collocato ad ogni rotazione su una stazione diversa da quella occupata alla rotazione precedente, verrà valutato un **dispendio energetico medio** tra le varie rotazioni. Per calcolare **l'esposizione al rumore** degli operatori viene dapprima misurato il livello sonoro presente su ciascuna stazione: quest'ultimo dipende dalle attrezzature impiegate per eseguire le operazioni elementari. Il rumore emesso da ciascuna stazione viene calcolato considerando il rumore prodotto dai vari task che vengono eseguiti sequenzialmente. Durante il tempo di attesa, viene considerato un rumore di fondo presente sull'impianto. Viene impiegata la formula del livello sonoro continuo di rumore equivalente:

$$L_{eq,i} = 10 \log \frac{1}{T_c} [\sum_k t_k * 10^{\left(\frac{L_k}{10}\right)} + T_{ai} * 10^{\left(\frac{L_a}{10}\right)}]$$

Dove: T_c = tempo ciclo[min]; T_{ai} = tempo attesa stazione i [min]; L_k = rumore emesso task k [dB(A)]; L_a = rumore di fondo [dB(A)]; t_k =tempo esecuzione task [min].

Oltre al rumore emesso dalle operazioni di assemblaggio assegnate alla generica stazione, occorre valutare l'influenza dei rumori emessi sia dalle stazioni adiacenti, il cui livello sonoro varia con la distanza, sia di eventuali alimentatori a vibrazione.

Dopo aver valutato il livello di rumore presente su ogni stazione, si può misurare il livello di rumore percepito da ogni operatore in un turno di lavoro di otto ore considerando un'esposizione al rumore diversa ad ogni rotazione, prima mediante la **DOSE rumore** cui è sottoposto l'operatore per poi convertirla in **TWA**.

I vincoli presenti riguardano:

- 1) **Vincoli tecnologici e vincoli temporali:** vincoli tipici di tutti i problemi di bilanciamento.
- 2) **Vincolo legato alle skill:** ogni operatore j allocato su una stazione i alla rotazione t , deve possedere un livello di skill uguale o superiore a quello richiesto dalla stazione.
- 3) **Vincolo legato al dispendio energetico:** ogni operatore j presso una stazione i ad una determinata rotazione t , può spendere un massimo quantitativo di energia, che non deve superare il proprio limite energetico.
- 4) **Vincolo legato al rumore:** ogni operatore j deve percepire un livello di pressione sonora massimo, inferiore a quello limite di 90 dB(A) (imposto dalla normativa OSHA 1910.95).
- 5) **Vincolo legato alla potenza massima:** ogni operatore j allocato presso una stazione i alla rotazione t deve possedere una potenza uguale o superiore a quella richiesta dalla stazione.

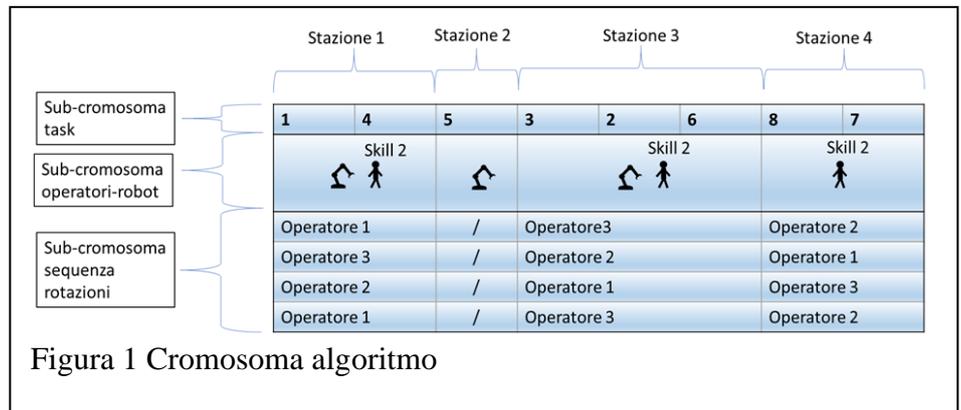
6) **Vincolo legato alla Job rotation**: ad ogni rotazione t , ogni lavoratore j deve essere allocato su una stazione i diversa dalla rotazione precedente.

Dopo aver definito gli obiettivi e i vincoli, è stato scritto l'algoritmo genetico. L'algoritmo genetico prevede la generazione casuale di un numero di soluzioni definito da un utente, detti cromosomi, che valuterà mediante una particolare funzione, chiamata funzione fitness. La funzione fitness viene calcolata nel seguente modo:

$$\text{Funzione } f = \text{penalty} * (p_1 * Fn_1 + p_2 * Fn_2 + p_3 * Fn_3) \quad \text{Funzione } f \in [0,1]$$

Gli obiettivi del problema vengono normalizzati e moltiplicati per un peso specifico in modo tale che la loro sommatoria restituisca un valore che va da un minimo di 0 a un massimo di 1.

Ogni cromosoma vedrà inoltre la propria funzione fitness peggiorare di una *penalty* proporzionale al numero di vincoli violati.



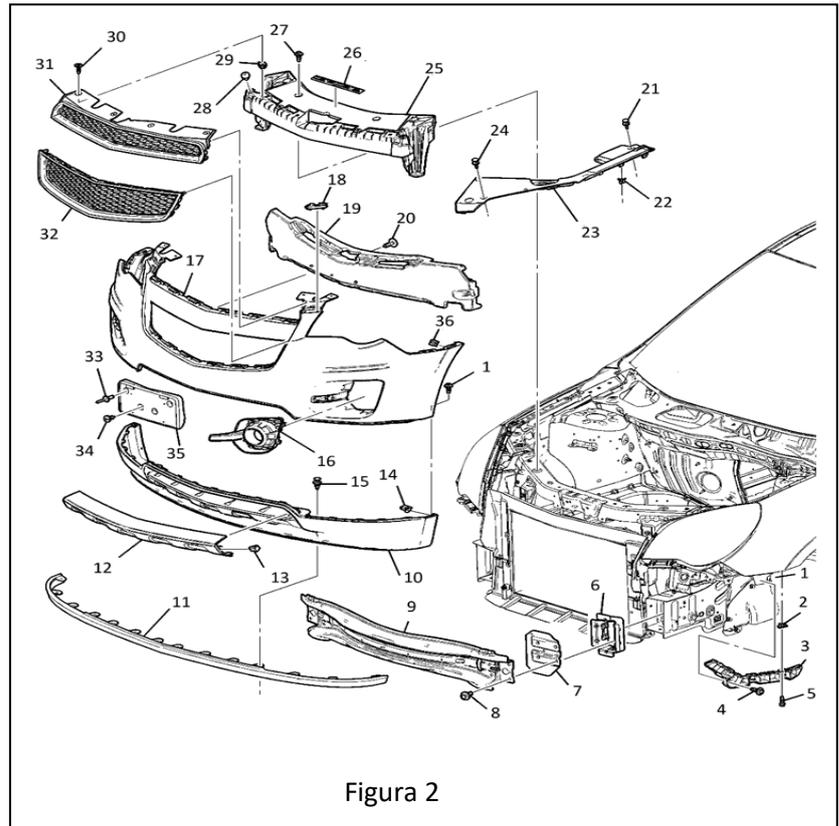
Successivamente, viene effettuata una selezione delle soluzioni, la cui probabilità di essere selezionati è tanto maggiore quanto maggiore è il punteggio restituito dalla funzione fitness. I cromosomi selezionati vengono ricombinati geneticamente mediante crossover e mutazione. Queste due tecniche implementate permettono di ottenere dei nuovi cromosomi. Alla fine del procedimento di ricombinazione si ottiene un parco di cromosomi uguale alla somma dei cromosomi generati inizialmente e dei cromosomi ricombinati: vengono selezionati i cromosomi con la migliore funzione fitness per un totale pari al numero di cromosomi generati casualmente. Ottenuta la nuova generazione, l'algoritmo effettuerà su di essa tutti gli step a partire da quello della selezione, per un numero di iterazioni definito dall'utente. Raggiunto il numero di iterazioni da far eseguire al programma, viene scelta la soluzione con la miglior funzione fitness. Nella Figura 1 viene riportato un esempio di cromosoma del problema sviluppato, che si suddivide in:

- sub-cromosoma task: rappresenta la sequenza dei task assegnati alle stazioni;
- sub-cromosoma operatori-robot: rappresenta le caratteristiche che devono avere gli operatori per essere assegnati alle stazioni e la presenza o meno dei robot;
- sub-cromosoma sequenza rotazioni: rappresenta la sequenza di allocazione degli operatori presso le stazioni (colonne) ad ogni rotazione (righe).

Ogni cromosoma contiene anche le informazioni sulla spesa energetica, sul rumore percepito, sulle risorse necessarie ad ogni stazione e sui vincoli rispettati.

5. Caso di studio

Il caso di studio che è stato scelto per analizzare lo strumento software riguarda l'assemblaggio della parte anteriore di un'automobile, il cui disegno esploso viene rappresentato in Figura 2. Tra i molti casi papabili per poter studiare il software, è stato individuato questo specifico caso per i seguenti motivi: presenza di componenti con una certa massa tale da dover essere necessario l'impiego di cobots per



manipolarli; presenza di operazioni richiedenti attrezzatura per analizzare il rumore; prodotto altamente diffuso, la cui produzione giustifica un investimento equipaggiandola con cobots. Di seguito verrà riportato il bilanciamento della linea single model, restituito dal programma. I dati di input al software per poter elaborare una soluzione sono: informazioni riguardanti le operazioni, studio dei movimenti

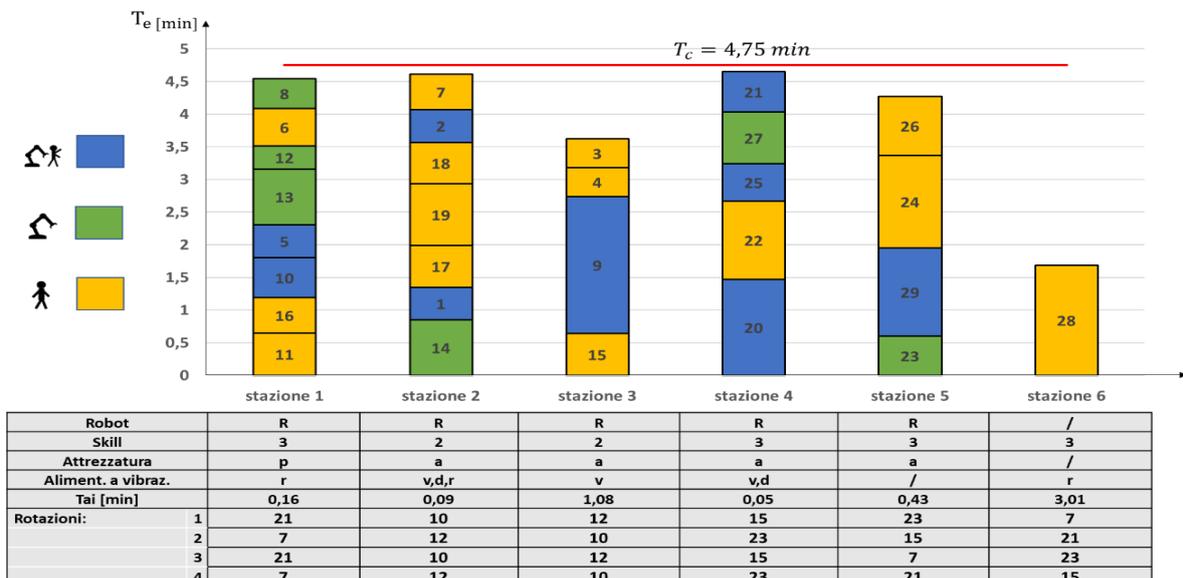


Figura 3 Carico stazione

compiuti dagli operatori per analizzare l'energia spesa, parco operatori con relativi parametri fisici, costo orario delle risorse impiegate, rumore emesso dall'equipaggiamento e dai robot. Oltre a ciò, occorre inserire dei dati riguardanti sia le caratteristiche della linea di assemblaggio sia l'algoritmo genetico. La migliore soluzione risulta essere quella avente una funzione di fitness uguale a 0,8321. Nella Figura 3 viene riportato il carico stazione restituito dal programma. Come si può osservare, la soluzione ottenuta fornisce un impianto con 6 stazioni di cui solamente la stazione 6 risulta essere completamente manuale. In giallo sono riportate le operazioni manuali, in verde quelle eseguite in cooperazione, in blu le operazioni eseguite dai robot. L'impianto inoltre richiede due operatori con skill di livello 2 che sono gli operatori 10 e 12, e quattro operatori con skill di livello 3 che sono gli operatori 7, 15, 23, 21.

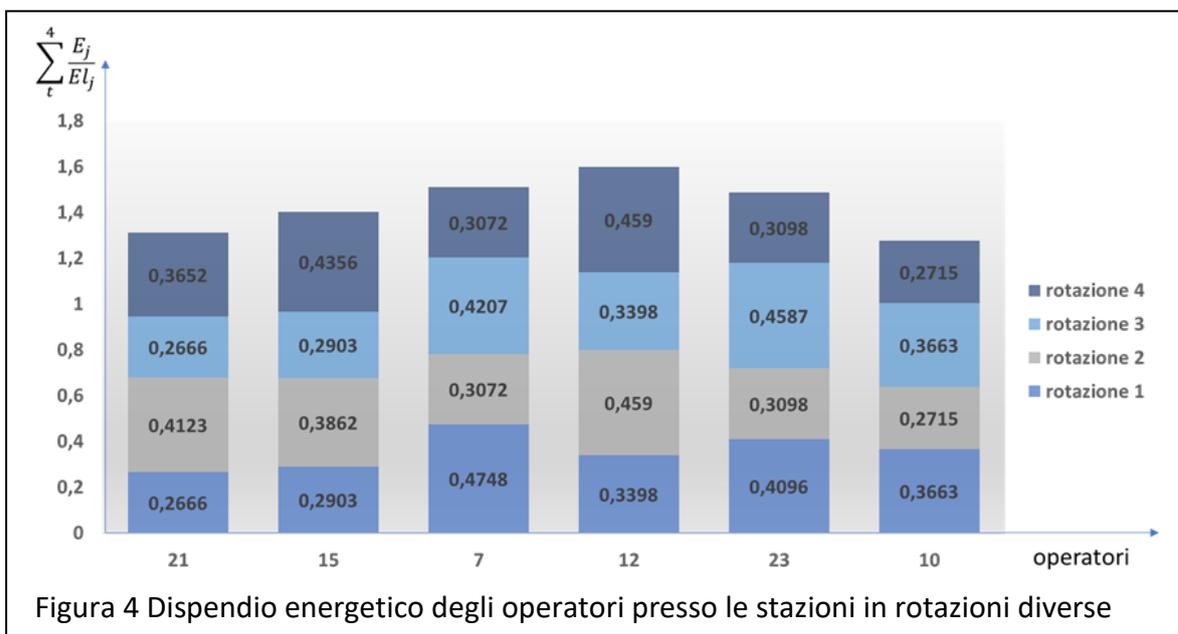


Figura 4 Dispendio energetico degli operatori presso le stazioni in rotazioni diverse

In base alla sequenza di rotazione restituita, si osserva come gli operatori 10 e 12 siano allocati alternativamente sempre presso le stazioni 2 e 3 poiché sono le uniche a richiedere quel livello di competenza. L'attrezzatura necessaria viene identificata con a (avvitatore) e p (pressa). Gli alimentatori a vibrazione possono essere di tre tipi: di viti(v), di rivetti nylon (r) e di dadi (d). In Figura 4 viene mostrato il dispendio energetico di ciascun lavoratore ad ogni rotazione. Sull'asse delle ascisse vengono riportati gli operatori assegnati mentre sull'asse delle ordinate viene riportata per ciascun operatore, la sommatoria dell'energia spesa in rapporto al limite energetico di ogni rotazione. Il software ha restituito un buon livellamento della spesa energetica tra gli operatori dato che l'intervallo è tra il 31.89% e 39.94%.

Il rumore percepito dagli operatori in un turno di lavoro in

Operatori	21	15	7	12	23	10
TWA dB(A)	83,19	85,54	84,54	84,62	83,19	84,62

Tabella 1 Rumore percepito operatori

base alla sequenza di rotazione è riportato in Tabella 1. Il rumore percepito risulta essere abbastanza livellato tra gli operatori poiché il TWA degli operatori sta tra un intervallo di 83,19 dB(A) e 85,54 dB(A).

Il caso di studio è stato effettuato anche per il caso mixed model, considerando gli stessi dati input e la presenza di un altro modello oltre a quello già analizzato.

Successivamente è stato analizzato il problema, annullando a turno ogni obiettivo e valutando la variazione di ogni soluzione rispetto al caso avente tutti e tre gli obiettivi. Annullando l'obiettivo inerente al costo è stato osservato un aumento di quest'ultimo del 2.79%, senza apprezzare particolari differenze sul rumore percepito e l'energia spesa. Annullando l'obiettivo riguardante il livellamento del rumore percepito è stato osservato oltre che ad una diminuzione del costo del 6.17% anche una distribuzione più equa della spesa energetica, e un aumento del 79% degli operatori con spesa energetica inferiore. Di contro è stato osservato un peggioramento del rumore percepito. Un calo del costo impianto dell'11.14% e una distribuzione più livellata del rumore percepito con peggioramento dell'obiettivo energetico, sono stati constatati annullando l'obiettivo inerente al dispendio energetico.

6. Conclusioni

Lo sviluppo del presente software ha permesso di poter progettare una linea in base al prodotto da assemblare, dove l'assegnazione delle operazioni alle stazioni influenza sia i costi impianto sia l'ergonomia. Per valutare ulteriormente la robustezza dello strumento, sono stati variati i dati input inerenti ai costi e ai parametri fisici degli operatori: alla luce di ciò, è stato quindi dimostrato che lo strumento sia in grado di restituire soluzioni diverse in base al contesto presente, ottimizzando gli obiettivi e rispettando i vincoli imposti. L'impiego della job rotation ha dimostrato come vengano ripartiti in maniera più equa i rischi ergonomici tra gli operatori: comparando il caso in cui vengano fatti ruotare gli operatori con il caso in cui non venga impiegata tale strategia, è stato osservato come nel primo caso oltre a una distribuzione più livellata sia della spesa energetica sia del rumore percepito, il 60% degli operatori vede sia un calo del dispendio energetico sia un'esposizione al rumore più bassa. In futuro, il lavoro potrà essere approfondito sui seguenti aspetti: 1) far eseguire ai robot cooperanti oltre che alle operazioni di movimentazione, anche operazioni particolari come l'avvitamento; 2) distinguere i robot in base ai gradi di libertà posseduti con una relativa distinzione di costo; 3) nel caso in cui un robot compia un'operazione di montaggio autonomamente, far eseguire quest'ultima in parallelo ad un'operazione manuale (eseguita da operatore), senza violare alcun vincolo di precedenza.