



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

INDIRIZZO: MECCATRONICA E SISTEMI INDUSTRIALI

CICLO XX

L'ASSEMBLAGGIO NELLA MODERNA PRODUZIONE INDUSTRIALE

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Paolo Bariani

Supervisore : Ch.mo Prof. Alessandro Persona

Dottorando : Maurizio Faccio

DATA CONSEGNA TESI
31 gennaio 2008

Sommario

Introduzione	Errore. Il segnalibro non è definito.
1.Capitolo 1	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.1. Medio Chiampo S.p.A.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.2. Il Gruppo Medio Chiampo	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.3. L'organizzazione aziendale.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.4. Prodotti e servizi offerti	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.Capitolo 2	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.1. Situazione generale	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.2. Settore del servizio idrico integrato	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.3. Settore di depurazione delle acque reflue	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.Capitolo 3	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.1. Allegato 1	2Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Commento ai dati del triennio 2004-2006	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.Capitolo 4	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30
3.3. Analisi Finanziaria	32
4.Capitolo 4	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30
3.3. Analisi Finanziaria	32
5.Capitolo 5	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30
3.3. Analisi Finanziaria	32
6.Capitolo 6	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30
3.3. Analisi Finanziaria	32
7.Capitolo 7	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30
3.3. Analisi Finanziaria	32
8.Capitolo 8	25
4.1. Situazione esistente e strategia futura.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.2. Analisi Economica	30

3.3. Analisi Finanziaria	32
--------------------------------	----

Obiettivi della tesi

Questa tesi rappresenta il riassunto di anni di ricerca nel settore della logistica e degli impianti industriali rispetto un tema molto importante e sentito nelle aziende: la produzione mediante assemblaggio. Nella moderna produzione industriale si è osservato negli ultimi anni il crescere della competitività, l'allargamento dei mercati con la loro globalizzazione e la parallela ristrutturazione del modo di operare delle aziende, nel tentativo di diventare sempre più efficaci nel loro business. Questo ha portato all'esternalizzazione di molte attività che prima venivano gestite direttamente all'interno e che ora vengono acquistate come beni o servizi da fornitori esterni specializzati. E' il caso per esempio dei trasporti o della produzione di alcuni componenti, o di alcune lavorazioni. D'altro canto alcune attività ad elevato costo di manodopera sono state mantenute all'interno dell'azienda ma de localizzate in paesi a basso livello di sviluppo dove il costo del lavoro è minore. Cosa è successo per l'assemblaggio? Nel nostro paese e nel nostro territorio in particolare molte sono le aziende che operavano con sistemi di produzione legati all'assemblaggio, e molte ci sono tutt'oggi. Questo fondamentalmente per 2 motivi. L'attività dell'assemblaggio è una attività che crea valore, e che dalla quale generalmente esce direttamente il prodotto finito con cui l'azienda si pone nel mercato. Per questo è una attività strategica, sulla quale le aziende investono la loro sopravvivenza ed il loro successo. A meno di piccole fasi quindi l'esternalizzazione di queste attività di produzione non si è verificata e nemmeno si verificherà. D'altra parte la qualità del prodotto finito, dipende fortemente dall'assemblaggio, che essendo una attività finale che racchiude molto spesso attività di collaudo, messa a punto e controllo definisce in maniera nella il livello qualitativo della produzione. Per questo serve personale e manodopera formata e specializzata non sempre reperibile in zone anche a basso costo di manodopera. Sotto questa premessa si sviluppa questo lavoro di definizione dello stato dell'arte, di ricerca e di casi applicativi, con il fine di rendere chiari gli elementi che costituiscono, determinano ed influenzano i moderni sistemi di assemblaggio, con particolare riferimento alle linee e alla produzione ripetitiva, definendo modalità e criteri di progettazione innovativi con un moderno approccio integrato con il fine di aumentare l'efficienza e ridurre i costi globali di produzione.

1. Introduzione all'assemblaggio

1.1 Generalità

Si definisce assemblaggio il processo tramite il quale varie parti vengono unite fra loro in modo da creare un prodotto finito. Questo processo è caratterizzato da due elementi distintivi: le parti utilizzate e il lavoro necessario a combinarle fra loro. Per quanto riguarda il lavoro, fondamentalmente le operazioni sono tutte operazioni di unione e vengono eseguite utilizzando mezzi e strumenti come bulloni, colle, accoppiamenti di varia natura, ecc. Per quanto riguarda invece i materiali si possono distinguere essenzialmente 2 tipologie: la prima che prevede che il prodotto si muova, tipicamente su un sistema di trasporto, verso i materiali, disposti nelle diverse stazioni di assemblaggio, dando origine alle linee di assemblaggio. Tale tipologia di produzione è largamente diffusa e si addice maggiormente a prodotti facilmente movimentabili e dove i volumi richiesti siano sufficientemente elevati. La seconda tipologia invece richiede che siano i materiali che si muovono verso il prodotto, dando origine all'assemblaggio a postazione fissa, tipico per esempio dei cantieri. Anche questa tipologia di produzione è largamente diffusa, soprattutto verso prodotti di difficile movimentazione e scarsi volumi produttivi.

Per l'assemblaggio a postazione fissa i fattori critici da considerare sono sicuramente (Wilhelm and Som, 1998, Li et al. 2006)

- La gestione dei materiali, fatta tipicamente con sistemi di approvvigionamento a fabbisogno.
- La definizione dei tempi di richiesta e spedizione delle merci, legata all'alta variabilità dei tempi di fornitura lungo tutta la catena, che cresce ovviamente al crescere del numero di componenti, es. aerei.
- Questo si ripercuote sui costi e sugli spazi per lo stoccaggio dei materiali
- Lo scheduling delle operazioni per la minimizzazione del tempo globale di assemblaggio, la definizione dei cammini minimi e la parallelizzazione delle attività.

La produzione in linea invece presenta criticità sui seguenti punti (Bhattacharjee and Sahu, 1987 and Zapfel 1989):

Scarsa flessibilità dei sistemi produttivi

Alti costi di installazione necessari

Alta influenza della qualità dei processi e dei componenti per le prestazioni del sistema

La variabilità dei tempi crea problemi nell'ottimizzazione di bilanciamento dei carichi di lavoro

Vi sono poi numerosi vantaggi che offre, anche rispetto all'assemblaggio a postazione fissa:

- Flusso dei materiali semplice da controllare e regolare, pianificazione dei fabbisogni dei materiali più semplice
- Alto coefficiente di utilizzo della capacità produttiva e basso tempo di attraversamento
- Livello WIP basso
- Piccole operazioni manuali di movimentazione, poiché solitamente sono manuali
- La richiesta degli spazi da utilizzare è piccola poiché sono piccoli gli spazi richiesti per lo stoccaggio e la movimentazione dei materiali
- La divisione del lavoro in diverse stazioni fa sì che gli operatori siano specializzati in quelle operazioni

1.2 L'assemblaggio in linea

Le linee di assemblaggio furono inizialmente sviluppate per la produzione di un unico prodotto standardizzato, in elevati volumi e al minor costo possibile, ovvero, con la massima efficienza possibile. L'evoluzione dei mercati causato dalla nascita del fenomeno dei consumi di massa (permessi dalle stesse linee di assemblaggio), hanno portato le aziende, e dunque le linee stesse, a doversi evolvere per garantire prodotti in diverse configurazioni e varianti, nonché a volumi produttivi adattabili alle variazioni della domanda. È per questo motivo che le linee di assemblaggio classiche si sono evolute in linee *multi-model*, dove diverse famiglie di prodotti simili sono assemblate a lotti nella stessa linea con cambi di produzione caratterizzati da set-up. Oppure si sono evolute in linee *mixed-model*, nelle quali è possibile effettuare cambi nel *mix* di modelli prodotti, senza dover eseguire costose operazioni di setup. Questo permette la produzione di lotti (di minori dimensioni) *intermixati* e, conseguentemente, la possibilità per l'azienda di adattarsi facilmente alle fluttuazioni della domanda senza eccessive scorte di prodotti finiti. Tutto questo raggiungendo anche l'obiettivo di un ampio portafoglio per l'azienda, senza perdere i benefici di una produzione a flusso, sfruttando con la massima efficienza macchinari e operatori e con una grande coordinazione delle attività, al fine di garantire la produzione giusta, con i giusti tempi e ridotti investimenti.

Sempre in riferimento alla richiesta di diversificazione di prodotti all'interno dei mercati, è evidente come all'aumentare della varietà diminuiscano i volumi di vendita dei singoli modelli (non, chiaramente, del volume totale). Proprio per questo può non risultare più economicamente fattibile la creazione di una linea dedicata per ogni modello. È in questo contesto che opera la linea *mixed-model*, che offre la possibilità di produrre una famiglia di prodotti su una stessa linea. Il tasso di produzione dei singoli modelli rispecchierà lo stesso tasso con cui il modello è richiesto sul mercato.

Le attività di coordinamento della linea sono un aspetto essenziale per il suo corretto funzionamento, sia esso inteso in termini economici o qualitativi. Queste attività consistono,

principalmente, nella progettazione della linea, nel suo corretto bilanciamento, e nello stabilire con quale sequenza i vari modelli vadano lanciati in produzione. Entrambi questi aspetti verranno trattati qui di seguito focalizzando l'attenzione, in particolare, sul sequenziamento e sulle metodologie in grado di supportarne le operazioni di decision-making.

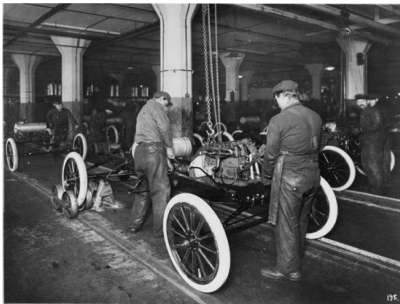


Fig.1.1 Linea assemblaggio Ford

L'inventore della prima linea di assemblaggio con movimentazione automatica dei semilavorati fu William Klann, dipendente di Henry Ford, che partorì l'idea dall'osservazione di come i lavoratori si intralciassero a vicenda nell'operare attorno all'auto in costruzione e, parallelamente, da analisi circa l'efficienza che si sarebbe potuta raggiungere attraverso il replicare più volte nel

tempo le medesime operazioni. Non è però corretto dire che egli fu l'inventore della linea di assemblaggio in quanto tale. È appurato che alcuni anni prima delle linee Ford, la linea di assemblaggio fu brevettata da "Ransom Olds", fondatore della "Olds Motors Vehicle Company". Il successo del Model T fu però di tale portata da permettere all'azienda e a Ford, di fregiarsi del titolo di inventore della linea di assemblaggio. Insieme alla sua invenzione si presentarono le prime problematiche, tuttoggi presenti nelle linee di assemblaggio moderne. Fra queste è interessante il caso del collo di bottiglia causato dalla stazione addetta alla verniciature nella linea di Ford, dato che, al tempo, l'unico colore in grado di garantire tempi di asciugatura sufficientemente rapidi, era il nero. Ford, non trovando altre soluzioni tecniche o organizzative, decise dunque la produzione del solo modello nero, da cui la celebre frase riferita al Model T: "disponibile in tutti i colori purché nera". La rivoluzione sociale e di costume apportata dall'introduzione delle linee fu enorme ed esula dalla trattazione di questo lavoro (per approfondimenti si veda "Fordismo e postfordismo". Accanto all'emblema di Ford, si ricordano come esempi particolarmente importanti di produzione di massa tramite linee di assemblaggio, le produzioni dell'800 di armi, durante la guerra civile americana, e l'industria orologiaia.

Nel '600 l'arsenale di Venezia produceva navi partendo da pezzi pre-fabbricati e linee di assemblaggio in grado di garantire tassi di produzione di quasi una nave al giorno e, sempre in ambito navale, sono noti svariati esempi di linee di assemblaggio anche nei cantieri navali inglesi, a partire dalla creazione della prima linea con layout in serie presso i cantieri di Portsmouth, operativi dal 1801 al 1960.

1.3 Terminologia

Per una maggiore chiarezza si ritiene opportuno introdurre sin da subito la terminologia principale che verrà utilizzata in tutto il testo, e necessaria ad una efficace descrizione delle linee di assemblaggio.

- **Operazione (o *task*):** è una frazione del lavoro totale necessario ad ottenere un prodotto finito. Il tempo necessario a svolgere tale lavoro è detto *tempo dell'operazione*. Le operazioni sono considerate indivisibili, nel senso che non possono essere suddivise in operazioni più elementari.
- **Stazione:** è una porzione della linea di assemblaggio nella quale viene svolta una certa quantità di lavoro. I suoi elementi identificativi sono: le attrezzature e i macchinari, nonché il tipo di lavoro assegnato. Le stazioni possono essere automatizzate, nel caso vi siano macchine totalmente automatizzate, o manuali, nel caso in cui, invece, il lavoro è svolto da operatori umani che utilizzano o normali utensili o macchine semi-automatiche. Con il termine *operatore* si identifica indifferentemente una macchina automatica o un operatore umano. Si possono inoltre determinare il *carico di lavoro della stazione* (tipo di lavoro assegnato nella stazione) e *tempo ciclo della stazione* (il tempo necessario ad eseguire un'operazione in una stazione). Una stazione verrà definita come precedente un'altra se si trova, rispetto a questa, più vicina all'inizio della linea. [Infine, sempre in riferimento al tempo, si usa il termine *tempo di ozio* per indicare l'inattività dell'operatore o della stazione.]
- **Tempo ciclo:** rappresenta la massima quantità di tempo nel quale un pezzo può sostare in una stazione (nel caso di una linea di assemblaggio sincrona). Si possono inoltre definire il *tempo di tolleranza*, ovvero il tempo nel quale un componente è disponibile per l'assemblaggio, e tasso di produzione, definito come l'inverso del tempo di ciclo.
- **Bilanciamento:** rappresenta la suddivisione delle attività tra le varie stazioni in funzione di un certo obiettivo, tipicamente legato alla massimizzazione dell'utilizzo della capacità produttiva, alla minimizzazione dei costi o alla massimizzazione dei profitti.

1.4 Linee di assemblaggio: caratteristiche generali e classificazione

Le linee di assemblaggio sono sistemi a flusso tipici nella produzione industriale di grandi quantità di prodotti standardizzati. Fanno parte di quelle tecniche di produzione dette "di massa" o "a flusso", caratterizzate da una disposizione sequenziale dei macchinari, tale da rispecchiare la sequenza tecnologica delle operazioni necessarie al completamento del prodotto. In letteratura vengono, per questo motivo, indicati come sistemi produttivi *process-oriented*, in contrapposizioni ai sistemi *job-oriented* dove, invece, i macchinari sono raggruppati per

funzione. La disposizione più semplice è in linea che consiste di un numero di stazioni collegate fra loro da un sistema di trasporto di materiali (nella maggior parte dei casi un sistema di nastri trasportatori). I semilavorati vengono caricati lungo la linea di trasporto e sono trasportati da una stazione all'altra dove viene svolta una frazione del lavoro necessario al completamento (A, Scholl, 1999). In letteratura generalmente le linee di assemblaggio vengono classificate rispetto alcuni fattori critici che le caratterizzano e che devono essere fissati e/o gestiti durante la loro progettazione. Di seguito la classificazione fornita da Scholl, (1999) ed integrata con altri elementi ritenuti importanti. L'obiettivo di questa parte introduttiva è fornire i fattori di influenza ed una loro descrizione, lasciando spazio poi nei capitoli successivi una più ampia trattazione.

1.4.1 Tempo di sosta in una stazione

In riferimento al tempo nel quale un semilavorato può sostare in una stazione si può creare una prima distinzione tra linee sincrone e asincrone.

Nelle *linee sincrone* il tempo allocato al completamento di ogni operazione di assemblaggio è il medesimo per ogni stazione. Definiremo questo "tempo ciclo", t_c . Ogni stazione disporrà dunque della stessa quantità di tempo per portare a termine l'operazione. Anche la linea, nel suo complesso, avrà un tasso di produzione costante e uscirà un prodotto completato ad ogni intervallo di tempo pari a t_c . I semilavorati sono movimentati lungo la linea a velocità costante o a intermittenza dopo essere stati lavorati. Nel primo caso l'operatore deve muoversi insieme al semilavorato e ritornare all'inizio della stazione dopo che ha completato il suo lavoro.

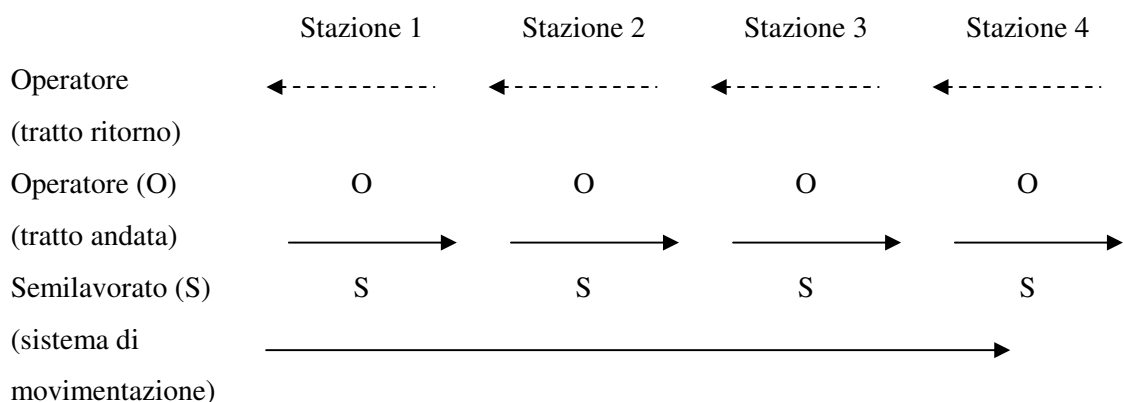


Fig. 1.2 Schema di una linea sincrona con sistema di movimentazione a velocità costante

Nelle *linee asincrone* le stazioni possono avere tempi di ciclo diversi e, dunque, diversi tassi di produzione. Vanno dunque previsti dei *buffer* fra stazioni successive per permettere la sosta dei

semilavorati in attesa alla stazione successiva. Possono verificarsi due eventi indesiderati riguardanti i buffer. Il primo è dovuto al riempimento del buffer a valle della stazione successiva. La stazione è dunque ferma sino alla richiesta di un componente dal buffer. Il secondo problema, diametralmente opposto, è dovuto alla mancanza di semilavorati dal buffer a valle della stazione, che deve dunque attendere l'arrivo di un semilavorato sul quale svolgere le operazioni previste. Questo secondo problema si può verificare a causa di una rottura di una stazione a valle o a causa di un cattivo bilanciamento della linea. Si presenta, dunque, sia il problema di bilanciare la linea che quello di dimensionare correttamente i buffer, effettuando un trade-off fra i tempi di inattività (dovuti ad eventi inattesi e rotture) e i costi associati agli stock di semilavorati nei buffer.

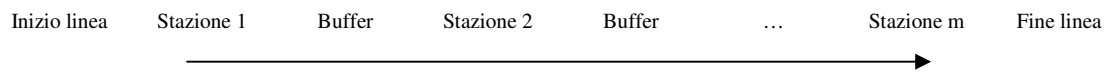


Fig. 1.3, Schema di una linea asincrona con buffer interposti fra le stazioni

Le linee mixed-model sono, nella maggioranza dei casi, asincrone, anche nel caso sia utilizzato in esse un sistema di movimentazione a velocità costante. Questa scelta è dettata dalla necessità di gestire l'assemblaggio di modelli i cui tempi all'interno delle diverse stazioni sono variabili e, dunque, i buffer possono bilanciare temporanee differenze di capacità e di domanda. I buffer possono, inoltre fungere da strumenti di risequenziamento, dato che i semilavorati possono lasciare il buffer anche in ordine diverso da quello in cui vi sono entrati, riducendo le inefficienze causate da un errato sequenziamento dei modelli nella linea.

1.4.2 Numero di prodotti

La seconda dimensione utilizzabile per poter eseguire una classificazione delle linee di assemblaggio è il numero di prodotti assemblati sulla stessa linea. Si possono dunque distinguere tre tipologie di linee.

Le *linee monoprodotto* (o dedicata) che prevedono che un solo prodotto è trattato lungo la linea. Tutte le stazioni devono eseguire le stesse operazioni su identici semilavorati. Il carico di lavoro nelle stazioni rimane costante nel tempo.



Fig. 1.4 Schematizzazione di linea monoprodotto

Le *linee multi-model* secondo cui la produzione di prodotti similari si alterna lungo la linea. A causa di significative differenze nel processo produttivo è necessario un setup della linea ad ogni variazione. La produzione avviene, per minimizzare il costo associato ai setup, per lotti. Si presenta il problema di determinare la dimensione del lotto per bilanciare il trade-off (all'aumentare della dimensione del lotto) che si ha fra la diminuzione dei costi di setup e i costi associati al mantenimento dello stock di prodotti finiti.

A A setup B B B setup C

Fig. 1.5 Schematizzazione di linea multi-model

Linee *mixed-model*: molte versioni di un “prodotto base” sono assemblate lungo la stessa linea. I processi che interessano le diverse versioni sono simili dato che i diversi prodotti non differiscono per caratteristiche essenziali ma solo in alcuni attributi o per caratteristiche opzionali. Di conseguenza vi è un insieme di operazioni principali che sono necessarie per produrre ogni modello e un insieme di operazioni che differiscono per tempo di esecuzione o che possono essere saltate, a seconda delle caratteristiche dello specifico modello. Grazie alle similitudini dei modelli le operazioni di set-up sono nulle o minime. I modelli si alternano lungo la linea per soddisfare la domanda.

Si presenta sia il problema di bilanciare la linea, sia determinare la corretta sequenza con cui alternare i modelli.

B A B C C A A B

Fig. 1.6 Schematizzazione di linea mixed-model

1.4.3 Grado di automazione

A seconda del tipo di attrezzature e del sistema di controllo della produzione, le stazioni possono avere diversi gradi di automazione e flessibilità. Si possono quindi distinguere stazioni manuali, stazioni semi automatizzate e stazioni totalmente automatizzate.

Nelle *stazioni manuali* le operazioni sono svolte da un operatore umano che utilizza semplici attrezzi o macchine utensili.

Nelle *stazioni semi automatizzate* l'intervento umano è limitato alle operazioni di controllo e rifornimento di materiale per i macchinari, i quali svolgono l'operazione in modo automatico.

Nell'ultima tipologia, le *stazioni totalmente automatizzate*, ogni operazione, compreso il controllo e il rifornimento di materiale, viene svolto totalmente dai macchinari, senza la supervisione di operatori umani.

Nel caso di grandi livelli produttivi di un solo prodotto la linea è definita *transfer line*. Le stazioni tendono ad essere di tipo semi automatizzate o totalmente automatizzate e i macchinari contenuti in esse sono altamente specializzati e in grado di assicurare elevatissimi volumi. Il trasferimento dal sistema di trasporto principale della linea e il macchinario interno alla stazione avviene tramite sistemi di movimentazione automatici.

Nel caso sia richiesto un maggior grado di flessibilità la linea è di tipo *flexible transfer line* ed è equipaggiata con macchine *multi-purpose* che possono essere riattrezzate automaticamente per la lavorazione di più prodotti, tramite un sistema automatico di cambio di utensili. Se gli utensili non sono disponibili o è necessario una modifica più radicale della linea, allora la produzione è interrotta e si procede alle normali operazioni di setup. Nel caso di linee ad elevato contenuto di lavoro umano la flessibilità dipende dalle capacità dei lavoratori e dagli utensili richiesti. Infatti, mentre un cambio nel volume produttivo può essere ottenuto cambiando il tasso di produzione di una macchina automatizzata, questo è solo parzialmente fattibile nel caso di un operatore umano. La soluzione può essere, in alcuni casi, l'aggiunta di un maggior numero di operatori, ma va tenuto presente che solo alcune operazioni possono essere svolte in contemporanea da più persone.

Come conseguenza della tipologia di layout e della tipologia di operazioni svolte, le stazioni possono essere definite aperte o chiuse. Questa distinzione fa riferimento alla possibilità che l'operatore (evidentemente umano, in questo caso) possa o meno eseguire le operazioni al di fuori dell'area, fisicamente delimitata, della sua stazione. Le *stazioni chiuse* sono tipiche di operazioni che richiedono particolari condizioni ambientali che sono dunque garantite limitatamente alla stazione stessa. In questo caso l'operatore non può oltrepassare i limiti della stazione e la lavorazione deve essere completata al suo interno.

Nel caso di *stazioni aperte* l'operatore può oltrepassare i confini della sua stazione ed è possibile si verifichino situazioni di sovrapposizione del lavoro con l'operatore della stazione successiva. Non è comunque, di prassi, permesso agli operatori di interferire fra loro nel caso debbano lavorare contemporaneamente sullo stesso semilavorato.

La configurazione può prevedere che la stazione sia aperta solo da un lato. Si parla in questo caso di stazione aperta alla destra o alla sinistra. Le stazioni aperte sono un ottimo strumento di bilanciamento nelle linee mixed-model nelle quali è possibile, per operatori che stanno lavorando su un modello che necessita un maggiore tempo di ciclo, completare le loro operazioni nelle stazioni successive.

1.4.4 Layout

Poiché, come ricordato all'inizio, le linee di assemblaggio sono un sistema produttivo process-oriented il layout delle stazioni e della stessa linea è in gran parte predeterminato dalla

sequenza di lavorazioni necessarie al corretto fluire dei semilavorati. Nonostante questo, comunque, vi sono delle possibili varianti.

Le *linee in serie* consistono nella tradizionale disposizione delle stazioni lungo una linea retta. La movimentazione dei semilavorati avviene tramite un nastro trasportatore.

Al fine di diminuire la sensibilità del sistema produttivo ad eventuali guasti, può risultare utile l'installazione di un maggior numero di corte *linee in parallelo* per la realizzazione di uno o più prodotti. Questo layout presenta numerosi vantaggi. Permette, infatti, una maggiore velocità di adattamento alla variazione di domanda del mercato, modificando le linee esistenti. Il rischio di fermo della produzione a causa di rottura di macchinari è ridimensionato nel suo impatto. Inoltre questo layout permette di avere un più ampio range di tempi ciclo, tali da permettere un miglior bilanciamento della linea dato che esiste una più ampia combinazione di lavori possibili, che, a loro volta, permettono un processo di *job enlargement* (arricchimento del compito dell'operatore umano con nuove operazioni che richiedono lo stesso livello di abilità e implicano lo stesso livello di responsabilità, con il fine di diminuire la ripetitività dei compiti). Infine vi è la possibilità di diminuire gli operatori umani e di raggrupparli in team assegnati ad ogni linea in parallelo che diventa così un'unità produttiva largamente autonoma. La problematica nuova che nasce da questa disposizione è data, nel lungo periodo, dall'ottimizzare il numero di linee in parallelo che operano, dato anche la necessità di maggiore capitale investito, e, nel breve periodo, dall'assegnare i diversi modelli e gli operatori alle diverse linee. Nel caso di *stazioni in parallelo* non si replica l'intera linea ma si installano stazioni multiple. I semilavorati si distribuiscono fra più operatori che eseguono le stesse operazioni. Come nel caso delle linee in parallelo è necessaria l'installazione di un maggior numero di macchinari. Il tempo ciclo globale della stazione diminuisce, allineandosi con quello della linea.

Se la *linea* è, invece, del tipo *a due lati* è possibile un più agevole assemblaggio di prodotti pesanti. Si tratta di linee composte da due normali linee singole disposte in parallelo fra loro. Invece di una singola stazione sul semilavorato operano coppie di stazioni in parallelo sui due lati dello stesso. Se il prodotto lavorato lungo la linea prevede lavorazioni simmetriche per ogni lato o coppie di operazioni sui due lati, allora questa tipologia di operazioni dovrebbe essere svolta sulla stessa stazione. Inoltre, nel caso il prodotto evidenzi simmetrie di lavorazione, l'applicazione di questo layout può estendersi anche a prodotti di dimensioni ridotte, al fine di diminuire la lunghezza totale della linea.

Nelle linee ad U i macchinari sono disposti lungo una linea ripiegata ad U su se stessa, con la disposizione dei macchinari secondo l'ordine delle operazioni necessarie alla creazione del prodotto. Questo layout ha un grande successo nei sistemi JIT, nell'ambito della fabbricazione di prodotti di tipo meccanico o elettronico. Permette, inoltre, di sfruttare la competenze di operatori multi-specializzati, che possono operare contemporaneamente, svolgendo

combinazioni di operazioni, in più punti della linea. La forma permette anche una migliore comunicazione, che si traduce in migliore controllo e più rapido fermo della linea in caso di malfunzionamenti, necessità di un minor numero di macchinari, poiché è possibile raggruppare operazioni simili sui due lati, e una efficace riallocazione degli operatori nelle produzioni mixed-model.

Una tipologia di layout alternativa si può avere nel caso in cui il sistema di movimentazione dei materiali non consista in un nastro trasportatore ma in una *tavola rotante* di tipo mutligiro, la cui rotazione è realizzata attraverso un motore di tipo pneumatico. In questo layout gli operatori sono disposti attorno ad un tavolo in grado di ruotare. Le postazioni sono in un numero fisso e possono essere di tipo automatizzato o manuale. Questo layout permette una considerevole ripetitività dei compiti e consente di assegnare più operazioni al medesimo operatore, in uno stesso ciclo di assemblaggio. L'intero lotto di una singola famiglia di prodotti è completato in n giri della tavola, con $n \geq 2$ (altrimenti si riconduce ad una postazione in linea tradizionale). La tavola è asincrona ed è controllata, solitamente, direttamente dall'operatore che decide quando azionare il meccanismo di rotazione. Questo layout è un'ottima alternativa per produzioni in bassi volumi, con significativi tempi di setup. (Battini et al., 2006).

1.4.6 Variabilità dei tempi nelle operazioni

Focalizzandosi sulle operazioni all'interno delle singole stazioni è evidente come queste possano essere soggette ad un grado di incertezza generato da varie cause. Come linea generale si può assumere che operazioni semplici necessitino di un minor numero di operazioni e, dunque, siano caratterizzate da un basso grado di incertezza nei tempi. D'altro lato le operazioni complesse sono soggette ad una maggiore insicurezza nei tempi, poiché vi può operare un maggior numero di eventi aleatori. Nel caso di un operatore umano, inoltre, va tenuto conto di una variabilità introdotta da fattori psicologici, fisiologici o sociali. Si possono individuare due tipologie (sempre in riferimento al grado di incertezza) di tempi per una linea di assemblaggio.

I *tempi di operazione deterministici*, tipici di linee nelle quali i tempi ciclo sono soggetti a variazioni sufficientemente contenute. Se la linea ha operatori umani, questi devono essere altamente preparati e motivati e il metodo di produzione deve essere sofisticato e robusto. Al crescere del livello di automazione introdotto nella linea è naturale che i tempi siano soggetti a un decrescente grado di variabilità dato che i macchinari sono in grado di lavorare a velocità costanti per tempi indefinitamente lunghi (salvo rotture).

Nel caso di un elevato impatto del lavoro umano è invece opportuno considerare *tempi di operazione stocastici*. Questi tengono in considerazione l'abilità e la motivazione degli operatori, il loro tasso di lavoro e altri fattori (Buzacott, 1990). L'allungamento eccessivo dei

tempi in una stazione può portare alla mancanza di semilavorati nella coda a valle della stazione successiva o il blocco della stazione a monte, nel caso di linee sincrone. Nel caso di linee sincrone, tempi ciclo troppo lunghi possono portare al mancato completamento della lavorazione del pezzo, che dovrà essere completato su stazioni fuori dalla linea. In alternativa la linea dovrà fermarsi o sarà necessario aggiungere altri operatori. (Robinson et al., 1990). Anche i fenomeni di rottura dei macchinari possono essere trattati alla stregua di tempi ciclo eccessivamente lunghi, poiché portano alle medesime conseguenze descritte sopra: la mancanza di semilavorati all'esaurimento dei buffer, nei sistemi asincroni, e la fermata della linea, nei sistemi sincroni. Per descrivere questo comportamento sono dunque utilizzati modelli che tengono conto di tempi stocastici anche in presenza di linee fortemente automatizzate. Un modo di operare ibrido consiste, in questo ultimo caso, nell'adottare tempi deterministici aggiungendovi una componente stocastica che tenga conto dei fenomeni di rottura dei macchinari (Chow, 1987; Hillier and So, 1991).

Una ultima tipologia di tempi tiene in considerazione la curva di apprendimento che si ha negli operatori. Si definiscono i *tempi operazione dinamici*. Il fenomeno di apprendimento è evidente nei periodi successivi all'installazione di una nuova linea dove i tempi vanno diminuendo man mano che l'operatore acquisisce dimestichezza nelle nuove operazioni assegnategli. È un fenomeno, comunque, difficilmente quantificabile, poiché dipende dalla natura delle operazioni, dalla flessibilità del sistema produttivo e della capacità e velocità di apprendimento degli operatori.

1.4.7 Vincoli nell'assegnare le operazioni

L'assegnamento delle operazioni non può, nella maggior parte dei casi, avvenire indifferentemente all'interno di ogni stazione. Vi possono essere sia dei vincoli tecnologici dovuti alla progettazione stessa del prodotto, già accennati all'interno del foglio di ciclo operativo, sia vincoli di altra natura. Se ne individuano principalmente di quattro tipi.

I *vincoli legati all'operazione* si hanno nel caso in cui due o più operazioni debbano essere assegnate alla stessa stazione o porzione di linea. Si verifica nel caso in cui le operazioni necessitino della stessa condizione ambientale o nel caso il semilavorato debba trovarsi in un particolare stato. Questi vincoli vengono modellati tramite il modello della massima distanza (Decoro, 1989). È anche possibile che si verifichi il caso diametralmente opposto, ovvero che due operazioni non possano essere svolte nella stessa stazione. Si usa indicare questo caso con il valore delle minime distanze fra due operazioni. L'insieme di questi vincoli è anche stato raggruppato nella definizione di *vincoli di zona* (Ignall, 1965).

I *vincoli legati alla stazione* si hanno per operazioni che debbano essere effettuate con un particolare macchinario che non è possibile (a costi accettabili) spostare in un'altra stazione.

Inoltre questa classe di vincoli include anche quelli legati all'approvvigionamento di materie prime alla linea, nel caso queste siano disponibili solo in una data sezione della linea per motivi di immagazzinamento.

Nel caso di semilavorati grossi e/o pensanti può essere necessario che il semilavorato sia in una particolare posizione per essere processato. In questo caso si hanno dei *vincoli di posizione*. È preferibile, infatti, far effettuare il minor numero di rotazioni possibili al semilavorato, sia per motivazioni economiche che di fattibilità. Le operazioni da effettuare in una data posizione dovranno dunque essere raggruppate nella stessa sezione della linea. È inoltre importante effettuare una distinzione fra semilavorati fissi al sistema di movimentazione e semilavorati rimovibili (Wilson, 1986). Nel primo caso vi è il problema di effettuare le operazioni richieste senza attraversare la linea. In questo caso è necessario introdurre un secondo operatore o predisporre una linea a due lati.

Nel caso una data operazione debba essere assegnata ad uno specifico operatore si parla di *vincoli di operatore*. I requisiti riguardanti la qualifica di un lavoratore sono determinati dall'operazione più complessa che questo deve essere in grado di svolgere. Quindi, può essere necessario concentrare operazioni complicate in poche stazioni. Un altro vantaggio in questo approccio consiste nel determinare la corretta retribuzione per ogni tipologia di operatore, in proporzione alla sua abilità.

Un ultimo vincolo che può rientrare sotto questa tipologia riguarda il concetto di *job design*. È necessario, infatti, tenere conto della progettazione del lavoro di ogni operatore umano, considerando le possibilità di arricchimento e allargamento delle sue mansioni (Zäpfel, 1975; Globerson e Tamir, 1980).

1.4.8 Metodologie di lancio in produzione dei modelli e sequenza di introduzione

Dal punto di vista dell'intervallo di lancio in produzione dei prodotti possiamo distinguere 2 filosofie.

Il *lancio ad intervalli fissi* prevede, nelle linee sincrone, che sia iniziata la lavorazione di un prodotto lungo la linea ad ogni intervallo t_c , tempo ciclo. I semilavorati risulteranno equidistanti lungo il sistema di movimentazione. Il *lancio ad intervalli variabili* risulta essere una strategia più flessibile e minimizza il tempo di ozio della prima stazione, poiché una seconda unità è lanciata in produzione nel momento in cui la stazione ha completato le operazioni necessarie sulla prima. Poiché i tempi ciclo della stazione sono soggetti ad un grado di incertezza (come discusso in precedenza) i semilavorati risulteranno non equidistanti lungo il sistema di movimentazione e lo spazio fra loro rispecchierà il tasso di produzione della prima stazione. Ne possono derivare, nelle stazioni successive, tempi di ozio o mancanza di semilavorati.

Solitamente per risolvere, in parte, i problemi dei precedenti metodi, si basa la strategia di lancio concentrando la propria attenzione sulle stazioni collo di bottiglia (ovvero quello il cui tempo ciclo risulta maggiore). L'intervallo di lancio viene dunque scelto saturando queste stazioni, ovvero ponendo il tempo di lancio pari al tempo ciclo della stazione, poiché questa è identificata come punto critico per l'intera linea. Un altro importante punto quello della sequenza di introduzione, ovviamente per linee mixed model.

Questo, per una linea di assemblaggio multi prodotto, influenza di gran lunga l'efficienza dell'intera linea.

Infatti al problema di lungo-medio termine di bilanciamento della linea di assemblaggio (Baybars, 1986; Scholl e Becker, 2006; Boysen, 2006) si aggiunge il problema di breve termine del sequenziamento, che mette in luce la necessità di stabilire temporalmente la sequenza produttiva di un dato numero di modelli. Poiché le sequenze di produzione dei vari modelli tecnicamente realizzabili sono molte, risulta necessario prestare attenzione alla pianificazione della produzione, tenendo in considerazione gli impatti economici e di saturazione delle stazioni riferite alla suddivisione equa del lavoro nel rispetto del tempo ciclo in un determinato istante di tempo. In particolare l'utilizzo delle stazioni di lavoro e la ripartizione della domanda dei materiali sono determinate dalla sequenza dei modelli e sono oggetto di diversi obiettivi (Bard, 1994). Considerando, per esempio, le variazioni nei tempi di produzione all'interno delle stazioni di lavoro causate dai diversi modelli, si possono avere dei sovraccarichi di lavoro in determinate stazioni. Questi si possono evitare trovando la sequenza di modelli, tale che i modelli che richiedono alle stazioni tempi di lavorazione maggiori siano intervallati da quelli che necessitano di tempi più brevi.

Per esempio, nell'industria automobilistica, l'installazione dell'apertura elettronica del tettuccio richiede un tempo diverso da quello necessario per l'apertura manuale. Se alcuni modelli del primo tipo si susseguono nella stessa stazione, la stazione potrebbe venire sovraccaricata di lavoro. D'altra parte però i diversi modelli sono composti da opzioni diverse, perciò richiedono diverse parti e materiali; pertanto la sequenza produttiva dei modelli influenza la anche domanda dei materiali oltre il tempo di lavorazione. L'approccio JIT si focalizza sulle variazioni nelle richieste dei materiali. Nelle linee di assemblaggio il livello di produzione desiderato incide sulla richiesta di rifornimento dei materiali (Monden, 1998), e la pianificazione della sequenza produttiva serve per facilitare tale richiesta. Se si pensa che un importante prerequisito per il rifornimento JIT efficace, è il tasso della domanda poco variabile, salvo perdere di contro i vantaggi JIT con un ampliamento della scorta di sicurezza, si capisce l'importanza del sequenziamento.

1.4.9 Volume di produzione e variabilità della domanda

I volumi produttivi possono essere descritti sulla base di *piccoli lotti di assemblaggio e produzioni di massa*. Tipicamente questo parametro è individuato dal tempo ciclo, che può essere anche lungo alcuni giorni o mesi. Tipico il caso dell'assemblaggio a posto fisso, dove i tempi di assemblaggio sono lunghi. Una caratteristica molto importante da considerare nel momento della progettazione del sistema di assemblaggio è la variabilità della domanda. Infatti il fatto che i volumi produttivi possano variare, o che il mix dei diversi prodotti possa variare causa tipicamente inefficienze nel bilanciamento e controllo della linea. Questo effetto può essere ridotto sia con interventi nel breve termine, ad esempio ottimizzando il sequenziamento di produzione, oppure anche prevedendo la variabilità e gestendola nel modello di bilanciamento, utilizzando ad esempio funzioni obiettivo ad hoc, oppure dimensionando correttamente i buffer per linee a cadenza non imposta.

1.4.10 Gestione dei materiali

La gestione dei materiali lungo una linea di assemblaggio è una attività critica, ed in generale al di là della metodologia di produzione usata. Tutte le aziende tentano di ridurre i livelli di stock poiché questo rappresenta un immobilizzo di capitale e non genera profitto. Questo riferito alle linee di assemblaggio rispecchia questa filosofia, tuttavia al contempo deve assicurare l'operatività in condizioni efficienti di esercizio. Il problema si riflette a sua volta non solo nella scelta del livello di stock, ma anche nel grado di centralizzazione decentralizzazione dei magazzini. A livello di linea ciascuna necessita di essere alimentata di componenti su ciascuna stazione rispetto al piano di produzione. La decisione delle frequenze di alimentazione contro il livello di scorta lungo linea rappresenta un problema di definizione della miglior politica di riordino di piccoli magazzini rispetto a magazzini centrali interni/esterni ed è collegata ai costi e sistemi di movimentazione e ai sistemi di alimentazione che devono essere definiti in fase di progettazione della linea.

1.4.11 Microlayout ed ergonomia della stazione

E' evidente oltre che provato sperimentalmente che considerazioni ergonomiche possono cambiare il layout dei sistemi di produzione, come per esempio le stazioni di assemblaggio, e modificare i tempi di esecuzione dei tasks. Oltretutto l'ergonomia dei sistemi produttivi influenza non solo lo stato di salute degli operatori, la loro soddisfazione e motivazione nel lavoro, ma anche la qualità del processo di produzione e quindi anche la qualità dell'output del sistema produttivo. E' evidente quindi che questo fattore risulta importante nella definizione di progettazione di un sistema di assemblaggio, anche se storicamente non veniva considerato.

1.4.12 Obiettivi di bilanciamento

Come detto le decisioni sull'installazione di linee di assemblaggio sono decisioni di lungo termine, strategiche con elevato impatto sui capitali investiti. Per questo importante che siano progettate e bilanciate nella maniera più efficiente possibile. In letteratura sono presenti diversi approcci sia metodologici per raggiungere l'obiettivo di riferimento (balancing) , sia diversi obiettivi, in funzione delle scelte strategiche fatte.

Fondamentalmente possono essere suddivisi in 2 grandi blocchi:

- Obiettivi legati alla capacità produttiva (o tecnici)
- Obiettivi legati ai costi o ai profitti (o economici)

Tutti i fattori precedentemente descritti possono o meno essere tenuti conto negli obiettivi di design e bilanciamento delle linee, e questa di fatto è la frontiera della ricerca. Inoltre storicamente gli obiettivi economici sono stati messi in secondo piano essendo l'ottimizzazione dell'utilizzo della capacità produttiva.

All'interno di sistemi in linea di assemblaggio multi prodotto assieme al problema del lungo periodo che contiene problemi come la definizione del bilanciamento, il layout, il numero e tipologia di risorse, la gestione dei materiali, ecc vi sono obiettivi di breve periodo, come la scelta del sequenziamento dei modelli da produrre nella linea (sequencing).

2. Classificazione dei Layout dei sistemi di assemblaggio

La pianificazione del layout all'interno di un ambiente industriale è parzialmente determinata dal flusso dei materiali. Ciò nonostante esistono alcune tipologie di layout ricorrenti. Le principali sono:

- linee seriali,
- linee seriali con stazioni in parallelo,
- linee seriali con stazioni in serie,
- linee ad U,
- linee in parallelo,
- linee con due lati,
- a postazione fissa,
- tavola rotante.

2.1 Linee seriali

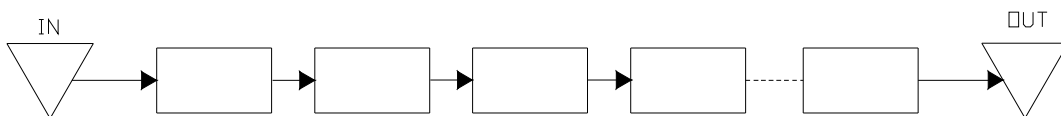


Fig. 2.1 Layout in linea

Tradizionalmente le linee di assemblaggio sono organizzate come delle linee in serie (o dritte), dove si hanno in sequenza diverse stazioni collegate da un sistema di movimentazione. Tali configurazioni presentano alcuni vantaggi come:

- il flusso dei materiali è regolare e quindi abbastanza semplice da controllare;
- alta utilizzazione delle attrezzature;
- non richiede alta movimentazione manuale dei materiali, in quanto i pezzi sono movimentati da una stazione ad un'altra da un sistema di trasferimento meccanico;
- non necessitano di alta specializzazione degli operatori, e quindi più facilità nel reperire manodopera.

Risparmi nel capitale investito e nel tempo delle attività, sono possibili se i compiti con requisiti simili sono assegnati alla stessa stazione.

Tra gli svantaggi si riscontra:

- difficoltà di ottenere alta utilizzazione del lavoratore, in quanto i tempi di attività sono discreti e ogni stazione della linea deve avere lo stesso tempo medio di ciclo;
- poca flessibilità a causa dell'alto grado di specializzazione;
- poco adatto al lavoro di gruppo;
- poco propizio alla comunicazione;
- scarso contatto visivo fra gli operatori;
- l'alto grado di divisione del lavoro da luogo a compiti semplici e monotoni, ciò comporta alto assenteismo e alta percentuale di ricambio fra i lavoratori.

Molti di questi svantaggi, come si vedrà in seguito, si possono superare con facilità realizzando un layout con forma ad U.

2.1.1 Duplicazione delle linee seriali

Imman e Leon (1994), introdussero la possibilità di duplicare alcune stazioni nelle linee seriali. Le stazioni candidate ad essere duplicate sono quelle che fungono da collo di bottiglia (hanno il tempo di ciclo più alto) o presentano un'alta percentuale di fermo. Queste duplicazioni però presentano maggiori problemi nello scheduling.

2.1.2 Linea dritta con stazioni in parallelo

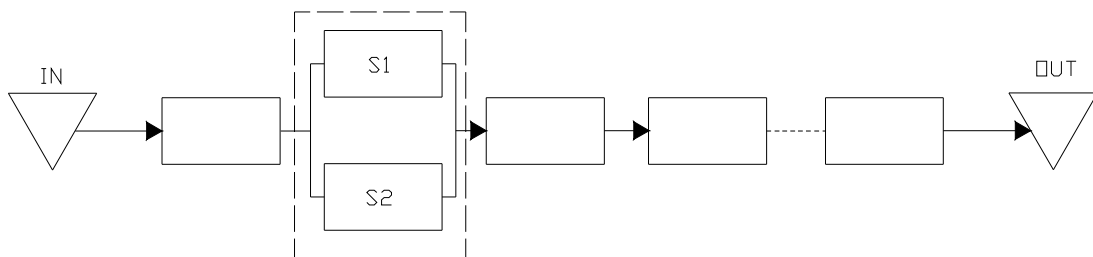


Fig.

Fig. 2.2 Stazioni in parallelo

I vantaggi della parallelizzazione, si possono applicare anche in una linea singola, installando una o più stazioni di lavoro in parallelo.

Si tratta della forma più semplice di parallelismo, dove si applica la duplicazione delle stazioni; ci sono due identiche stazioni di lavoro che eseguono lo stesso compito e sono attrezzate con le stesse attrezzature.

Lavorando con stazioni in parallelo, si riesce a ridurre il tempo di ciclo globale del sistema, se alcune operazioni presentano un tempo di lavoro più lungo del tempo di ciclo desiderato. Sono proprio queste operazioni ad essere assegnate alle stazioni in parallelo.

La duplicazione delle stazioni in parallelo risulta più efficiente rispetto alla duplicazione in serie, in quanto le stazioni risultano indipendenti fra loro. Tuttavia i costi connessi allo spazio extra richiesto e per il sistema di movimentazione sono così alti che la duplicazione in serie è spesso preferita.

Un altro problema della duplicazione in parallelo, è la possibilità di perdere la sequenza dei prodotti e quindi nasce la necessità di ristabilire la giusta sequenza all'uscita dalle stazioni duplicate.

Ad esempio, si consideri la seguente sequenza relativa ad un processo di verniciatura di macchine, che deve essere realizzata in ogni stazione (R = red, B = blue, W = white).

Sequenza	R	R	R	R	R	B	B	B	B	B	W	W	W	W	W
N.Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Figura 2.3. Sequenza operazioni processo di verniciatura di una macchina (M. Savsar 1995)

L'operazione inizia con cinque verniciature rosse, seguite da cinque verniciature blu ed infine cinque verniciature bianche. Se si lavora in una linea seriale con stazioni in parallelo, quando, ad esempio la verniciatura rossa numero 5, viene introdotta nella prima stazione duplicata (S1), è possibile inoltrare anche l'operazione blu con numero di sequenza 6 nella seconda stazione duplicata (S2), dopo un breve periodo di tempo. Se l'operazione di verniciatura rossa termina prima della blu, la sequenza si conserva, mentre in caso contrario, si perde la sequenza originaria. Occorre quindi ristabilire la sequenza dei prodotti oppure cambiare il set-up della stazione (Savsar 1995).

Un altro modo per ridurre il tempo globale di ciclo, quando il tempo di lavoro di alcune operazioni è maggiore di quello desiderato, è il concetto dei compiti in parallelo. Questi compiti sono assegnati a molte stazioni della linea seriale che li compie ciclicamente fino a completarli su diversi pezzi. (Scholl, 1995)

2.1.3 Linea dritta con stazioni in serie

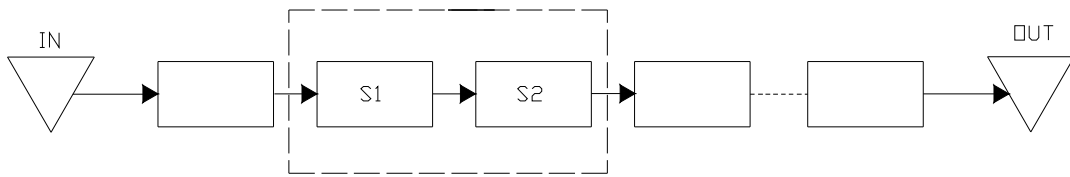


Fig. 2.4 stazioni in serie

Questo tipo di duplicazione richiede minori spazi rispetto e minori costi nei sistemi di trasporto rispetto alla duplicazione in parallelo, tanto che nella maggior parte dei casi sono preferite rispetto a queste ultime.

Tuttavia tali linee presentano una minor efficienza rispetto a quelle precedentemente esaminate in quanto le stazioni sono tra loro dipendenti.

Non nasce mai la necessità di ristabilire la sequenza desiderata dei prodotti all'uscita della duplicazione, in quanto i prodotti sono obbligati a fluire lungo la duplicazione nello stesso ordine in cui sono entrati. Un prodotto non può entrare in S2, fino a che non abbia attraversato S1, e non può lasciare quest'ultima fino a che S2 non sia vuota.

2.2 Linea ad U

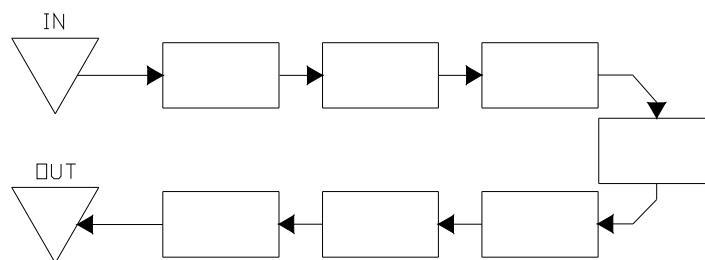


Fig. 2.5 Linea ad U

Hall (1983), Monden (1983) e Schonberger (1982) furono i primi ricercatori occidentali a scrivere lavori sulle linee ad U, essenzialmente rifacendosi a produttori giapponesi, soprattutto riferiti a speciali tipi di celle nella produzione JIT, come un sistema di produzione pull con l'obiettivo di migliorare la qualità e diminuire gli sprechi diminuendo al contempo i costi di produzione. E per questo tale tipologia di layout, dalla forma caratteristica ad U, viene

realizzata, di recente, in molti contesti industriali al posto della tradizionale configurazione in linea.

Le macchine sono disposte lungo una linea ad U, nell'ordine nel quale sono svolte le operazioni di produzione. Questa tipologia di layout è diventata una alternativa per i sistemi di assemblaggio da quando gli operatori sono diventati multi-specializzati e riescono a svolgere compiti in parti diverse all'interno della forma ad U della linea. Ad un operatore viene assegnato il compito di supervisionare sia l'entrata, sia l'uscita della linea. Gli operatori si possono muovere fra i due lati della linea, e riescono a svolgere combinazioni di compiti che non sarebbero altrimenti permessi nella linea dritta. Per questo le differenze ed i vantaggi di questa tipologia di layout sono maggiormente riscontrabili dove il bisogno di flessibilità aumenta, quindi per esempio nella produzione mixed model rispetto a quella single model.

L'entrata e l'uscita della linea è posta nella stessa posizione, quindi, quando un prodotto finito è prelevato dalla linea, un nuovo set di materiali è immesso nella stessa quindi, nessun materiale viene inoltrato nella linea a meno che un prodotto finito non la abbandoni. Si può ritrovare al massimo una unità di scorte di materiale in corso di lavorazione (WIP) fra due macchine adiacenti della linea, e questo ovviamente rende la linea molto sensibile ai problemi, e ogniqualvolta insorge un problema con un prodotto o una macchina, la linea si ferma velocemente (Miltenburg, 2000).

I vantaggi della linea ad U rispetto alla linea tradizionale sono:

- miglioramenti nella visibilità e nella comunicazione, a causa della vicinanza fra gli operatori. Quando sorge un problema nella qualità viene individuato e risolto velocemente. Inoltre grazie a tale configurazione è più facile per gli operatori aiutarsi a vicenda quando sorgono dei problemi. Si riscontrano miglioramenti nel lavoro di gruppo che danno un più alta sensazione di appartenenza e incrementano il senso di responsabilità.
- Gli operatori sono multi-specializzati per compiere tutte le operazioni della linea. Grazie a ciò riescono a spostarsi fra le varie stazioni, e quindi compiere tutti i lavori richiesti. Grazie alle loro abilità riescono a rispondere in maniera efficiente a problemi quali i cambi nel tempo di ciclo o nella percentuale di output della linea. Inoltre riescono a comprendere le relazioni fra le varie operazioni risultando così più abili a ricercare miglioramenti.
- La percentuale di output della linea in un contesto JIT cambia frequentemente. In questa situazione, la linea ad U è preferibile rispetto al layout in linea per effetto della flessibilità di volume. Attraverso l'aggiunta o la rimozione degli operatori, l'azienda riesce ad aggiustare la percentuale di produzione alle necessità.

- Il numero di stazioni di una linea ad U non è mai maggiore a quello richiesto in una linea dritta. Questo si verifica in quanto in questa tipologia di layout c'è più possibilità di raggruppare più operazioni in una stazione.
- A causa della più corta distanza da fare a piedi rispetto alla linea dritta, è più facile per un operatore tener sotto controllo molte stazioni di lavoro.
- La linea ad U non necessita di particolari sistemi di trasporto, infatti molto spesso sono gli operatori a muovere il prodotto da una macchina all'altra.

Le linee ad U sono utilizzate soprattutto per fabbricare prodotti discreti di tipo meccanico o elettronico.

Esistono tre tipi di stazioni nelle linee ad U (Miltenburg, 1997):

- Regular station : tutte le stazioni in una linea tradizionale sono di tipo regular. Non c'è la presenza di distanze di attraversamento, e la distanza di ritorno è pari alla somma della distanza delle stazioni. Grandi stazioni di tipo regular non sono desiderabili nel layout a U, in quanto rendono i problemi difficili da risolvere. Stazioni di questo tipo sono limitate a non più di 5 o 6 compiti, quindi stazioni più grandi devono essere di tipo crossover o multiline.
- Crossover station : include due gruppi di compiti collocati in differenti lati della linea. L'operatore o gli operatori addetti ad una crossover station esegue tutte le operazioni dei 2 lati della linea a cui è affidato, come se fossero 2 stazioni di una classica linea dritta.
- Multiline station: include compiti collocati in due linee ad U adiacenti. In aggiunta alla distanza di ritorno sarà presente quella relativa alla distanza fra le due linee.

La configurazione a U descritta fino a questo momento è quella semplice, questa disposizione, può essere utilizzata da sola o come fondamento per linee ad U più complesse, come:

- multi-line in a single U,
- double –dependent U-lines,
- embedded U-lines,
- figure-eight-pattern U-lines,
- multi-U-line facility.

Alcune di queste sono appropriate per produrre due tipi di prodotto, altre per produrne tre o anche più di tre. Molte di queste linee sono utilizzate per aumentare la flessibilità e per utilizzare meglio la manodopera. La seguente classificazione e descrizione delle linee ad U più complesse è stata ricavata dal lavoro svolto da Miltenburg (2001).

2.2.1. Multi-line in a single U

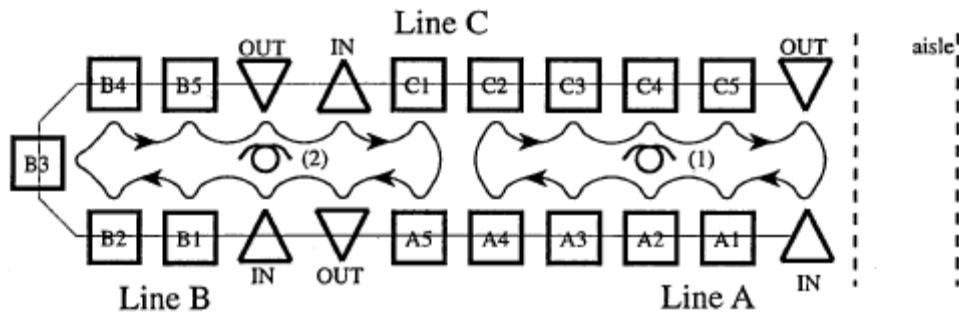


Fig. 2.6: Three lines in a single U (Miltenburg, 2001)

La Fig. 6 mostra linee di produzione per tre prodotti A-C, organizzate in una singola linea ad U gestita da due operatori. Questa disposizione delle linee risulta abbastanza flessibile; viene utilizzato un solo operatore, lasciandolo muovere in tutte e tre le linee quando è richiesto un basso output, mentre c'è la possibilità di aggiungere operatori in più quando l'output da realizzare aumenta.

2.2.2. Double-dependent U-lines

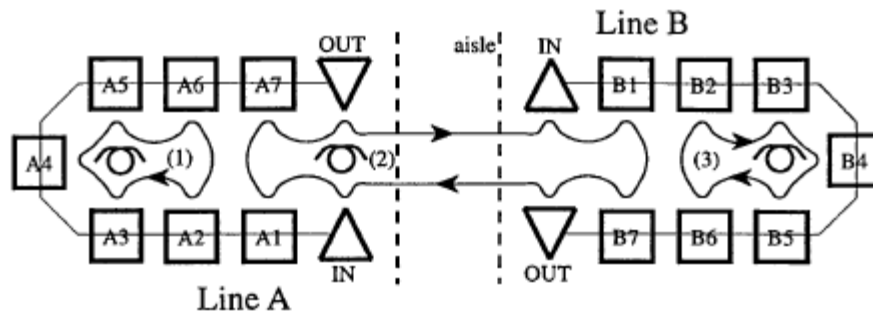


Fig. 2.7: Double-dependent U-lines (Miltenburg, 2001)

La Fig. 7 mostra due linee ad U gestite da tre operatori. Anche in questo caso la disposizione risulta essere abbastanza flessibile. C'è la possibilità di aumentare o diminuire il numero di operatori all'interno della linea a seconda delle richieste di prodotti da assemblare.

2.2.3.Embedded U-lines

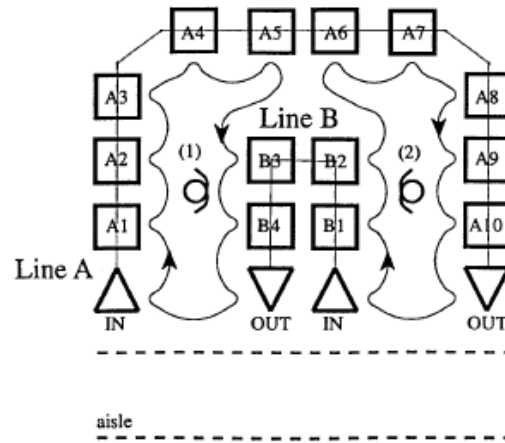


Fig. 2.8: Embedded U-lines (Miltenburg, 2001)

La Fig. 8 mostra una linea ad U di grandi dimensioni che circonda una linea più piccola. Le due linee sono gestite da due operatori.

Si tratta di una linea ad U complessa a causa del molto spazio richiesto e quindi del conseguente richiesta di molto movimento degli operatori. Il più grande svantaggio che si può riscontrare è che generalmente un operatore non riesce a controllare l'entrata o l'uscita della linea.

2.2.4. Figure-eight-pattern U-lines

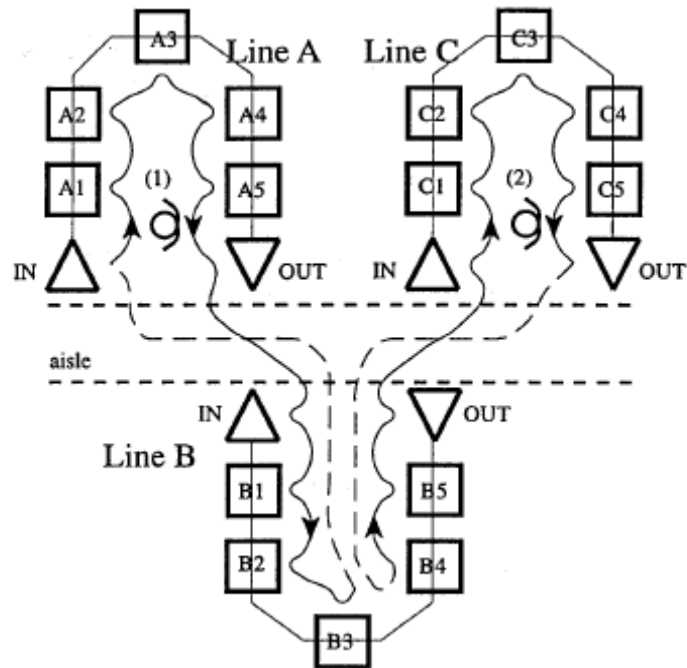


Fig. 2.9: Figure-eight pattern: three U-line with two operators (Miltenburg, 2001)

La Fig. 9, mostra tre linee (A, B, C), gestita da due operatori. L'operatore 2 svolge le sue operazioni nella linea A e nella prima metà della linea B, mentre l'operatore 1 lavora nella linea C e nella seconda metà della linea B. Questa configurazione è chiamata ad otto proprio perchè i percorsi fatti dagli operatori, come si vede dalla figura, hanno una forma a otto.

2.2.5. Multiple U-line facility

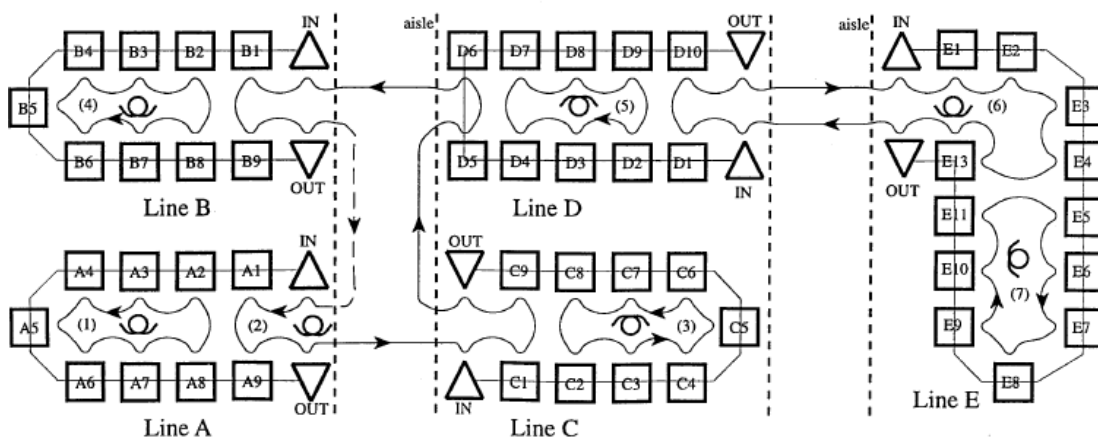


Fig. 2.10: Multiple U-line facility (Miltenburg, 2001)

Questa tipologia di linea ad U è stata descritta per la prima volta da Monden (1983).

E' costituita da cinque linee, gestite da sette operatori. Alcuni di essi non lavorano solo all'interno di una linea, ma si spostano anche in quelle vicine, si veda ad esempio l'operatore 2 che si sposta nella linea A, C, D, e B.

2.3.Linee in parallelo

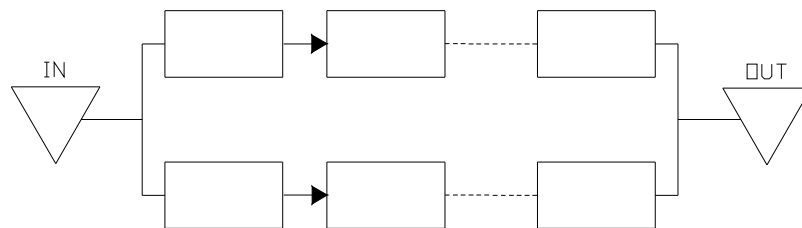


Fig. 2.11 Layout in linee parallele

Questa tipologia di linea consente dei vantaggi dovuti essenzialmente alla maggiore flessibilità ai volumi e al mix data dalla sua configurazione. Infatti, in un contesto multi-model, l'installazione di una linea in parallelo, utilizzata per assemblare un prodotto o una famiglia di prodotti, permette di aumentare la flessibilità. Le linee in parallelo consentono alla direzione dell'azienda di reagire ai cambiamenti nella domanda, in quanto il numero delle linee che lavorano può essere cambiato. Il rischio che la rottura delle macchine blocchi la produzione è basso. Inoltre, l'uso delle linee in parallelo permette l'estensione del tempo di ciclo e ciò produce molti vantaggi.

- Si può ottenere un miglior bilanciamento della linea in quanto esistono maggiori combinazioni di compiti.
- Possibilità di un'estensione del lavoro in orizzontale, quindi ai lavoratori sono assegnati compiti differenti.

Con un numero flessibile di linee in parallelo è possibile realizzare un ottimo tempo di ciclo altrimenti non possibile con una sola linea che soddisfa l'intera domanda.

Un problema strategico in tali linee di produzione è quello di trovare il numero ottimale di linee, in quanto un aumento di queste ultime comporta un inevitabile aumento del capitale investito, il principale svantaggio a tale applicazione assieme al maggiore spazio necessario.

Sebbene sia desiderabile ottenere un alto livello di output, è anche importante avere un accettabile livello di input per implementare tale tipo di layout. Questi input sono il numero di

lavoratori e un numero di tale di macchinari per muoversi sulla linea. Una ricerca condotta da Wild (1975), dimostra che per un dato numero di lavoratori e per un dato spazio disponibile non che per un sufficiente numero di prodotti disponibili da lavorare, il layout a linee parallele porta a minori tempi inattivi rispetto ai tradizionali sistemi di assemblaggio

A questo proposito, è utile ricordare anche il lavoro di Engstrom et al. (1996) sulle linee di assemblaggio dalla casa automobilistica svedese, Volvo. Nel 1989, venne introdotta la parallelizzazione nel sistema di assemblaggio nello stabilimento di Boras (Svezia), e vennero usate quattro linee parallele chiamate “ three-stage-docks” per diverse varianti di prodotto. Tale modifica venne applicata anche in modo da migliorare l’ergonomia in alcune stazioni di lavoro. Inizialmente la produzione in questo stabilimento presentava alcuni problemi, soprattutto relativi alla qualità. Tali inconvenienti, erano causati principalmente dall’apprendimento e dall’istruzione delle persone coinvolte nella progettazione. Per alcuni tempi, si contemplò l’idea di rimpiazzare le linee con delle linee di assemblaggio tradizionali. Dopo tre anni la qualità e la produttività dello stabilimento, aumentarono in maniera sensibile. Questo miglioramento accadde in un periodo di tempo relativamente corto. Nel 1981, Eckerstrom e Sodahl, evidenziarono che la produzione nello stabilimento di Boras era del 26% più efficiente rispetto alle linee di assemblaggio tradizionali.

2.4 Linee con due lati

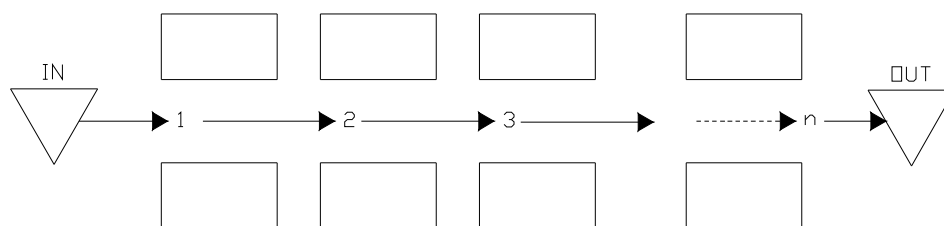


Fig. 2.12 Layout con linee a due lati

Sono caratterizzate dal fatto che vengono utilizzati entrambi i lati (destro e sinistro) della linea , mentre nelle linee tradizionali viene occupato solo un lato. Una coppia di stazioni poste una di fronte all’altra si denominano “matesation”, mentre una chiama l’altra “companion” (Lee et al. 2001).

Questa tipologia di layout si ritrova principalmente in quegli ambienti industriali in cui si assemblano prodotti di grandi dimensioni e molto pesanti, come ad esempio nella produzione di bus e camion.

Alcune operazioni possono essere assegnate solo ad un lato della linea; alcune possono essere assegnate a entrambi i lati; altre infine devono essere assegnate simultaneamente ad ambo i lati della linea, in modo tale da far collaborare operatori che si trovano in parti opposte della stessa. Due persone riescono a lavorare assieme allo stesso compito solo quando non si ostacolano l'uno con l'altro, proprio per questo motivo questa tipologia di layout è più agevole da utilizzare quando si lavora con prodotti di grandi dimensioni.

Le considerazioni fatte riguardo al lato preferito per compiere le operazioni, è molto importante in quanto può influenzare la produttività della linea, in particolare quando si assegnano i compiti, si progetta il layout e si posizionano gli strumenti e le attrezzature (Lee et al. 2001 pag. 274).

Le linee di assemblaggio di questo tipo presentano molti vantaggi rispetto alle linee ad un solo lato:

- si possono avere linee più corte, il che vuol dire che sono richiesti meno lavoratori;
- riduzione del tempo totale di produttività;
- riduzione dei costi di strumenti e apparecchiature, infatti possono essere usati da entrambi i lati
- riduzione del trasporto di materiali, movimento degli operatori e dei tempi di set-up, i quali altrimenti non possono essere facilmente eliminati (Bartholdi,1993).

2.5 Postazione fissa

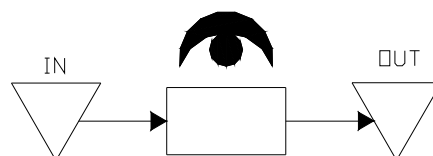


Fig. 2.13 Layout a postazione fissa

Il layout a fissa non è molto comune, tuttavia viene utilizzato normalmente quando i prodotti sono molto fragili, grandi, grossi o pesanti da movimentare. Si ritrova tipicamente nelle aziende che producono prodotti di grandi dimensioni come navi ed aerei.

In tale configurazione, macchine, materiali e/o lavoratori si muovono in un sito di assemblaggio (denominato isola di assemblaggio), mentre i prodotti rimangono fissi in un luogo per l'intero periodo di assemblaggio (Huang et al. 2006).

I vantaggi che si individuano sono:

- riduzione nella movimentazione dei pezzi da lavorare;
- riduzione dei rischi di danneggiamento;
- più continuità della forza lavoro assegnata al prodotto.

Mentre gli svantaggi sono molteplici:

- spazio limitato al sito;
- volume e varietà di articoli richiesti altamente dinamica con complessità nella gestione dei materiali;
- richiesta di attrezzature versatili;
- impossibilità di muovere il prodotto durante la produzione, cosicché tutti i movimenti di materie prime, personale, componenti e attrezzature seguono determinati percorsi dal fornitore al luogo di lavorazione del prodotto;
- il movimento delle persone e delle attrezzature, da e per il sito di lavoro diventa costoso;
- i lavoratori devono essere molto specializzati;
- la necessaria combinazione di capacità negli operatori è molto difficile da trovare, e comunque richiede alte remunerazioni;
- l'utilizzazione delle attrezzature diventa bassa quando la movimentazione frequente delle stesse da un sito ad un altro è costosa, di conseguenza nasce la necessità di acquistare più attrezzature dello stesso tipo aumentando così i costi fissi.

2.6 Tavola rotante

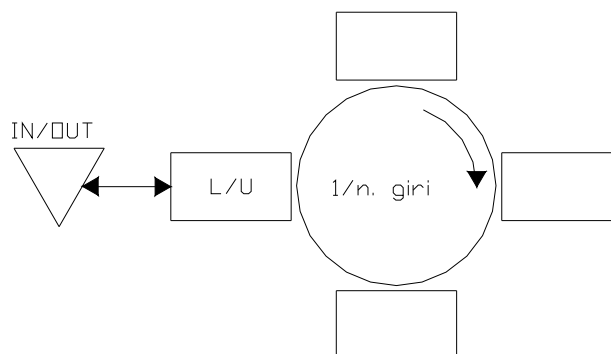


Fig. 2.14 Layout a tavola rotante

La tavola rotante è un particolare tipo di layout che permette una considerevole ripetitività dei compiti e consente di assegnare più operazioni, in uno stesso ciclo di assemblaggio, ad un operatore, in modo tale da ridurre la monotonia e la noia dello stesso.

La tavola rotante è un tipo di layout multigiro, infatti l'intero lotto di una singola famiglia di prodotti è completato in n giri della tavola, con $n \geq 2$. Se non ci fossero tali giri, tale layout sarebbe molto simile a quello in linea.

La rotazione della tavola è realizzata attraverso un motore di tipo pneumatico.

E' consigliato soprattutto quando le operazioni sono sia manuali sia automatizzate, volumi produttivi molto bassi e tempi significativi di set-up.

L'intervallo di lancio non è fisso, un pezzo lascia una stazione per la successiva, quando tutte le risorse hanno completato il loro lavoro, per questo motivo solitamente nella tavola sono presenti dei pulsanti che gli operatori premono quando hanno terminato il loro lavoro, in modo tale da far ruotare la tavola.

Il tempo inattivo, dipende dalla velocità degli operatori e dal bilanciamento delle stazioni.

Il tempo di switch (t_s), è pari al tempo di ogni singolo switch, risulta fisso e dipende dalle dimensioni del prodotto da assemblare e dal rischio di danneggiamento.

Questo layout è presente in molti contesti industriali, come una alternativa efficace al layout a postazione fissa (Battini et al. 2006).

Viene utilizzato soprattutto per assemblare pezzi di piccole dimensioni, come ad esempio circuiti elettrici, visto che deve essere agevole per gli operatori lavorare assieme sopra alla tavola.

2.8. Tabella riassuntiva

Di seguito, viene proposta una tabella riassuntiva delle varie tipologie di layout prese in considerazione, elencando i rispettivi vantaggi, svantaggi e il contesto industriale in cui comunemente si ritrova il layout esaminati.

TIPI DI LAYOUT	VANTAGGI	SVANTAGGI	CONTESTO INDUSTRIALE
LINEE SERIALI	<ul style="list-style-type: none"> •Semplici da controllare. •Bassa movimentazione manuale. •Alta utilizzazione attrezzature. •Operatori poco specializzati. 	<ul style="list-style-type: none"> •Poco adatto al lavoro di gruppo •Poca flessibilità •Scarso contatto visivo fra gli operatori •Monotonia nel lavoro. 	<p>SETTORE MECCANICO</p> <p>ED</p> <p>ELETTRONICO</p>
LINEE DRITTE CON STAZIONI IN SERIE	<ul style="list-style-type: none"> •Necessitano di minori spazi. •Aumento della produttività della linea •Minori tempi di ciclo. •Non nasce il problema di ristabilire la giusta sequenza all'uscita delle stazioni duplicate in quanto il prodotto è forzato a scorrere nella linea nella stessa sequenza in cui è entrato. •Minor efficienza rispetto alla duplicazione in parallelo in quanto le stazioni risultano dipendenti fra loro. 	<ul style="list-style-type: none"> •Maggiori complicazioni nello scheduling. 	<p>SETTORE MECCANICO E AUTOMOTIVE</p>
LINEE DRITTE CON STAZIONI IN	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento della 	<ul style="list-style-type: none"> •Maggiori complicazioni nello 	<p>SETTORE MECCANICO E AUTOMOTIVE</p>

<p>PARALLELO</p>	<p>produttività della linea.</p> <ul style="list-style-type: none"> •Minori tempi di ciclo. •Più efficienti rispetto alla duplicazione in serie in quanto le stazioni sono indipendenti fra loro. 	<p>scheduling.</p> <ul style="list-style-type: none"> •Richiede maggiori spazi. •Maggiori costi nei sistemi di trasporto dei materiali. •Possibilità di perdere la sequenza dei prodotti all'uscita delle stazioni duplicate e quindi necessità di ristabilire la giusta sequenza delle operazioni. 	
<p>LINEE AD U</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Miglioramenti nella visibilità e nella comunicazione. • Brevi tempi di reazione nel caso di guasti. • Flessibilità ai volumi. • Minore numero di stazioni rispetto ad una linea dritta. • Non necessita di particolari sistemi di trasporto. • Percorsi più corti all'interno del sistema. • Operatori multi specializzati, che rispondono con abilità ai problemi. 	<ul style="list-style-type: none"> •Utilizzazione ridotta o impossibile nei tratti a nastro nelle due aree d'angolo •Messa a disposizione dei pezzi di grandi dimensioni nei posti di lavoro più difficoltosa 	<p>ASSEMBLAGGIO DI PRODOTTI MECCANICI ED ELETTRONICI</p>

<p>LINEE CON DUE LATI</p>	<ul style="list-style-type: none">•Linee più corte.•Richiesta di un numero minore di lavoratori.•Riduzione dei costi di strumenti e attrezzature.•Riduzione del trasporto dei materiali.•Riduzione del movimento degli operatori.•Riduzione nei tempi di set-up.	<ul style="list-style-type: none">•Utilizzabile solo per prodotti di grandi dimensioni.•Necessità di una più accurata disposizione delle attrezzature e assegnazione dei compiti.	<p>PRODOTTI DI GRANDI DIMENSIONI</p>
---------------------------	---	--	--------------------------------------

<p>POSTAZIONE FISSA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione movimentazione di pezzi da lavorare. • Minori rischi di danneggiamento. • Più continuità nella forza lavoro assegnata al prodotto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede bassi volumi. • Spazio limitato al sito. • Necessità di attrezzature versatili. • Impossibilità di muovere il prodotto durante la lavorazione. • Lavoratori specializzati. • Maggiori costi per la movimentazione e le attrezzature. • Minor ripetitività. 	<p>CANTIERI</p> <p>INDUSTRIA MANUFATTURIERA</p> <p>(TIPICO PER PRODOTTI DI GRANDI DIMENSIONI E/O BASSI VOLUMI)</p>
<p>TAVOLA ROTANTE</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bassi ingombri • Minore noia e monotonia lavoratori • Maggiore ripetitività. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bassi volumi 	<p>ASSEMBLAGGIO DI PICCOLI COMPONENTI ELETTRICI E MECCANICI (BASSI VOLUMI)</p>

<p>LINEE IN PARALLELO</p>	<ul style="list-style-type: none">• Aumento della flessibilità.• Permettono di reagire meglio ai cambiamenti nella domanda.• Permette di realizzare un migliore bilanciamento della linea.• Assegnazione di compiti differenti ai lavoratori.	<ul style="list-style-type: none">• Maggiori lavoratori richiesti.• Maggiori costi nell'acquisto delle attrezzature.• Per implementare tali linee è necessario avere un determinato livello di input e di output.	<p>AUTOMOTIVE</p>
---------------------------	--	---	-------------------

3. Tempi nelle operazioni di assemblaggio

3.1 Introduzione alla definizione dei tempi

Uno dei primi punti per la soluzione dei problemi relativi all'assemblaggio è la determinazione dei tempi dei singoli tasks. In particolare dal punto di vista pratico questo dato, oltre ad essere l'input per le successive analisi (es. Balancing problem) risulta essere di difficile reperimento, essenzialmente per 2 motivi:

- Il costo di ottenimento del dato è elevato. Le operazioni di rilevazione non creano valore aggiunto nel prodotto e quindi sono viste dalle aziende come un costo. Gli uffici tempi e metodi sono interessati a questo dato più come analisi di costi per la consuntivazione delle operazioni di produzione che per motivi legati alla progettazione e all'ottimizzazione.
- Nel caso in cui siano presenti diversi modelli il numero di dati da ottenere sarebbe troppo elevato. Inoltre per prodotti nuovi non esiste neppure uno storico su cui rifarsi.

Questo va collegato al fatto che molti prodotti per linee di assemblaggio mixate sono simili e le operazioni richieste per il loro assemblaggio lo sono a loro volta. Questo complica il calcolo dei tempi nel senso che occorre trovare per la stessa operazione un tempo medio.

Di seguito esiste il problema della variabilità dei tempi dovuta alla non ripetitività delle operazioni o alla tipologia di assemblaggio (manuale per esempio). Tale variabilità dipende dal tipo di operazione e dagli operatori. Mentre nelle operazioni semplici la variazione che ci si aspetta è piccola, per le operazioni complesse e sensibili al fallimento il tempo di esecuzione può variare anche di molto.

- *Deterministic operation times*: ogni volta che la variazione attesa nei tempi delle operazioni risulti sufficientemente piccola, il tempo delle stesse è considerato deterministico. Allo scopo di consolidare il più possibile i tempi delle operazioni nelle linee di assemblaggio che utilizzano maggiormente la manodopera, i metodi di produzione devono essere sofisticati e robusti, mentre i lavoratori devono essere altamente specializzati e motivati. Aumentando l'automazione dei moderni sistemi manifatturieri, si riesce a ridurre la variabilità nel tempo delle operazioni.
- *Stochastic operation times*: soprattutto quando le operazioni sono svolte da operatori umani, si assiste ad una notevole variazione nel tempo delle attività, che può influenzare le performance dell'intero sistema. Il tempo delle operazioni dipende principalmente dalle capacità e dalla motivazione della forza lavoro.
- *Dynamic operation times*: una riduzione della varietà nel tempo delle attività, è possibile a causa degli effetti dell'apprendimento e dei successivi miglioramenti nei

processi produttivi. Specialmente quando un nuovo sistema di assemblaggio viene installato, gli operatori impiegano più tempo a svolgere le varie attività, mentre mano a mano che sviluppano familiarità con le operazioni, il tempo si accorcia. Il grado e la percentuale di apprendimento collegato alla riduzione nel tempo delle attività, è legato alla natura delle operazioni, alla flessibilità dei sistemi di produzione e al livello di qualifica degli operatori.

Come visto quindi esistono da un lato diverse tipologie di tempi di assemblaggio legate essenzialmente alla variabilità dei tempi, dall'altro l'ottenimento di questi dati risulta un'operazione costosa per le aziende, e questo pone di fatto questo dato poco presente e poco corretto.

Inoltre nelle moderne produzioni dove vengono assemblati diversi prodotti simili nello stesso sistema di assemblaggio si pone il problema della determinazione di un corretto modo di determinazione del tempo riferito al task compatibilmente con le metodologie e gli obiettivi di bilanciamento voluti.

Nel corso di questo capitolo verranno sviluppate queste tematiche.

3.2 Metodologie di determinazione dei task time

3.2.1 Metodo di Bedaux e time study con cronometraggio

Questa tecnica prende nome dall'ingegnere Charles Bedaux nato a Parigi nel 1886 e che diventò uno dei pionieri dell'organizzazione del lavoro. Egli introdusse concetto di valutazione dell'efficienza a correzione dei tempi di esecuzione del lavoro. Diede il suo contributo come consulente alla riorganizzazione di numerosi ed importanti società, anche italiane come Fiat e Pirelli. Il principio era quella di aumentare la produttività dell'operaio attraverso un'analisi accurata dei tempi sufficienti a svolgere un lavoro. Il sistema misurava la produttività in unità Bedaux. Una unità indicava il lavoro che poteva essere fatto da un uomo in un minuto.

Tale quantità di lavoro contenuta in una unità era il risultato di una serie di rilevazioni cronometriche svolte da tecnici addestrati. Questo permetteva tra l'altro di creare un sistema di incentivazione. Nel momento in cui tanti operatori superavano le 60 unità Bedaux l'azienda aumentava la quantità di lavoro per unità Bedaux ed il ciclo ricominciava.

La tecnica del cronometraggio si basa su 4 operazioni fondamentali:

1. Scomposizione dell'operazione in elementi d'analisi
2. Valutazione del rendimento
3. Assegnazione fattore di riposo

4. Assegnazione fattore fisiologico

Scomposizione dell'operazione in elementi di analisi:

Un ciclo di lavorazione, per essere cronometrato o rilevato, deve essere scomposto in elementi definiti e misurabili, al fine di:

- Evitare errori grossolani in cui si può incorrere cronometrando interamente un ciclo dato, la scomposizione aiuta una lettura più attenta
- In alcuni casi la scomposizione consente anche di suggerire correzioni
- Utilizzare su alti cicli i tempi medi scomposti di operazioni base
- Assegnare con maggior precisione i giudizi di efficienza e i fattori di riposo
- Formalizzare sulla carta un preciso ciclo dove poter sempre pretendere il rispetto sia degli aspetti antinfortunistici che per altri motivi

Valutazione del rendimento

La valutazione del rendimento di un operatore è un aspetto critico e lo stesso studio dei tempi non può sempre dare la risposta esatta, dato il carattere anche soggettivo dello strumento. I modelli cronotecnici prevedono l'utilizzo del giudizio di efficienza e di rendimento rispetto a modelli medi (velocità, ecc) non del tutto obiettivi.

La valutazione del rendimento consiste quindi nel raffronto fatto da un analista tra la prestazione dell'operatore e l'idea di standard relativa ad un determinato metodo.

Maggiorazioni

I motivi per le maggiorazioni dei tempi sono diversi, in funzione dei fattori che li causano. 2 su tutti sono dovuti ai tempi di riposo e ai bisogni fisiologici.

Queste vengono espresse in percentuale rispetto al tempo di presenza nel luogo di lavoro al fine di recuperare parte della fatica del turno di lavoro. Esistono tuttavia altri fattori di maggiorazione, quali quelle di processo, dovute all'inattività dell'operatore a causa del processo stesso, oppure quelle dovute ai tempi morti di lavorazione o alle attività periodiche come la pulizia.

Quindi tale tecnica si può riassumere come:

- 1) Suddivisione del processo in fasi, con precisi momenti di inizio e fine
- 2) Definizione del tempo di riferimento per l'operazione t
- 3) Determinazione del numero n di campioni di cronometraggio necessari per l'operazione

$$n = ((z/h) \cdot (\sigma/t))^2$$

Dove:

z è il livello di confidenza

Livello di Confidenza	Z
90%	1,65
95%	1,96
99%	2,58

σ è la deviazione standard

h è il massimo errore ammissibile deciso

- 4) Cronometraggio e registrazione misure
- 5) Calcolo dei tempi standard

$$t_m = \sum_i t_i / n \text{ tempo medio di ciclo, con le notazioni classiche}$$

$$NT = t_m \cdot F \cdot RF \text{ tempo normale, dove}$$

RF descrive quanto sopra o sotto la media sia la prestazione dell'operatore

F è la frequenza dell'operazione

$$NTC = \sum_j NT_j \text{ con } j \text{ attività da monitorare}$$

$$t_{standard} = NTC \cdot (1 + A)$$

Dove A è la percentuale delle maggiorazioni dovute ai vari fattori.

3.2.2 MTM- Tempi standard predeterminati

Verso il 1950 è stato messo appunto un sistema basato su movimenti elementari denominato MTM (Methods Time Measurement). Gli autori (Maynard Stegemerten, Schwab) hanno analizzato e suddiviso ogni possibile azione in una serie di movimenti elementari (afferrare, rilasciare, ecc.) e ne hanno determinato il tempo medio nelle diverse situazioni. Ogni movimento è stato successivamente tabellato in funzione di una o più variabili quali la distanza, il peso, il posizionamento degli utensili da raccogliere, ecc.

Il tempo non viene più determinato contestualmente all'operazione ma determinato fuori dal contesto produttivo. Questo significa che:

- 1) L'intero ciclo di lavoro è composto da una successione di movimenti elementari
- 2) Il tempo standard è dato dalla somma dei tempi relativi ai micromovimenti
- 3) A seguito di una variazione dei metodi di lavoro il nuovo metodo può essere determinato rivedendo i movimenti elementari

Grazie alla predeterminazione dei tempi è possibile poi costruire i tempi dei cicli produttivi verificandone l'attinenza rispetto a quanto previsto. E' possibile scegliere tra le varie metodiche

proposte senza metterle in pratica. La caratteristica più forte del MTM è l'oggettività elevata della misura. Infatti il metodo è privo di soggettività. I limiti di tale metodo sono costituiti dalla richiesta di una valutazione molto più attenta del ciclo produttivo. Per questo analisi di questo tipo vengono effettuate filmando le operazioni. Con l'utilizzo di questi strumenti assieme alla presenza del metodo su PC dovrebbero portare l'MTM ad essere il metodo più diffuso e rigoroso per la stima dei tempi. Raffrontando il metodo con i sistemi cronometrici possiamo rilevare che i secondi sono incentrati sul binomio tempo-movimento, mentre l'MTM su tempo-metodo, dato che la determinazione del tempo standard di ogni micro movimento è molto ricca di casi.

L'MTM base è suddiviso in diversi movimenti base detti micro-movimenti, misurati in TMU (time measurement unit). Il valore medio di 1 MTU vale 1 centomillesimo di ora, 0,036 sec. Si sono sviluppati in seguito altre versioni dell'MT come l'MTM il quale è composto anche di una serie di movimenti combinati derivanti dall'MT base. Per esempio raggiungere, afferrare e rilasciare no elementi base spesse volte associati tra loro, per questo può essere utile avere un elemento unico combinato. Questo per vari motivi. Infatti l'MTM 2 consente di:

- Fornire risultati indipendenti dall'analisi e dal campo di utilizzazione
- Essere di rapida utilizzazione
- Servirsi di simboli che possono essere compresi da tutti
- Essere di facile comprensione
- Essere adatto per la descrizione dei metodi
- Essere combinato con altri dati MTM
- Conciliare la rapidità dell'utilizzatore con la precisione

I passaggi del metodo sono:

- 1) Scomposizione del lavoro in micromovimenti di base
- 2) Trovare il valore appropriato relativo ai micromovimenti dalle tabelle relative
- 3) Eseguire la somma dei valori per ciascuno dei movimenti riscontrati
- 4) Aggiustamento di valori attraverso fattori correttivi
- 5) Determinazione dei tempi standard

I principali vantaggi del metodo MTM sono quindi

- Gli standard possono essere predisposti prima dell'avvio della produzione
- Nuovi metodi di lavoro possono essere comparati senza che siano implementati
- Sono ridotte le possibilità di errore nella registrazione dei tempi e delle prestazioni
- Facile applicabilità

Gli svantaggi sono invece

- Il lavoro deve essere frazionato in micro operazioni e diventa inaccettabile se l'operazione non è ripetitiva
- I parametri scelti per la determinazione dei tempi potrebbero non adattarsi a qualsiasi situazione lavorativa
-

3.2.3 Campionatura (Work Sampling)

Il work sampling valuta le percentuali di tempo che un lavoratore spende svolgendo differenti compiti: le proporzioni temporali osservate durante lo svolgimento del lavoro preso a campione sono le medesime proporzioni di tempo spese nell'attività in generale. Tipicamente impiegato nelle seguenti circostanze:

- Studio dei ritardi, serve a stimare la percentuale di tempo che i lavoratori perdono in ritardi inevitabili; i risultati sono utilizzati nello studio dei metodi di lavoro e nella valutazione degli activity cost.
- Impostazione degli standard lavorativi: per impostare adeguatamente gli standard l'osservatore deve possedere un'esperienza sufficiente a classificare le performance dei lavoratori
- Misurazione delle performance: il campionamento può sviluppare un indice delle prestazioni per la valutazione periodica

Passaggi del metodo

- 1) Definire le attività
- 2) Definire come compiere le osservazioni
- 3) Definire la lunghezza dello studio
- 4) Prendere un campione preliminare per ottenere le stime dei valori dei parametri
- 5) Calcolare la dimensione richiesta del campione
- 6) Predisporre una tabella per le osservazioni del lavoratore in momenti scelti casualmente
- 7) Osservazione delle attività e registrazione dei dati
- 8) Decidere se continuare nelle osservazioni
- 9) Calcolo del tempo normale per unità o per parte
- 10) Calcolo del tempo standard per unità o per parte

Calcolare la dimensione richiesta dal campione

$$n = (z^2 \cdot p \cdot (1 - p)) / h^2$$

Dove

n: dimensione richiesta del campione

z: coefficiente della deviazione standard per un desiderato livello di confidenza

p: stima del valore della grandezza osservata

h: livello di accuratezza desiderato

3.2.4 MOST

Il MOST è un potente strumento di analisi che consente l'incremento della produttività, il miglioramento dei metodi, la semplificazione della progettazione, la definizione dei carichi di lavoro, il miglioramento della sicurezza e di massimizzazione delle risorse. MOST può essere applicato a qualsiasi attività per la quale si possa definire e descrivere un metodo. Veloce economico ed accurato, elimina la necessità di studi statici. Per contro realizza questi standard come risultato della definizione della postazione di lavoro e della descrizione del metodo. Attraverso il SW la descrizione dell'area di lavoro e dei metodi vengono generati automaticamente degli standard senza ulteriori immissioni di simboli o tempi. A loro volta questi standard costituiscono database accurato e coerente per la definizione dei costi, per la progettazione, l'elaborazione, la pianificazione, ed il bilanciamento delle linee.

Il principio base è la movimentazione di oggetti. Si è notato che la movimentazione degli oggetti segue modelli ripetitivi. Tali modelli sono stati identificati e catalogati come sub-attività che seguono la movimentazione di un oggetto, le quali variano indipendentemente l'una dall'altra.

Il lavoro viene definito come il prodotto di una forza per uno spostamento, ossia lo spostamento di oggetti. Qui però non ci sono micromovimenti di base, ma attività fondamentali all'interno di un evento spostare oggetti da una posizione ad un'altra. Esse sono fondamentalmente 4 attività, le quali vengono poi sub-attività che realizzano sequenze di attività. Per descrivere il lavoro manuale occorrono solo 3 sequenze più una quarta di movimentazione:

- 1) General move sequence
- 2) Controlled Move Sequence
- 3) Tool use sequence
- 4) Manual crane

L'unità di misura è la stessa del MTM quindi 1 TMU= 0,00001 ore=0,036 sec

Quindi

$$TMU_{sequenza} = \sum_i TMU_{subattività} \cdot 10$$

Nella progettazione del MOST è stato riconosciuto che gli scostamenti sui tempi rispetto alla realtà, dovuti all'aleatorietà delle operazioni manuali, possono essere superati utilizzando delle principi statistici. Allo

Stesso modo il lavoro di misurazione utilizzando tali regole viene semplificato, questo per l'effetto di bilanciamento che si crea tra le varie operazioni. Il tempo di bilanciamento è quando

L'accuratezza del sistema è ottenuta, l'effetto di bilanciamento invece è come essa si è ottenuta. L'effetto di bilanciamento risulta dalla combinazione delle singole deviazioni fra loro, ce danno una deviazione totale inferiore.

Vantaggi del MOST

- E' più veloce di altre tecniche di misurazione grazie alla sua semplicità
- Non richiede che le operazioni siano scomposte in moltissimi movimenti, infatti raggruppa movimenti base frequenti
- Migliora la produttività delle lavorazioni
- Identifica rapidamente i metodi inefficaci
- Fornisce una precisione entro il 5%, con un grado di affidabilità del 95%
- Può essere applicato a ciascuna attività manuale descritta con un metodo
- E' semplice e facile da imparare
- Riduce il tempo necessario all'implementazione

Con questi metodi si possono quindi determinare i tempi dei vari task delle operazioni di assemblaggio. Tuttavia rimangono ancora dei problemi del caso in cui ad un task non si possa associare univocamente un singolo tempo, ma in realtà siano più d'uno, magari perché la stessa operazione viene fatta su modelli diversi ed ha quindi tempi diversi. Di seguito vengono riportate le metodologie per affrontare questo problema.

3.3 Passaggio da mixed a single model

Nel momento in cui ci si trova davanti ad un sistema di assemblaggio multi-model occorre rifarsi ad un modello che sia invece single model. Infatti il problema del bilanciamento di linee mixate (MALBP) viene normalmente risolto trasformando il problema in un problema monoprodotta (SALBP) (J. De Fokkert , T. De Kok, 1996) semplificandolo e creando un prodotto medio virtuale. Questo influisce nell'assegnazione dei task alle stazioni, ma è più complessa poiché vi sono anche tutte le interazioni tra i diversi modelli (Y. Bukchin, I. Rabinowitch, 2005). Una di queste per esempio è la variabilità dei task time tra i diversi modelli dovuta ad esempio per l'assemblaggio di moduli con stesse funzionalità ma diversi. In particolare da questo punto di vista trattare un sistema multi prodotto come mono prodotto può essere una restrizione fin troppo forte. D'altra parte però la variazione dei prodotti con dei tempi magari variabili produce un problema di bilanciamento di difficilissima soluzione (classe NP-hard) (J. Driscoll, D. Thilakawardana, 2

Da questo punto le semplificazioni introdotte sono necessarie per applicare i modelli nei contesti reali. I problemi da risolvere saranno come ottenere questi modelli medi virtuali e come valutare la loro bontà rispetto all'obiettivo perseguito.

Notazioni

PT Tempo totale disponibile per la produzione lungo il periodo di pianificazione

M Numero di modelli, $m=1, \dots, M$

D Totale domanda richiesta nel periodo

d_m Domanda prevista per il modello m

J Numero di tasks, $j=1, \dots, J$

c Tempo ciclo

t_{jm} Tempo per il task J del modello m

σ_{jm} Deviazione standard per il task j del modello m

τ_{mk} Tempo di lavoro del modello m nella stazione k , $\tau_{mk} = \sum_{j \in \text{Station } k} t_{jm}$

τ'_k Tempo totale nella stazione k , $\tau'_k = \sum_m \tau_{mk}$

\bar{t}_m Tempo medio per stazione del modello m $\bar{t}_m = \sum_k \tau_{mk} / k$

t'_j Tempo del task j cumulato per il modello medio virtuale

t_j Tempo del task j per il modello medio virtuale

σ_j Deviazione standard per il task j per il modello medio virtuale

3.2 Costruzione del diagramma combinato delle precedenze tecnologiche:

Per ideare un prodotto medio rappresentativo del mix dei prodotti reali occorre innanzi tutto riuscire a descrivere i vincoli di tutte le precedenze dei singoli prodotti in un unico diagramma delle precedenze tecnologiche.

Tale diagramma diventa particolarmente interessante per prodotti aventi caratteristiche simili o eventualmente parti uguali. Prodotti di questo tipo si basano sul concetto di fungo "mushroom concept" (Mather, 1988) che è l' analogo in termini produttivi della modularizzazione del prodotto (struttura a clessidra). Secondo il concetto di fungo le operazioni di personalizzazione

del prodotto vanno collocate nelle fasi finali del ciclo di produzione, al fine di poter eseguire il più tardi possibile la differenziazione del prodotto, rispondendo così più efficacemente alla variazione della domanda. Collocando nelle fasi finali gli elementi di differenziazione, si ottengono prodotti caratterizzati dalla comunanza della maggior parte degli elementi costitutivi, quindi delle operazioni necessarie ad ottenere i componenti e/ semilavorati, pertanto i diagrammi delle precedenze dei singoli prodotti presenteranno delle elevate affinità, facilitando in tal modo la creazione del diagramma combinato.

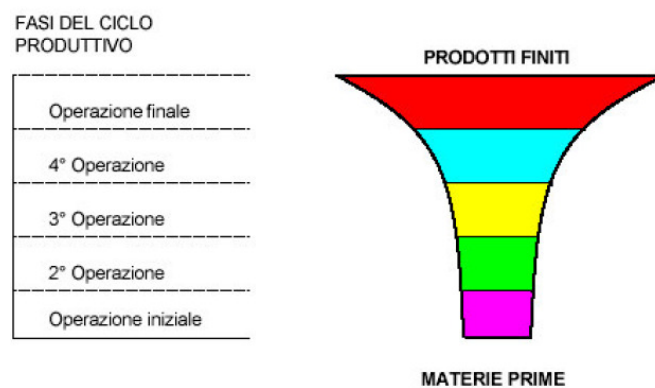


Fig. 3.1 Struttura a fungo per un generico prodotto

Come si può osservare il fungo si sviluppa dalle materie prime fino ai prodotti finiti. Ad ogni singola operazione il fungo diverge un po' determinando un incremento della variabilità dei sotto assemblati. Si osserva inoltre che tale incremento non è uniforme in tutto il fungo: esso è presente anche se in maniera contenuta fin dalle prime operazioni e subisce un rapido incremento nelle fasi finali dell'assemblaggio. Ciò rappresenta graficamente la realizzazione pratica del concetto del fungo, in cui le attività che differenziano il prodotto vengono collocate nelle fasi finali dell'assemblaggio. Dopo aver costruito il diagramma delle precedenze tecnologiche, bisognerà assegnare ad ogni attività un tempo di esecuzione, ma di questo si parlerà meglio nei successivi paragrafi. Concentriamoci ora sulla costruzione del diagramma combinato.

Sono state trovate una base teorica per la realizzazione del diagramma combinato e due metodologie per l'effettiva realizzazione

Ad ogni modello m è associato un diagramma di precedenza G .

Il diagramma combinato delle precedenze tecnologiche Gm è caratterizzato da una

serie di nodi $N(m)$ e di archi $A(m)$ dove:

$$N(m) = \{ n(m1), n(m2), n(m3), \dots, n(mi) \}$$

$$A(m) = \{ a(m1), a(m2), a(m3), \dots, a(mi) \}$$

$N(m)$ ed $A(m)$ indicano rispettivamente i generici nodi ed archi del diagramma combinato, mentre $n(m_i)$ e $a(m_i)$ i nodi e gli archi dell' i -esimo prodotto assemblato nella line mixed-model (figura 3.2).

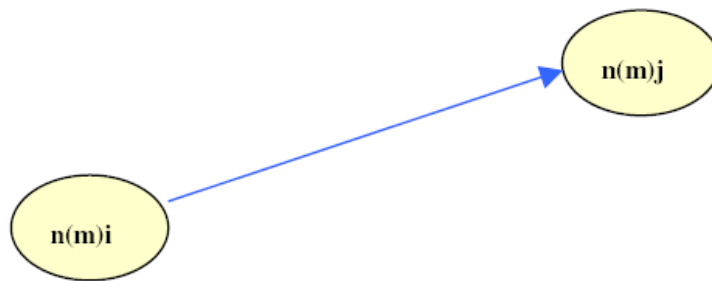


Fig. 3.2 Arco generico

Se un arco generico $l(m)$ ha un nodo iniziale $n(m_i)$ ed un nodo finale $n(m_j)$ allora l'attività rappresentata dal nodo iniziale dovrà concludere prima di quella rappresentata dal nodo finale. $t(m_i)$ e $t(m_j)$ indicano inoltre la durata delle attività dei nodi relativi. Se si prende un insieme composto da tre prodotti $M = \{1,2,3\}$ caratterizzati dai grafici diretti $G1$, $G2$ e $G3$, si ha che il grafico combinato $GM = G1+G2 +G3$ è caratterizzato dai nodi $N(M)$ e dagli archi $A(M)$ dove:

$$N(M) = N(1)+N(2)+N(3)$$

$$A(M) = L(1)+L(2)+L(3)$$

E' utile poi considerare la presenza di archi ridondanti (figura 3.2.4). Un arco $(N(M)i, A(M)i)$ è tale se esiste una catena di archi che collega il nodo iniziale al nodo finale.

Gli archi ridondanti possono essere omessi dato che l'informazione che forniscono alla costruzione del diagramma combinato è superflua. Un altro modo di trattare tali archi è quello di segnarli con una linea tratteggiata.

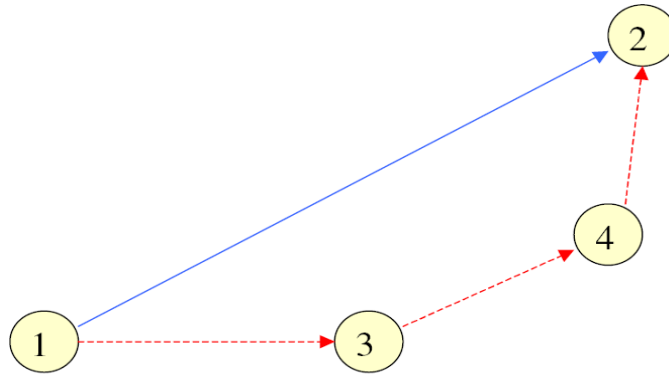


Fig. 3.3 Archi ridondanti

Gli archi ridondanti sono quelli connessi dalle frecce rosse tratteggiate; essi possono essere sostituiti dall' unico arco che collega gli nodi 1 e 2.

Per la realizzazione pratica del diagramma si possono utilizzare il metodo dei diagrammi di precedenza oppure il metodo binario.

Il metodo dei diagrammi di precedenza combinati (Thomopolous, 1970; Macaskill, 1972, Helgeson e Birnie 1961, Berger et al. 1992) utilizza inizialmente il sistema di di Kilbridge e Wester per ottenere un diagramma delle precedenze combinato che tenga conto sia di tutti i task presenti, sia delle relazioni di precedenza tra i vari task nei vari prodotti. Questo è un metodo euristico basato su una procedura dinamica. Si suddividono le attività in colonne (figura 3.4) ed un determinato compito è assegnato ad una colonna i se il massimo numero della colonna dei suoi predecessori è pari a $i-1$ (ad esempio se il compito 8 è assegnato alla colonna 6 allora il compito 7 può essere assegnato al massimo alla colonna 5). Se il carico di lavoro raggiunto in ogni colonna supera il valore massimo, si attua una procedura che consiste nel considerare tutte le possibili combinazioni di compiti al fine di ottenere una configurazione fattibile. Se ciò non è possibile si attua una procedura dinamica: tutti i compiti a partire dalla colonna 1 fino alla colonna i vengono analizzati per valutare l' opportunità di muoverli in una colonna $\geq i$ senza violare nessuna relazione di precedenza. I movimenti vengono ripetuti fino a quando non si ottiene un perfetto assegnamento oppure non sono possibili ulteriori movimenti.

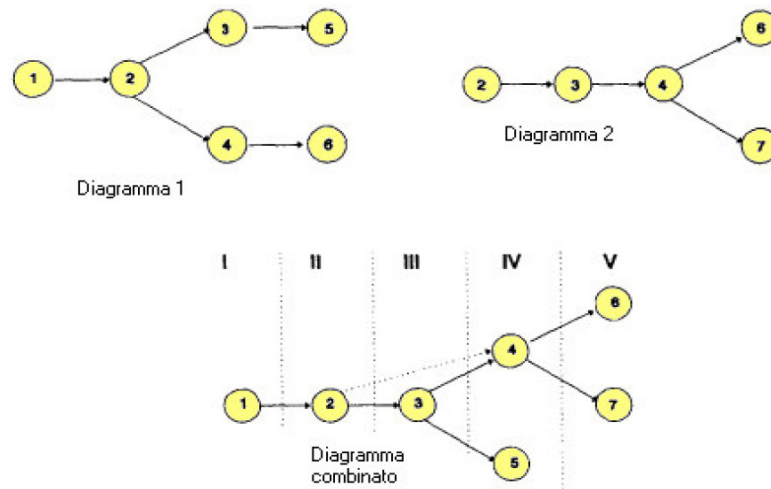


Fig. 3.4 Diagrammi singoli e combinato ottenuti applicando Kilbridge e Wester

Il metodo Binario (Roberts and Villa 1970) è una metodologia che permette di risolvere il problema è il metodo binario. Essa consiste nell' ideazione di un vettore identificativo del modello. Ad ogni coppia compito-modello si associa un vettore binario con le seguenti caratteristiche :

$V_{jk} = 1$ se il compito i è necessario per il modello m

$V_{jk} = 0$ altrimenti

Una volta individuate le attività necessarie si costruisce una matrice con i lati che rappresentano i compiti dei singoli modelli. In tale matrice, che è di tipo triangolare, l' ab -esima entrata è unitaria se è necessario completare l' attività b prima dell'esecuzione dell' attività a , altrimenti l'entrata è nulla. Per costruire il diagramma combinato delle precedenze a partire dalle matrici dei singoli prodotti, si procede nel seguente modo: l' ab -esima entrata della matrice combinata è 1 se l' ab -esima entrata di una qualsiasi matrice di precedenza dei modelli è 1. Tra i differenti prodotti non vi dovrebbero essere delle incongruenze: se un modello richiede il completamento del compito b prima del compito a , nessun altro modello dovrebbe richiedere il completamento del compito a prima del b . Alcune celle della matrice combinata, inizializzate a zero, potrebbero dover essere poste pari all' unità a causa della presenza di archi ridondanti: se l' ab -esima entrata della matrice è 0, ma la ac -esima e la cb -esima sono 1, allora anche l' ab -esima deve essere posta unitaria. Le regole generiche, nel caso di due modelli, che permettono di passare dalle matrici dei prodotti a quella combinata sono:

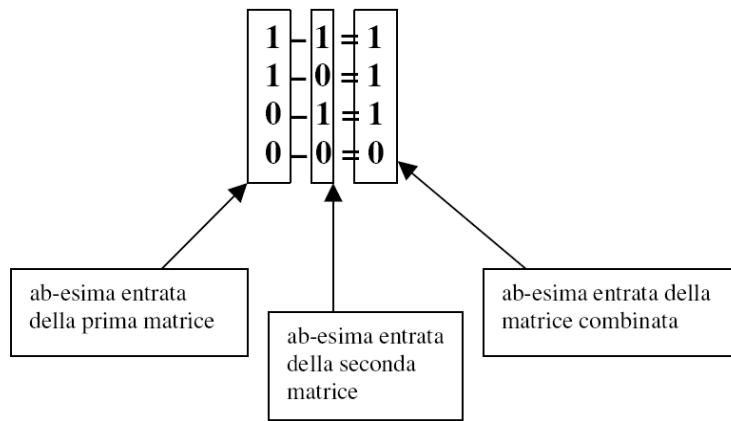


Fig. 3.5 Regole che permettono il passaggio dal diagramma dei singoli prodotti al diagramma combinato

Di seguito in Fig. 3.6 un piccolo esempio:

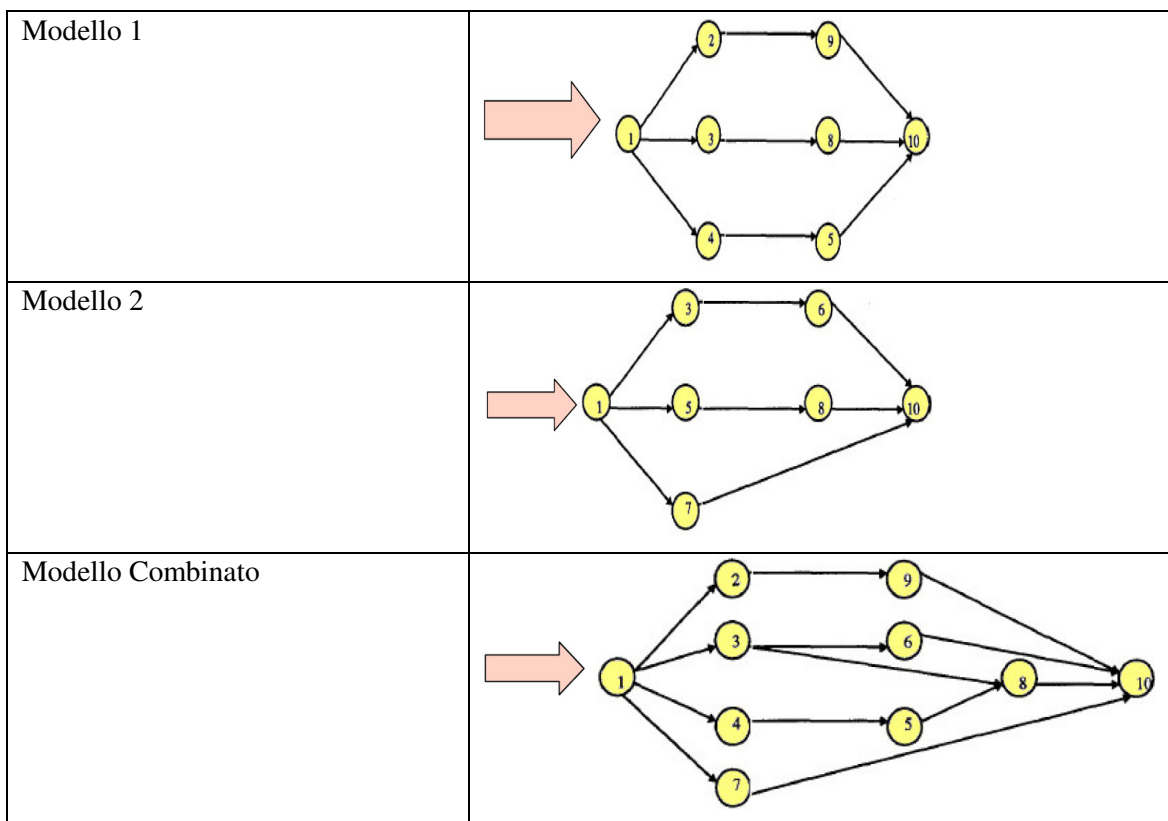


Fig. 3.6a Grafici delle precedenze tecnologiche dei prodotti

Per quanto riguarda le matrici avremo:

essere efficacemente implementato al calcolatore. Le metodologie che permettono la costruzione del diagramma combinato presentano dei vantaggi e degli svantaggi comuni: un vantaggio è l'attribuzione di attività comuni ad un'unica stazione che realizza la minimizzazione dei costi di apprendimento anche se, come vedremo, crea dei problemi di bilanciamento. Uno svantaggio è che il diagramma combinato non è più corretto se cambia il mix produttivo della linea: ciò determina elevati idle-time e performance non adeguate. Uno svantaggio che affligge specificatamente il metodo di Kilbridge e Wester è che questo può essere utilizzato solamente in presenza di diagrammi combinati aciclici. Ciò determina una forte limitazione nella tipologia dei prodotti assemblati, che può essere parzialmente risolta dividendo il diagramma ciclico in un sottoinsieme di diagrammi aciclici bilanciati separatamente.

Altri metodi si basano poi sull'aggiustamento dei tempi di lavorazione determinando un tempo medio

determinando un tempo per i modelli che richiedono la stessa operazione (Arcus, 1966, Milas, 1990).

3.3 Metodologie per calcolare i tempi e le quantità del prodotto fittizio

Dopo aver costruito il diagramma delle precedenze tecnologiche, bisognerà assegnare ad ogni attività un tempo di esecuzione. Occorre però considerare che, se un algoritmo giunge ad una soluzione ottimale per un problema di tipo single model, lo stesso algoritmo applicato alla linea mixed-model determinerà una soluzione approssimata, dato che tali metodi decompongono il problema mixed-model in M problemi indipendenti di tipo single-model (M è il numero dei prodotti), non tenendo in considerazione, in tal modo, le peculiarità tipiche dei problemi con modelli misti, in particolare la necessità di assicurare un carico di lavoro il più uniforme possibile tra le stazioni ed il fatto che nelle linee mixed-model il bilanciamento è strettamente legato all'attività di sequenziazione (sequencing). Il passaggio tra le due linee avviene considerando il prodotto medio: ovvero, per ogni attività, si calcola il tempo di esecuzione dell'attività stessa per tutti i prodotti, calcolato in maniera tale da far sì che l'approssimazione del caso mixed-model a un single model sia il più possibile aderente alla realtà, o in alternativa ricorrere a qualche artificio che favorisca già da questa prima fase il raggiungimento di determinati obiettivi.

Le metodologie esistenti sono quelle descritte precedentemente.

Per quanto riguarda i metodi basati sui diagrammi di precedenza combinati, viene creato un diagramma delle precedenze con i metodi visti e assegnato un tempo cumulato time (Thomopolous, 1970; Macaskill, 1972). Altri autori usano questo metodo introducendo

procedure euristiche o con metodi and bound (Helgeson and Birnie 1961, Berger et al. 1992). Il vantaggio è che tutte le tutte ripetizioni sono ricondotte alla stessa stazione. Questo vincolo può essere rilassato creando diverse iterazioni del problema. Un altro vantaggio è che il problema viene enormemente semplificato. Tuttavia questo dipenderà dal mix utilizzato e questo introduce una forte limitazione. Un esempio viene di seguito riportato. La metodologia si basa sul calcolo dei tempi medi, pesati rispetto alla quantità, di realizzazione dell' attività j per tutti i modelli considerati. Il tempo medio pesato è definito in tal modo:

$$t_j' = \sum_m d_m \cdot t_{jm}$$

$$t_j = \frac{\sum_m d_m \cdot t_{jm}}{\sum_m d_m}$$

Questo rispetto alle notazioni utilizzate in precedenza.. La sommatoria è effettuata sui modelli da produrre. Il calcolo di tali tempi è semplice da effettuare considerando una tabella che riporta per ogni j -esimo prodotto il tempo di esecuzione dell' j -esima attività. Se si considerano due prodotti $m1$ ed $m2$ (figura 3.7) con una domanda per periodo data da $D1=4$ e $D2=3$ si ha che:

j	1	2	3	4	5
t_{1j}	3	5	4	8	2
t_{2j}	7	6	9	2	3
$\sum_j D_j t_{jm}$	33	38	43	38	17

D_j
$d_1=4$
$d_2=3$

Fig. 3.7 Calcolo tempi modello medio virtuale

Le sommatorie nelle colonne, date dal prodotto tra i tempi di esecuzione delle attività e la domanda dei singoli prodotti, tengono in considerazione il mix produttivo.

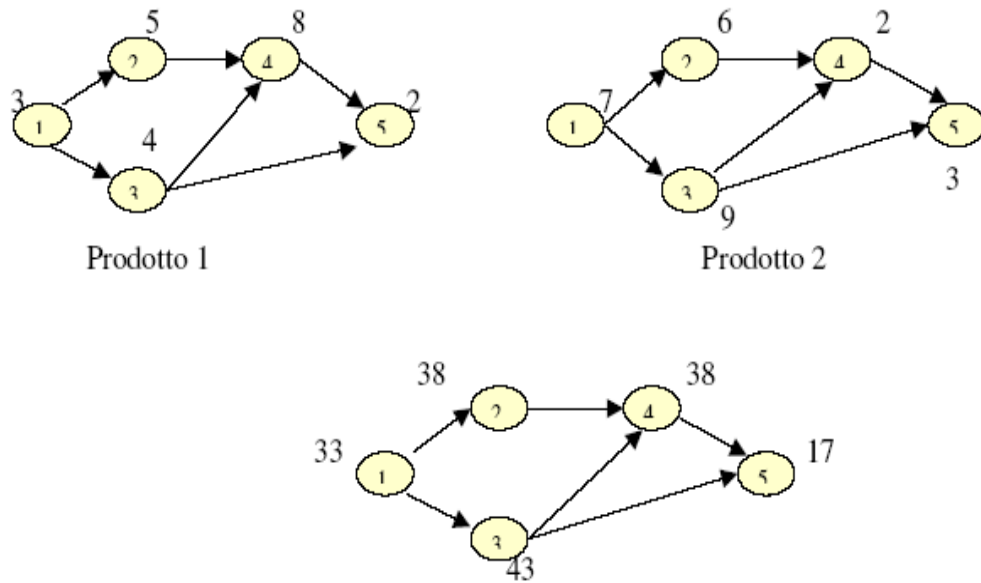


Fig. 3.10 Diagrammi delle precedenze singoli e combinato

Questo metodo di calcolo dei tempi per il diagramma combinato delle precedenze viene usato da Thomopoulos e da Makaskill, per applicare una metodologia di risoluzione di un caso single model a un caso mixed-model passando appunto attraverso un diagramma combinato delle precedenze.

3.3.2 Metodologie proposte

Vengono di seguito elencate le varie metodologie proposte per calcolare i tempi delle attività da assegnare al prodotto rappresentativo del mix. L'obiettivo di questa esposizione è capire che in funzione di contesti industriali diversi e in funzione di obiettivi di bilanciamento diversi il modo per ottenere il modello rappresentativo del mix, ed in particolare il modo per ottenere i task time deve essere diverso e tarato rispetto all'obiettivo.

Per ogni metodo proposto viene riportato un grafico che possa chiarirlo meglio, i grafici riportati sono stati tracciati usando i dati relativi ai tempi dell'attività numero uno del modello proposto nel capitolo 5.

A) Metodologia già proposta da Thomopoulos modificata per ottenere non una somma di tempi, ma una media pesata (si è diviso per $\sum_j D_j$)

$$t_j = \frac{\sum_m d_m \cdot t_{jm}}{\sum_m d_m}$$

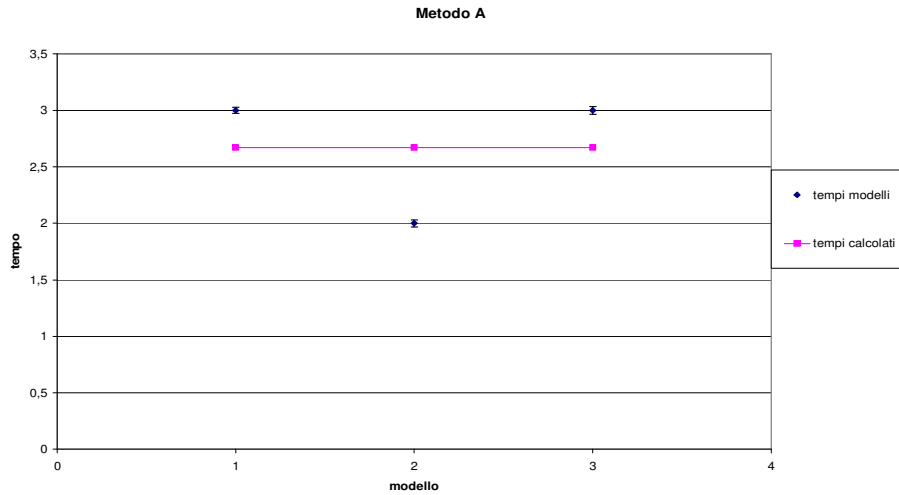


Fig. 3.11 Tempi per primo task virtual average model con metodo A

B) Dati una serie di tempi t_{jm} per eseguire l'attività j nei vari modelli m si prende come tempo di esecuzione dell'attività j per il prodotto rappresentativo il tempo t_j pari al massimo tra i

$$t_j = \max \{ t_{jm} \} \quad \text{for } m=1, \dots, M \quad (8)$$

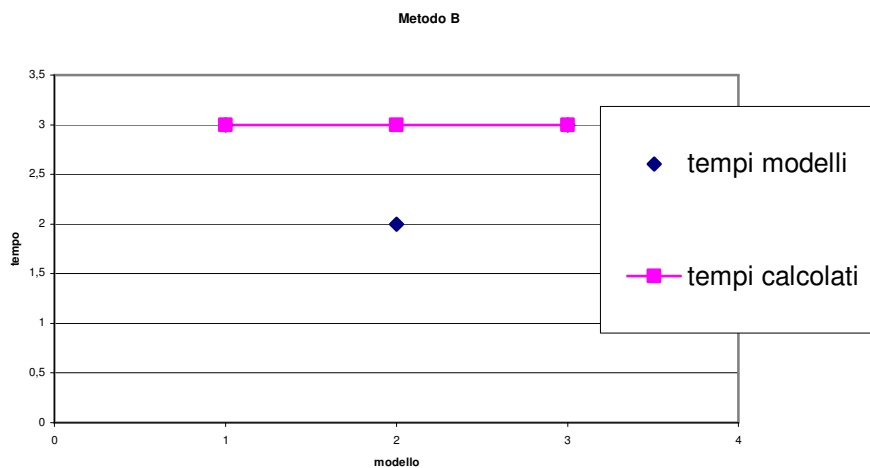


Fig. 3.12 Tempi per primo task virtual average model con metodo B

C) Viene calcolato t_j come media pesata rispetto alla domanda dei prodotti m e al tempo totale di esecuzione di tutte le attività di ogni prodotto m

$$t_j = \frac{\sum_m t_{jm} \cdot d_m \cdot \sum_j t_{jm}}{\sum_m d_m \cdot \sum_j t_{jm}}$$

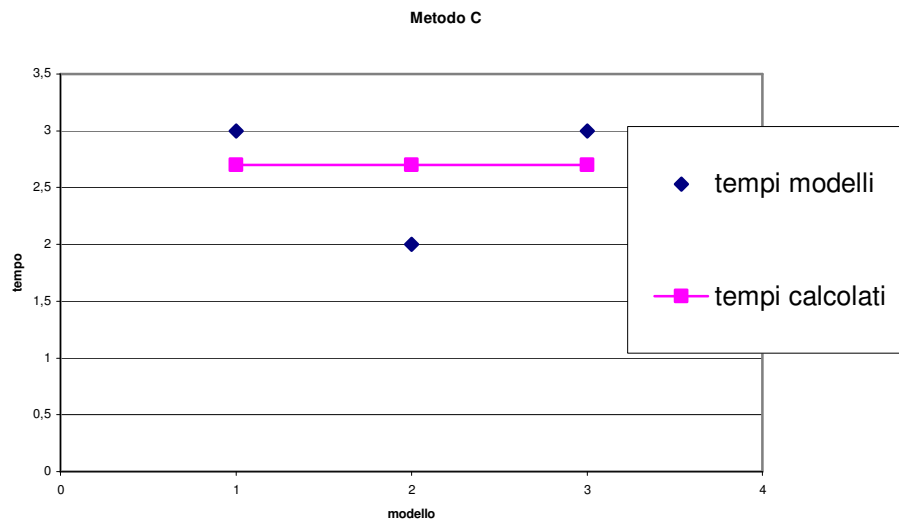


Fig. 3.13 Tempi per primo task virtual average model con metodo C

D) Si prende come valore di t_j il massimo tra il minimo dei tempi di esecuzione dell'attività j nei vari modelli e la differenza dei tempi per eseguire l'attività nei vari modelli e il loro scarto quadratico medio

$$t_j = \max\{\min(t_{jm}), \max(t_{jm} - \sigma_{j,m})\} \text{ for } m=1, \dots, M$$

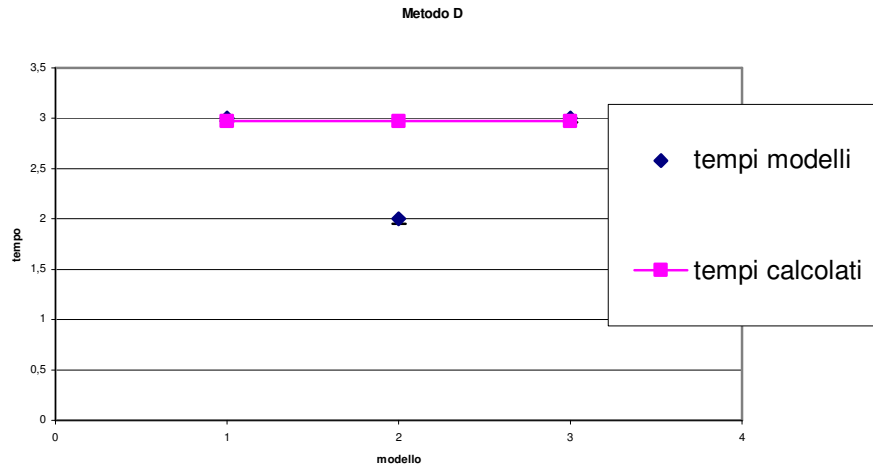


Fig. 3.14 Tempi per primo task virtual average model con metodo D

La dispersione dei dati può essere calcolata come se il task fosse sempre lo stesso con tempi diversi che sono poi funzione del modello che viene assemblato in quel momento nella stazione.

$$\sigma_j = \sqrt{\left(\sum_m (t_{jm} - \frac{\sum_m d_m \cdot t_{jm}}{\sum_m d_m})^2 \right)}$$

Queste metodologie introdotte in questo capitolo perché facenti riferimento al calcolo dei tempi, in particolare per il modello medio in una linea mixed model, verranno trattate spiegate ed utilizzate nel capitolo 5 relativo al bilanciamento delle linee di assemblaggio.

4. Ergonomia dei sistemi di assemblaggio

4.1 Generalità

L'ergonomia è definita come la scienza applicata della progettazione delle attrezzature, usate per la postazione di lavoro, al fine di ottimizzare la produttività e al contempo minimizzare i rischi di infortuni e difficoltà e fatica nelle operazioni richieste. Rispetto ai sistemi di assemblaggio possiamo riferire l'ergonomia sia al miglioramento della sicurezza, della motivazione e delle risorse umane impiegate, e in secondo luogo al miglioramento della qualità del processo produttivo. Infatti il link tra ergonomia e qualità di processo è noto già da tempo. Drury (1990) analizzò il rapporto tra ergonomia e qualità di processo fornendo delle linee guida. Gonzales et al (1990) e Eklund (1990) studiarono questi aspetti analizzandoli in contesti industriali. Carey et al. (1990) studiarono le relazioni tra le posizioni degli operatori e gli sforzi muscolari, ed è quindi importante l'attenzione per l'ergonomia della postazione di lavoro, che assume importanza strategica nel momento in cui la si contestualizza nel processo di bilanciamento di un sistema di assemblaggio. Inoltre uno degli obiettivi in una linea di assemblaggio è razionalizzare il lavoro migliorando il flusso ed eliminare i tempi di ozio durante le operazioni di assemblaggio (Nibel, 1988). Migliorare il carico delle stazioni rispetto ai principi dell'ergonomia, implica una modifica dei tempi di produzione e uno studio di questi è necessario, e la progettazione dei sistemi di produzione deve avvenire tenendo conto di questi effetti (Shihan, 1997). In un recente studio alla Volvo car Company di Gotheborg, in seguito all'implementazione di un programma di re-design dei sistemi di produzione (presse, telai, verniciatura e linee di assemblaggio) volto a ridurre l'assenteismo dovuto a problemi muscolo-scheletrici degli operatori si dimostrò la stretta relazione tra design del processo produttivo ed ergonomia. In questo studio toccarono diversi temi legati all'ergonomia, non solo il design delle singole stazioni di lavoro, ma altri elementi strettamente correlati come il design di prodotto, il design di processo, la pianificazione del lavoro, in relazione alle cadenze e al tipo quindi di lavoro sulle linee e all'organizzazione in generale rispetto la varietà del lavoro, le durate dei task, ecc. Al fine di ottenere un risultato apprezzabile tutti questi elementi dovevano essere considerati e gestiti in maniera integrata, coinvolgendo tutti i soggetti. Andando nello specifico, da studi medici risulta che diverse attività di lavoro, in particolare quelle associate a movimenti ripetitivi e con un notevole livello di stress muscolari riferite a disagio esteso per assunzione di posture particolari, possono essere correlate all'insorgenza di problemi muscolo scheletrici (in letteratura riportati normalmente sotto WMSDs, Work related Muscolo-Skeletal Disorders). Come già accennato questo tipo di

disturbi

coinvolgono

alti costi legati alla mancanza di personale, per assicurazione medica, e Riabilitazione.

Per questi e altri motivi, i links tra il progettazione dei sistemi di assemblaggio e problemi di bilanciamento assumono importanza strategica al fine di una riduzione dei costi globali. In letteratura lavori che offrano un approccio integrato di questo tipo si sono sviluppati sono negli ultimi anni e lo stato della ricerca non appare attualmente esauriente; da questo punto di vista si offre ampio spazio alla ricerca nei futuri anni. Van Lingen et al. (2003) ha dimostrato il valore aggiunto di combinare l'ingegneria all'ergonomia, facendo entrare l'approccio già in fase strategica di definizione progetto. De Looze et al. (2003) a tal fine sviluppò un approccio integrato per identificare, tenendo conto non solo di aspetti progettuali, ma anche ergonomici, il collo di bottiglia del sistema per sviluppare in seguito successivi miglioramenti.

Se qualcuno considera l'assemblaggio in nel contesto industriale di molte aziende, il punto di arrivo è quello di avere tempi ciclo brevi, bassa variabilità e routine nelle operazioni. I lavoratori hanno nel selezionare il loro contenuto di lavoro scarse opportunità come pure nel compiere decisioni o pianificare le loro attività (Pack and Buck, 1992). Inoltre assieme alla monotonia dal punto di vista psicologico, vi è anche un interessamento alla muscolatura dato dalle posture e alla mancanza di movimenti necessari per una buona salute.

In particolare molte attività lavorative in particolare quelle che richiedono posture incongrue o ripetitive possono essere correlate allo sviluppo di disturbi muscolo scheletrici.

I principali disturbi riguardano forme cliniche ad interessamento prevalentemente articolare e peri articolare muscolo tendineo neurologico periferico, con frequente associazione o sovrapposizione di queste forme fra loro. Alla luce di tali considerazioni è fondamentale valutare precisamente i fattori di rischio. Le linee guida sviluppate sinora indicano i livelli per cui tali fattori dovrebbero rientrare in una zona di rischio minimo, fornendo indicazioni dirette circa la progettazione del posto di lavoro o considerano un insieme di aspetti dell'attività lavorative.

4.2 Metodi di raccolta dei dati espositivi

Vengono generalmente utilizzati tre tipi di strategie per la raccolta dei dati circa l'esposizione lavorativa a WMSD:

- le auto-valutazioni fornite dai lavoratori
- l'osservazione e l'intervista da parte di un tecnico esperto
- la misura strumentale di alcuni fattori

I fattori di rischio considerati sono prevalentemente di natura biomeccanica e fisica, mentre solo occasionalmente i fattori organizzativi e psicosociali entrano a far parte dei sistemi di raccolta dei dati.

Le auto-valutazioni, ottenute attraverso questionari, checklist o scale psicofisiche, forniscono una indicazione del dolore, dello sforzo, dei disturbi associati con lo svolgersi dell'attività lavorativa; esse forniscono informazioni e dettagli sulle caratteristiche della mansione, focalizzando sui punti critici che difficilmente sarebbero distinguibili da un osservatore esterno. L'affidabilità e la validità varia da strumento a strumento; notevole applicabilità rivestono i metodi costruiti secondo i criteri psicofisici, utilizzati soprattutto per la valutazione dell'impegno muscolare.

In questo modo può essere indicato non solo il livello di affaticamento (effetto cumulativo) avvertito a fine turno, ma anche la percezione associata all'esecuzione di un determinato gesto; a tale proposito la scala CR10 di Borg viene proposta come indicatore della forza applicata (% del massimale).

L'osservatore addestrato può utilizzare sul campo sia checklist che griglie, avvalendosi della videoregistrazione delle attività per l'osservazione visiva a posteriori. La documentazione e la descrizione dettagliata delle attività è il cardine fondamentale di vari sistemi di valutazione, ed in alcuni casi anche l'unico tipo di misura per l'esposizione ai fattori di rischio. L'utilizzo di microcomputer può costituire un aiuto nella descrizione degli elementi costituenti l'attività, nei termini cioè di una classificazione predeterminata di attività, o nella specificazione della posizione angolare dei vari segmenti corporei. A volte solo la presenza/ assenza del fattore di rischio viene registrata, mentre altre volte è importante anche definire il livello di esposizione, dipendente dall'intensità del fattore di rischio e dall'interazione tra i diversi fattori.

4.3 Metodi per la misura del carico muscolo-scheletrico

La valutazione del carico muscolo-scheletrico concerne i distretti anatomici maggiormente coinvolti nell'attività.

A parte i metodi diretti ed invasivi, la misura indiretta del carico viene ottenuta quantificando la forza, la ripetitività, la postura e la durata del compito.

Forza

L'approccio biomeccanico considera le forze risultanti applicate sui vari segmenti, in articolare su spalle, polso e dita per i compiti manipolativi, su collo e rachide per i compiti svolti in posizione seduta. A tale proposito ci si avvale di software dedicati. Dal punto di vista fisiologico, la registrazione elettromeccanografica (EMG) fornisce un'indicazione dell'attività

dei muscoli, come ad esempio quella del trapezio durante lo svolgimento di compiti manipolativi. La misura diretta della forza applicata attraverso dinamometro permette di comparare istantaneamente i livelli di forza misurata con le linee guida presenti in letteratura per azioni di spinta-trazione o per azioni di presa. I valori ottenuti attraverso la valutazione soggettiva per le fasi caratterizzate da diverso impegno di forza, moltiplicati per la durata dei relativi periodi di lavoro, forniscono un valore medio ponderato dell'impegno muscolare.

Frequenza/ripetitività

L'analisi temporale della mansione e la descrizione dettagliata dei gesti lavorativi, effettuata attraverso la scomposizione dell'attività in singoli compiti, consente di quantificare in durata e frequenza ciascuna azione. Il termine ripetitività è stato associato da diversi autori alla durata del ciclo di lavoro, ed alla similarità dei gesti lavorativi ripetuti; per esempio cicli di durata inferiore a 1 minuto vengono a questa stregua definiti monotoni. D'altra parte è preferibile distinguere tra ripetitività a livello "micro" (composizione del ciclo di lavoro, definizione delle eventuali micropause tra un compito e l'altro) e a livello "macro" (durata complessiva del compito ripetitivo e l'apporto tra tempo occupato in attività e tempo speso in recupero). La ripetitività viene praticamente quantificata attraverso la frequenza delle azioni considerate all'interno di un ciclo di lavoro e nel turno di lavoro complessivo.

Postura

Gli studi epidemiologici e fisiologici presenti in letteratura forniscono una indicazione sulle posture dei vari segmenti nei termini di "raccomandata"- "non raccomandata", in base cioè al superamento della posizione neutra per una certa quota di angolazione. Naturalmente, la postura deve essere considerata insieme ad altri fattori concomitanti ed aggravanti, quali la forza applicata, la durata del compito, la ripetitività del medesimo gesto, la possibilità di sostenere gli arti. Bisogna inoltre tenere presente che in alcune posture particolari (ad esempio con il polso in deviazione ulnare/radiale) si registra un decremento della forza massima applicabile, e di conseguenza una maggiore tensione ("strain") provocato sulle strutture periarticolari.

4.4 Quantificazione del rischio

La definizione di standard relativi alla protezione dal rischio di WMSD è tuttora in fase sperimentale e si compone di vari approcci ciascuno dei quali può sottostimare o sovrastimare l'esposizione; è difficile inoltre combinare metodi che riescano a valutare in modo adeguato

l'effetto interattivo e moltiplicativo dei vari fattori. Tuttavia, gli approcci proposti sinora costituiscono un primo tentativo di rivedere le mansioni da un punto di vista non strettamente "produttivo", ma più propriamente ergonomico. La valutazione ergonomica del rischio legato alle attività ripetitive consente di programmare interventi di sorveglianza sanitaria, di informazione-formazione rivolto ai lavoratori, e di gestione medica.

Il calcolo numerico degli indici di rischio proposti dai vari Autori, consiste generalmente in un processo semiquantitativo di assegnazione, alle variabili proprie dell'attività (forza, postura, ripetitività), di fattori numerici (moltiplicativi o demoltiplicativi) che ne definiscono il livello di impegno rispetto ad indicazioni ottenute attraverso studi epidemiologici, psicofisici e fisiologici.

Un'efficace azione preventiva deve comunque essere basata su più interventi, data la complessa e multifattoriale eziopatogenicità dei WMSD.

4.4 Alcuni indici di rischio proposti dalla letteratura

Ergonomie Stress Index: L' elevata frequenza di ripetizione, l'applicazione di forze eccessive e il mantenimento di posture costrette sono i criteri su cui si basa l'elaborazione di questo indice, che si pone come linea-guida per valutare gli interventi ergonomici necessari. In particolare i valori assegnati vengono classificati secondo la metodologia NIOSH in AL (Action Limit) e MPL (Maximum Permissible Limit), secondo cinque livelli.

La sequenza ad esempio viene espressa come numero di movimenti effettuati da una articolazione nel corso di un turno lavorativo, e poi classificata sulla base di dati epidemiologie! da "molto bassa" a "molto alta". Il calcolo dell'indice consente anche di valutare l'effetto interattivo dei tre fattori. L'indice può variare da un valore minimo di 7 ad un massimo di 215. Limite dell'indice è che in esso viene dato pari peso ai diversi fattori di rischio.

Strain Index (SI): Lo Strain Index è stato proposto, sulla base delle conoscenze fisiologiche, e meccaniche ed epidemiologiche dei disturbi legati alla parte distale degli arti superiori (mano/polso), come metodologia semiquantitativa di analisi delle attività lavorative. La metodologia implica la misura o stima di sei variabili lavorative (intensità e sforzo, durata dello sforzo per ciclo, numero di azioni al minuto, postura del polso, e velocità di esecuzione, durata del compito nel turno), l'assegnazione di una variazione di scala ordinale a ciascuna variabile, secondo i dati di esposizione.

Infine vanno valutate la velocità con cui il lavoratore sta lavorando (in rapporto ad un ritmo predefinito) e la durata giornaliera del compito. A ciascun parametro analizzato viene attribuito un punteggio che diviene un fattore moltiplicatore in modo che:

Strain Index (SI) = intensità dell'azione (forza) x durata dell'applicazione di forza x n° di azioni in forza (sforzi)/minuto x postura mano/polso x velocità d'esecuzione del compito x ore di lavoro/giorno.

Per l'interpretazione del risultato si adotta la seguente scala:

SI < 3 lavori probabilmente sicuri

SI > 3-7 valutazione incerta

SI > 7 lavori probabilmente pericolosi

OCRA Index: Per la valutazione dei fattori di rischio lavorativo che influenzano le patologie muscolo-scheletriche degli arti superiori (WMSDs) è stata avanzata una proposta per il calcolo di un indice sintetico di esposizione a movimenti ripetitivi degli arti superiori. La proposta tende a ricalcare concettualmente la procedura suggerita dal NIOSH per il calcolo del Lifting Index in attività di movimentazione manuale dei carichi. L'indice sintetico di esposizione (OCRA Index) scaturisce dal rapporto tra il numero giornaliero di azioni effettivamente svolte con gli arti superiori in compiti ripetitivi ed il corrispondente numero di azioni raccomandate. Queste ultime vengono calcolate a partire da una costante (30 azioni/ min) rappresentativa del fattore frequenza di azione e valida, per ipotesi, in condizioni ottimali, decrementata di volta in volta in funzione della presenza e delle caratteristiche degli altri fattori di rischio (forza, postura, fattori complementari, periodi di recupero). L'indice proposto non può per ora essere utilizzato come standard o per l'espressione di valori limite, ma solo per identificare i diversi livelli d'azione conseguenti ai risultati di volta in volta ottenuti. In particolare, quando l'indice di esposizione assume valori inferiori a 0,75, si determina un giudizio di piena accettabilità della condizione esaminata (area verde); valori dell'indice compreso tra 0,75 e 4 (area gialla) rappresentano una zona di incertezza, in cui l'esposizione, seppure non rilevante, è soggetta a sorveglianza per i possibili effetti indotti; valori dell'indice superiori a 4 (area rossa) indicano una esposizione tanto più significativa quanto maggiore è il valore dell'indice, e necessitano di iniziative tese al miglioramento delle condizioni di lavoro oltre che ad una stretta sorveglianza degli effetti indotti.

Lo schema di analisi proposto dalla check-list OCRA prevede l'individuazione di valori numerici preassegnati (crescenti in funzione della crescita del rischio) per ciascuno dei quattro principali fattori di rischio (tempi di recupero, frequenza, forza, postura) e per i fattori complementari. In particolare viene assegnato un punteggio variabile da 0 a 10 in funzione

del numero e della lunghezza delle interruzioni/pause del lavoro ripetitivo nel turno, un valore variabile da 0 a 10 in relazione al numero di azioni al secondo, un valore da 1 a 16 in funzione della forza esercitata e della percentuale del ciclo in cui viene esercitata forza, da 1 a 11 per le posture incongrue del braccio del polso e del gomito e per la percentuale del ciclo di lavoro durante la quale viene mantenuta tale postura, da 1 a 2 in relazione alla presenza di fattori complementari quali ad esempio **fuso** di guanti o attrezzi inadeguati.

La somma dei valori parziali ottenuti produce una entità numerica che consente la stima del livello di rischio.

Dato che i valori numerici indicati nella check-list sono stati "tarati" sui fattori moltiplicativi forniti per il calcolo del più completo indice di esposizione OCRA, il valore finale della check-list può essere a sua volta letto in funzione della fascia di corrispondenza coi valori OCRA.

Sommando i valori ottenuti dalla valutazione di Recupero + Forza + Frequenza + Ripetitività + Fattori Complementari si ottengono punteggi riferibili a rispettive fasce di "rischio riportate in Tabella I.

Check List OCRA	OCRA	Fascia di rischio
Fino a 6	2	Fascia verde e giallo/verde assenza di rischio
5.1-11,9	2,1-3,9	Fascia giallo/rossa = rischio basso
12-18,9	4-7,9	Fascia media = rischio medio
> = 19	> = 8	Fascia alta = rischio elevato

Fig. 4.1 Punteggi riferibili a rispettive fasce di rischio.

I TLV (Threshold Limit Value) sono valori indicativi riferiti a parametri fisici-chimici, proposti dall'ente governativo americano per la salute, che si prefiggono di abbattere l'incidenza di danni all'organismo; in questo caso il TLV per l'attività degli arti superiori viene proposto per la riduzione dei danni muscolo-scheletrici correlati al lavoro delle mani ed all'applicazione di forza con le mani.

Il TLV proposto da ACGIH (1999) prende in considerazione l'attività di mano, polso e avambraccio, ed è basato su dati epidemiologici, psicofisici e biomeccanici. Il suo utilizzo è circoscritto alle attività composte da uno stesso compito ripetuto per 4 ore o più durante un turno lavorativo.

I livelli considerati sono quello medio di attività ("hand activity level" o MAL), ed il valore soglia (TLV), per il quale si suppone una elevata prevalenza di disturbi muscolo-scheletrici.

Il livello medio di attività (MAL) è calcolato sulla frequenza di azioni svolte dalle mani e dalla composizione del ciclo di lavoro (periodi di lavoro effettivo e periodi di recupero): esso può essere anche determinato attraverso valutazioni fornite da un osservatore esperto o dal lavoratore stesso, su una scala ordinale da 0 a 10. La forza viene considerata normalizzata su una scala da 0 a 10, in corrispondenza dei

livelli di forza dallo 0 al 100% della massima, esercitabili da una popolazione di riferimento. La forza massima richiesta dall'attività può essere quindi valutata da un osservatore esperto, dal lavoratore stesso attraverso una scala come quella di Borg, o misurata direttamente attraverso una cella di forza o un elettromiografo. In presenza di fattori complementari (mantenimento di posture non-neutrali come flessione-estensione o deviazione del polso, rotazione dell'avambraccio; compressione da contatto localizzato; basse temperature; vibrazioni) occorre fare riferimento al giudizio di un esperto per ridurre l'esposizione oltre i limiti indicati dal TLV.

OREGE (Outil de Reperage et d'Evaluation des Gestes):L'OREGE comprende la quantificazione da parte del valutatore della forza con la scala (da 0 a 10) di Latko (1997) che tiene conto del peso di oggetti ed utensili, del tipo di presa, della pressione, delle vibrazioni, della temperatura, dei guanti, confrontata con una valutazione su scala 0-10 dell'operatore; le posizioni articolari per rachide cervicale, spalla, gomito e polso; la ripetitività anch'essa confrontata con una valutazione dell'operatore. La sintesi dei vari fattori biomeccanici porta al calcolo dell'indice di rischio che si ottiene sommando i punteggi relativi alla forza (0-10), ripetitività (0-10), postura (0-3). Le scale di valutazione di forza e ripetitività sono compilate dai lavoratori (a cui viene chiesto di indicare su una scala continua il livello corrispondente all'entità di forza e ripetitività richiesta in quella postazione) e dal valutatore-esperto. La somma dei punteggi ottenuti per forza, ripetitività, postura consente di individuare tre fasce di rischio:

- 1-8 accettabile
- 9-15 non raccomandato
- 16-23 da evitare.

4.5 Metodi Ergonomici

Metodo REBA: Il metodo REBA (Rapid Entire Body Assessment) è stato sviluppato per la valutazione del rischio WMSD dei lavoratori dei luoghi di cura e di altre aziende di servizi. I dati di ingresso dell'analisi sono la postura del corpo intero (testa, tronco, arti superiori ed inferiori), la forza impiegata, il tipo di movimenti o azioni eseguite, la ripetitività e le condizioni di presa.

Ad ogni distretto o fattore esaminato viene assegnato un punteggio, il quale cresce con la gravità del rischio insito nel fattore stesso. Ciò è particolarmente utile in fase di riprogettazione della postazione di lavoro, in quanto è abbastanza agevole identificare i 'attori che più contribuiscono ad "incrementare" il livello di rischio. L'indice di rischio che si ottiene dall'analisi REBA indica il livello di rischio presente e urgenza con la quale eventuali azioni correttive dovrebbero essere prese, con un punteggio crescente con la gravità del rischio stesso. Tale metodo, esaminando tutti i distretti del corpo, si propone come uno strumento completo" in quanto permette di rilevare situazioni di rischio per le varie parti del corpo, oltre che per gli arti superiori (ad esempio per il tronco, il collo, ..). Può essere impiegato in ogni situazione ed in particolare per l'analisi da WMSD del personale impiegato nella movimentazione dei pazienti ospedalizzati. Può anche essere impiegato, inoltre, in tutte quelle situazioni in cui qualsiasi altro metodo da risultati "borderline" in cui, quindi, si presenta una situazione di incertezza in tutte le situazioni in cui si verificano situazioni anomale, come livello di rischio calcolato accettabile e personale che, comunque, accusa malessere. In tutti questi casi l'applicazione di più metodi di analisi è raccomandata.

Metodo PULA: Il metodo RULA (Rapid Upper Limb Assessment) è stato sviluppato ed è particolarmente usato per la valutazione del rischio da WMSD dei lavoratori addetti a compiti "sedentari" come videoterminalisti o altri compiti in cui l'operatore è seduto, oppure per quelle postazioni di lavoro in cui l'operatore, in piedi, sta fermo per gran parte del tempo.

I dati di ingresso dell'analisi sono la postura del corpo (testa, tronco, arti superiori), la forza impiegata, il tipo di movimenti o azioni eseguite, la ripetitività. Analogamente al metodo RESA, ad ogni distretto o fattore esaminato viene assegnato un punteggio, il quale cresce con la gravità del rischio insito nel fattore stesso. Ciò è particolarmente utile in fase di riprogettazione della postazione di lavoro, in quanto è abbastanza agevole identificare i fattori che più contribuiscono ad "incrementare" il livello di rischio. Come per il metodo REBA, l'indice di rischio che si ottiene dall'analisi RULA indica il livello di rischio presente e l'urgenza con la quale eventuali azioni correttive dovrebbero essere prese con un punteggio crescente con la gravità del rischio stesso. Per quanto riguarda il suo impiego valgono le stesse considerazioni

svolte per il metodo REBA. Molti altri autori, hanno prodotto documentazione circa i fattori di rischio associati ai disturbi agli arti superiori.

Nello sforzo di esaminare i primi quattro fattori di rischio dovuti al carico esterno descritti (numero di movimenti, sforzo statico dei muscoli, forza e postura), RULA è stato sviluppato nell'ottica di:

- fornire un metodo di selezione veloce dei lavoratori che sono soggetti a disturbi agli arti superiori
- individuare lo sforzo muscolare associato con la postura di lavoro, e con l'esercizio di una forza nello svolgimento del lavoro (sforzo statico o ripetitivo), elementi che contribuiscono alla fatica muscolare
- dare dei risultati immediati che potessero essere inclusi successivamente in una stima ergonomica più allargata che preveda anche la parte epidemiologica, fisica e mentale. Lo sviluppo del metodo è avvenuto in tre fasi:
 1. modalità di registrazione delle posture durante il lavoro;
 2. sviluppo del sistema di punteggio;
 3. sviluppo della scala dei livelli di azione che forniscono una guida al livello di rischio.

Prima fase: modalità di registrazione delle posture durante il lavoro

DIAGRAMMI DELLE POSTURE

Per produrre un metodo che fosse di rapido utilizzo, il corpo è stato diviso in due segmenti individuati dai due gruppi, A e B. Il gruppo A include braccio, avambraccio e polso, mentre il gruppo B include il collo, il tronco e le gambe. Ciò assicura l'analisi della postura globale dell'intero corpo, prendendo in considerazione qualsiasi postura incongrua delle gambe, del tronco o del collo che possono influenzare la postura degli arti superiori di cui si vuole valutare il fattore di rischio. La base adatta allo sviluppo del metodo RULA è stata individuata nel sistema OWAS che associa a ciascuna singola postura un codice numerico: è un metodo chiaro e conciso che può essere utilizzato velocemente. I movimenti del corpo sono stati suddivisi in opportuni intervalli angolari in accordo ai criteri derivati dalla letteratura.

Tali intervalli sono numerati in modo che il numero 1 corrisponda all'intervallo di movimento o alla postura di lavoro in cui il fattore di rischio correlato è minimo. Numeri più alti sono assegnati agli intervalli di movimento che presentano posture più estreme, che indicano una crescita della presenza del fattore di rischio a carico della sezione considerata.

Questo sistema di associare un punteggio a ciascuna postura del corpo già codificata in diagrammi standard, consente una notevole semplificazione delle modalità di registrazione.

Il diagramma delle posture riporta le sezioni sagittali del corpo per facilitare l'identificazione dell'intervallo di postura. Se la postura di un lavoratore non può essere riportata a quelle descritte, si adottano degli opportuni coefficienti di correzione di tipo conservativo, definiti a priori, che consistono nell'aumentare o nel diminuire di una unità il valore relativo associato.

Nelle figure proposte qui sotto, GRUPPO A e GRUPPO B, vengono riportati gli intervalli di movimento relativi alle diverse sezioni del corpo utilizzate per la registrazione dei dati sul campo. Di seguito vengono descritti i punteggi relativi a ciascun intervallo e a ciascun segmento considerato.

GRUPPO A

Individua il braccio, l'avambraccio ed il polso

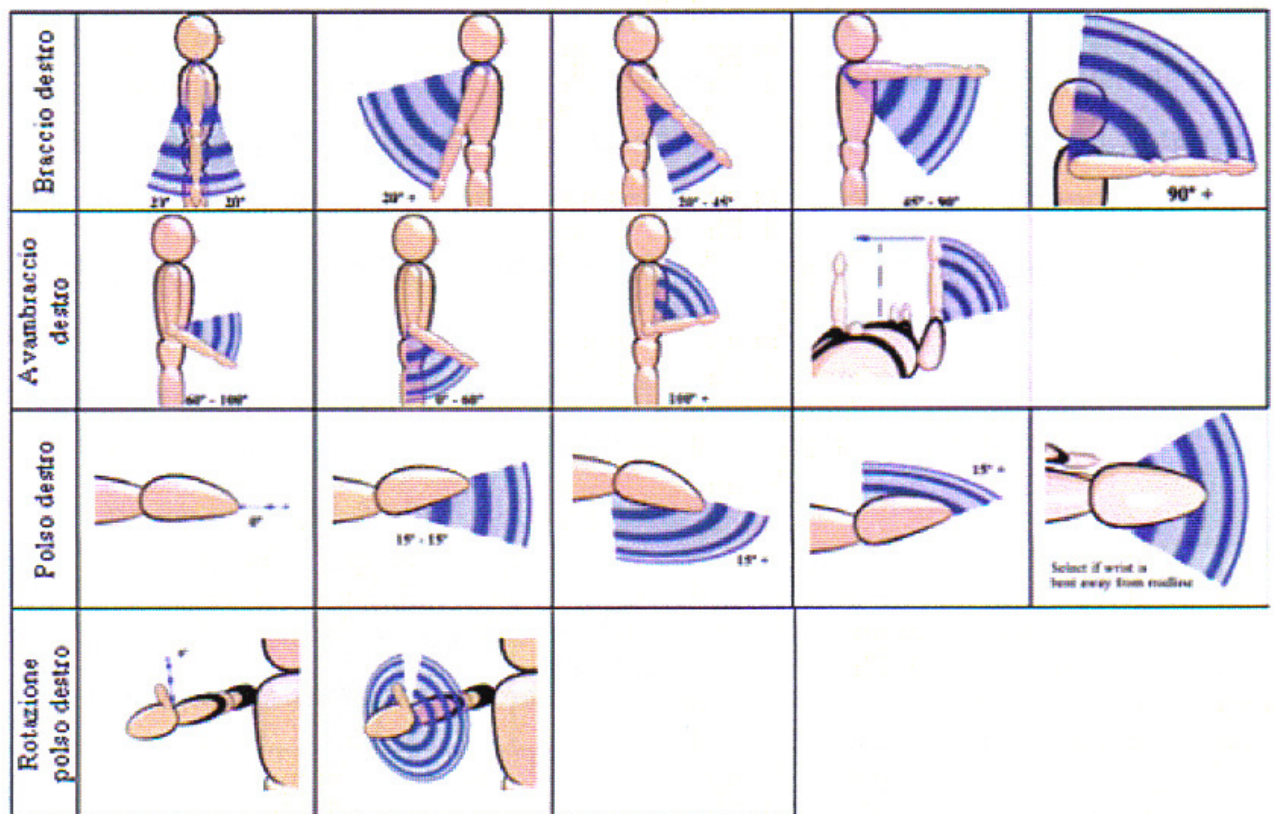


Fig. 4.2 Posture del braccio, dell'avambraccio e del polso (Kadefors, Foresman 2002)

La stima e la relativa assegnazione del punteggio all'intervallo dei movimenti per il braccio sono basati sulle scoperte fatte da studi sviluppati da Tichauer, Chaffin, Herberts e altri, Hagberg, Schuldt e altri, e Harms-Ringdahl e Schultz. I punteggi sono:

1 per 20° di estensione a 20° di flessione

2 per un'estensione superiore a 20° o una flessione compresa tra 20-45°

3 per una flessione tra 45-90°

4 per una flessione pari o superiore a 90°.

Se la spalla è sollevata, il punteggio della postura appena enunciato, viene aumentato di una unità. Se il braccio è addotto il punteggio è aumentato di una unità. Se il lavoratore è inclinato o il peso dell'arto è sorretto, il punteggio relativo alla postura va diminuito di un'unità. L'intervallo dei valori relativo all'avambraccio sono tratti dal lavoro sviluppato da Grandjean e Tichauer. I punteggi sono:

1 per flessione compresa tra 60-100°

2 per flessione inferiore a 60° o superiore a 100°.

Se l'avambraccio sta lavorando in modo incrociato rispetto alla mezzeria del corpo o fuori lato, il punteggio relativo alla postura va incrementato di una unità. Le linee guida per il polso pubblicate dal Health ad Safety Executive sono utilizzate per produrre i seguenti punteggi posturali:

1 se è in una posizione neutra

2 se in estensione o in flessione in un intervallo di 0-15°

3 per un'estensione o una flessione superiore a 15°

Se il polso è sottoposto ad una deviazione ulnare o radiale, il punteggio posturale relativo va aumentato di un'unità. La torsione del polso (pronazione e supinazione) sono definite relativamente alla postura considerata neutra basata sugli studi di Tichauer. I punteggi sono:

1 se il polso è ruotato fino alla metà della propria potenzialità

2 se il polso è prossimo o è proprio nella posizione di massima torsione

Gli intervalli di postura per il collo sono basati sugli studi di Chaffin e Kilbom ed altri. Il punteggio e gli intervalli sono:

1 per una flessione tra 0-10°

2 per una flessione tra 10-20°

3 per una flessione $\geq 20^\circ$

4 se il collo è in estensione

Se il collo è ritorto o piegato da un lato il punteggio è incrementato di un'unità. Gli intervalli per il tronco sono stati sviluppati da Drury, Grandjean. Il punteggio ed i relativi intervalli sono:

1 quando si è seduti con un angolo anca-tronco di 90° o più

2 per una flessione tra 0-20°

3 per una flessione tra 20-60°

4 per una flessione $\geq 60^\circ$

Se il busto è ritorto o piegato da un lato, il punteggio viene aumentato di una unità.

I punteggi delle gambe sono definiti come di seguito:

se le gambe ed i piedi sono ben poggiati, seduti e/o col corpo ben bilanciato

1 se in piedi, col peso del corpo ben distribuito su entrambi i piedi con spazio per cambiare posizione

2 se le gambe ed i piedi non sono ben appoggiati o il peso del corpo non è bilanciato bene.

Definito il significato dei diagrammi ed i relativi valori associati, viene riportata di seguito la modalità di rilievo e di registrazione dati. Si parte dall'osservazione del lavoratore durante lo svolgimento di diversi cicli di lavoro, in modo da individuare quale sia la mansione e la postura più significativa da *analizzare*. La scelta può essere fatta sia considerando la postura che viene maggiormente mantenuta durante il lavoro ciclico, sia considerando i distretti maggiormente sollecitati.

I valori corrispondenti ai relativi diagrammi individuati sono riportati nel foglio di calcolo. Dall'insieme di questi dati si ottiene una stima complessiva per il gruppo A e per il gruppo B che rappresentano il livello di carico posturale del sistema muscolo-scheletrico, determinato dalla combinazione delle posture di tutto il corpo. La scala dei valori è nata dallo studio portato avanti da ergonomisti e fisioterapisti occupazionali. Il primo passo per arrivare a tale definizione è stato quello di classificare ogni combinazione delle posture in modo da assegnare valori da 1 a 9 a partire dal carico minore a quello massimo. Ciò ha portato alla definizione di una tabella di valori A e una certa B.

		Punteggio del Polso							
		1		2		!_ polso	rotaz 2	polso ì	rotaz 2
		polso	rotaz	polso	rotaz				
braccio	avambraccio	1	2	1	2	1			
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3 3
	2	2	2	2	2	3 3	-	3	
	3	o	3	3	3			4	4
2	j	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	O	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	6	7	I 7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Fig. 4.3 punteggio postura degli arti superiori

Seconda fase: *sviluppo del sistema di punteggio*

I valori A e B così determinati non sono però ancora del tutto completi. Non contengono le informazioni relative all'uso dei muscoli e al punteggio associato alla zona esercitata. È stato perciò studiato un metodo che include nel sistema di punteggio anche eventuali sollecitazioni addizionali sul sistema muscolo-scheletrico usate da un eccessivo lavoro statico dei muscoli da movimenti ripetuti e dalla chiesta di esercitare una forza o mantenere un carico esterno mentre si sta eseguendo l'attività. Questi valori sono calcolati in maniera distinta per il gruppo A ed il gruppo B. I fattori correttivi così individuati permettono di arrivare alla determinazione - rispettivamente dei punteggi C e D.

Punteggio postura A	+	Uso muscolare	+	Uso forza	=	Punteggio C
------------------------	---	------------------	---	-----------	---	-------------

Punteggio postura B	+	Uso muscolare	+	Uso forza	=	Punteggio D
------------------------	---	------------------	---	-----------	---	-------------

Fig. 4.3 Calcolo del punteggio C e D

L'analisi del carico statico o delle forze esercitate che procurano disturbi agli arti superiori sono strettamente dipendenti dal tempo di esposizione del lavoratore.

Partendo da uno studio sviluppato da Bjorksten e Jonsson, ripreso e generalizzato nel metodo RULA, si aumenta il valore della postura (A o B) di una unità nel caso in cui la postura sia prevalentemente statica, cioè, mantenuta per più di un minuto.

L'uso del muscolo è considerato ripetitivo se l'azione è ripetuta per più di quattro volte in un minuto.

Terza fase: sviluppo della scala dei livelli di azione

Nella terza fase di sviluppo del metodo RULA si è individuato un metodo che permettesse di correlare tutti i punteggi raccolti in modo da ottenere un unico punteggio finale il cui valore fornisce l'obiettivo del metodo e cioè individuare la priorità delle situazioni da investigare.

Il punteggio finale, fissato su una scala di valori da 1 a 7, è basato sul rischio di lesione stimato a causa di sollecitazioni muscolo scheletriche ed è determinato dal confronto dei punteggi C e D, come riportato nella tabella riassuntiva seguente (tabella punteggio finale). Il punteggio finale 1 o 2 indica che la postura è accettabile se non è mantenuta o ripetuta per lunghi periodi. Il punteggio finale 3 o 4 indica che sono necessarie ulteriori osservazioni e che sono richieste delle modifiche. Il punteggio finale 5 o 6 indica che sono necessarie indagini e modifiche repentine. Il punteggio 7 indica la necessità di indagini e modifiche immediate.

I livelli di azione più alti non portano necessariamente a soluzioni che evidenzino una inequivocabile assenza di rischio. Il metodo fornisce, infatti, una guida ed è stato sviluppato per definire i confini delle situazioni più estreme. Per queste ragioni la lista delle azioni conduce, in molti casi, a proposte di indagini più

dettagliate. RULA fornisce un ordine di priorità delle attività che devono essere analizzate, mentre

il valore del punteggio della singola postura ed il punteggio dell'uso del muscolo e quello della forza esercitata indicano quali aspetti contribuiscono maggiormente al problema.

Da alcune applicazioni sperimentali del metodo si è dedotto che il punteggio RULA permette di discriminare tra una postura accettabile ed una non accettabile. Delle discrepanze si hanno

solo quando si è sul confine tra due intervalli di livello di azione, specialmente per quanto riguarda l'avambraccio.

Metodo NIOSH: Il metodo NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) è il metodo universalmente impiegato per valutare il rischio di danni dorso-lombari in soggetti addetti alla movimentazione manuale dei carichi. Nel 1981 il NIOSH elaborò la prima equazione (equation lifting) che consentiva di definire un indice di rischio, conoscendo la "geometria" del sollevamento (distanze orizzontali e verticali, distanza di sollevamento, ...), il peso movimentato, le frequenze di sollevamento, ... Nel 1991 le equazioni sono state revisionate (pubblicate come "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks (Waters, Putz-Anderson, Garg, Fine -Ergonomics 1993)") e costituiscono l'attuale versione del metodo comunemente utilizzato per il calcolo dell'indice di rischio. Il modello rivisitato del NIOSH (1993) è in grado di determinare, per ogni azione di sollevamento (o abbassamento), il cosiddetto RWL (Recommended Weight Limit) o "Peso limite raccomandato" attraverso un'equazione che, partendo da un peso massimo sollevarle in condizioni ideali, considera la geometria del sollevamento, le condizioni di presa, la frequenza di sollevamento, ..., cui viene assegnato un determinato fattore demoltiplicativo che può assumere valori compresi tra 1, per le condizioni ottimali, e 0 per quelle critiche. Il NIOSH nella sua proposta parte da un peso ideale di 23 kg che viene considerato protettivo per il 99% dei maschi adulti e per il 75-90% delle donne. In Italia, sulla base anche dei dati esistenti in letteratura, si parte da un peso ideale di 30 kg per i maschi adulti e 20 kg per le femmine adulte; in tal modo si protegge circa il 90% delle rispettive categorie.

Metodo Snook & Ciriello: Fin dal 1970 sono stati condotti studi sull'analisi e valutazione di compiti con azioni di sollevamento, abbassamento, traino, spinta e trasporto al fine di ridurre i rischi di danni dorso-lombari dei lavoratori. I principali studi furono condotti da Stover Snook e Vincent Ciriello al Liberty Mutual Research Institute for Safety. Gli studi furono condotti utilizzando metodologie psicofisiche (comprese le misure del consumo di ossigeno, della frequenza cardiaca, delle caratteristiche antropometriche, ...). I soggetti esaminati potevano scegliere liberamente i pesi da movimentare; tutte le altre variabili dell'operazione (sollevamento, spinta, traino, ...), come l'altezza, la distanza, la frequenza, ... erano decise dagli sperimentatori. I soggetti monitoravano le loro sensazioni di fatica e sforzo, e riaggiustavano il peso movimentato o la forza impiegata. I risultati di questi studi sono riassunti nelle cosiddette

"Tabelle Psicofisiche", le quali forniscono importanti informazioni sulle capacità e limitazioni dei lavoratori riguardo la movimentazione manuale dei carichi (in senso generale, comprese le azioni di traino, spinta e trasporto).

Le *"Tabelle Psicofisiche"* elaborate da Snook e Ciriello furono successivamente utilizzati dal NIOSH per implementare il proprio metodo di analisi (il cosiddetto metodo NIOSH) per la movimentazione manuale dei carichi (solamente per le azioni di sollevamento ed abbassamento), al fine di ridurre i rischi di danni dorso-lombari dei lavoratori esposti.

Metodo OWAS

Il metodo OWAS è una tecnica di analisi che valuta la qualità delle posture, ovvero identifica quelle posture e quei carichi di lavoro (o sforzi impiegati per compiere un'azione) che possono causare disturbi muscolo-scheletrici. Il metodo consiste nell'osservazione diretta delle attività svolte da un lavoratore addetto ad una determinata mansione; la valutazione delle posture va effettuata ad intervalli di tempo fissi e predefiniti. La durata complessiva dell'analisi può variare a seconda del tipo di valutazione che si vuole effettuare. Le posture e l'uso della forza (o carico di lavoro) vengono classificate con dei numeri in modo da ottenere un codice finale a cinque cifre; va infatti compilata una scheda di valutazione che prende in esame i cinque punti fondamentali dell'analisi: le posture assunte dalla schiena, l'atteggiamento degli arti, il carico di lavoro (o uso della forza); la quinta cifra corrisponde alla fase di lavoro, cioè all'attività svolta dal lavoratore al momento dell'osservazione. Ogni codice numerico corrisponde poi ad una delle quattro possibili categorie d'azione (1 = nessuna misura correttiva, 2 = misure correttive nel prossimo futuro, 3 = misure correttive appena possibile, 4 = misure correttive immediatamente), ciascuna delle quali indica una necessità di intervento correttivo più o meno urgente. Le postazioni analizzate sono state due e per entrambe è emerso che è stata assunta una postura corrispondente alla seconda categoria d'azione per la maggior parte del tempo dell'osservazione. L'indicazione è quindi quella di apportare delle misure correttive alla situazione esistente nel prossimo futuro. E' da segnalare che una maggiore esposizione al compito determina il passaggio alla categoria successiva (misure correttive appena possibile).

5. Balancing Problem

5.1 Simple Assembly line balancing problem

Molte ricerche nel bilanciamento delle linee di assemblaggio, sono state condotte per modellare e risolvere i problemi di assemblaggio delle linee single-model (SALBP), che presentano le seguenti caratteristiche:

- produzione di massa di un prodotto omogeneo, attraverso lo svolgimento di n operazioni in un determinato processo di produzione
- linee sincrone con un tempo di ciclo fisso
- tempi delle operazioni deterministici e integrali
- non ci sono restrizioni di compiti
- layout in serie
- tutte le stazioni sono equamente equipaggiate
- intervallo di lancio pari al tempo di ciclo
- massimizzazione dell'efficienza della linea

In particolare la ricerca fino alla metà degli anni 80 si rifaceva quasi totalmente a tali tipologie di sistemi di assemblaggio. Per questo ad oggi esistono diversi modelli in letteratura su questa tipologia di sistemi; modelli che rilassano via via i vincoli esposti precedentemente. Tuttavia la tendenza dei mercati ha fatto sviluppare ed affermare sempre più sistemi di assemblaggio flessibili in grado di produrre più modelli in maniera mixata. Questi sistemi saranno trattati in seguito.

Dalla letteratura classica deriviamo diverse versioni del SALBP..

	Cycle time c	
	Given	Minimize
No. m of stations		
<i>Given</i>	SALBP-F	SALPB-
	2	
<i>Minimize</i>	SALPB-1	SALPB-
	E	

Fig. 5.1 Versioni di SALPB (Becker and. School 2006)

Il problema SALPB-F, consiste nel trovare, se esiste, una possibile assegnazione di compiti per un dato numero di stazioni e che risulti fattibile per un determinato tempo di ciclo.

Tale problema è collegato ai seguenti problemi di ottimizzazione:

SALPB-1: minimizzare il numero di stazioni m per un determinato tempo di ciclo c .

SALPB-2: minimizzare il tempo di ciclo c per un dato numero di stazioni m .

SALPB-E: massimizzare l'efficienza della linea, ovvero massimizzare il rapporto $m \cdot c$.

SALPB-F: permette di valutare se esiste o no una certa combinazione (m, c) fattibile.

In termini di fattibilità, i problemi di ottimizzazione possono essere rappresentati nel modo seguente (con le solite notazioni):

- SALBP-F: Non presenta una funzione obiettivo e, dunque, non si pone come metodo per la risoluzione del problema, ma come strumento per validare una possibile soluzione, intesa come assegnazione delle operazioni alle stazioni. Il tempo ciclo (t_c) e il numero di stazioni (M) è dato. Inoltre, successivamente, viene calcolato un bilanciamento della linea per la combinazione (t_c, M) .
- SALBP-1: La funzione obiettivo prevede di minimizzare il numero M di stazioni, dato il tempo ciclo t_c . È utilizzato nella progettazione di una nuova linea, dove la domanda di mercato possa essere stimata con sufficiente precisione.
- SALBP-2: La funzione obiettivo prevede di minimizzare il tempo ciclo t_c dato il numero di stazioni M . È utilizzata per massimizzare la produttività di una linea già presente.

- SALBP-E: Il modello prevede di massimizzare l'efficienza della linea (E) minimizzando il prodotto $m^* t_c$. È la generalizzazione delle due versioni precedenti, ed è di particolare aiuto nel caso in cui sia il tempo ciclo che il numero di stazioni possano variare entro certi valori.

I problemi di tipo SALBP-1 e 2 possono considerarsi duali, ovvero nella 1 il tempo ciclo è considerato un parametro, mentre è variabile per la versione 2. Per il numero di stazioni vale, ovviamente, il discorso simmetrico.

Le assunzioni di SALPB, sono molto restrittive. Perciò tale tipo di problema di bilanciamento non è realistico per descrivere le situazioni reali. Per questo motivo i ricercatori hanno recentemente intensificato i loro sforzi per identificare, formulare e risolvere i problemi realistici che si riscontrano nelle varie realtà industriali. Le procedure di SALPB, possono essere modificate per risolvere problemi generali.

I moderni sistemi di produzione flessibile necessitano tuttavia di metodologie differenti che tengano conto di altri fattori, quali il layout, il numero di prodotti, la variabilità del mix e dei tempi di esecuzione. In questo capitolo verranno affrontate tutte queste tematiche.

5.2 Mixed Model Assembly line balancing problem

I sistemi produzione di tipo mixed-model, sono spesso utilizzati in quanto provvedono a realizzare un flusso continuo di materiali, riducono il livello di scorte degli articoli finali e sono molto flessibili. Tuttavia questa flessibilità richiede attrezzature costose che riducono e in alcuni casi eliminano i ritardi causati dall'attività di set-up. I problemi decisionali che sorgono, si posizionano in piani temporali diversi. Le decisioni a medio o lungo termine riguardano l'installazione della linea e la divisione del lavoro fra le varie stazioni. A tale scopo, occorre determinare la lunghezza della linea, la percentuale di produzione o in maniera equivalente, il tempo di ciclo. La maggior parte di queste decisioni, rientra nei MALBP (mixed-model assembly line balancing problem). Come nel caso della produzione single model il problema è quello di trovare il numero di stazioni e il tempo di ciclo in modo tale da ottimizzare un certo obiettivo. A tale problema corrispondono le versioni SALPB-1 e SALPB-2 rispettivamente. Tuttavia, il problema si presenta molto più complesso rispetto a quello delle linee single model, in quanto il bilanciamento deve essere fatto tenendo conto che sulla linea vengono assemblati modelli diversi. Quindi in questo caso, non è più sufficiente considerare la semplice capacità o i costi diretti, come nel caso delle linee single model. In modo da realizzare un flusso continuo di materiali, avvalersi degli effetti di apprendimento e evitare l'installazione di identiche attrezzature, le attività comuni per modelli diversi devono essere assegnate alla stessa stazione.

Le problematiche principali risiedono nella difficoltà di bilanciare l'utilizzo delle singole stazioni in riferimento ad ogni modello che può attraversare la linea. Questi, infatti, possono richiedere differenti attrezzature, lavorazioni o macchinari, e possono variare i tempi delle operazioni nelle singole stazioni oltre alle relazioni di precedenza. Il tempo ciclo della linea non è, come nel caso del modello singolo, minore del massimo tempo disponibile in ogni stazione ma si utilizza come riferimento un tempo medio definito sulla base del tasso di produzione desiderato. Si avranno, dunque, stazioni che eccedono il tempo ciclo, per un dato modello, e stazioni che necessitano di una quantità di tempo inferiore.

Il risultato di questa operazione di bilanciamento sarà la suddivisione del lavoro fra le stazioni e il calcolo del tasso di produzione della linea

I problemi decisionali di breve termine si denominano MSP (mixed-model sequencing problem). In questo caso si cerca di trovare la sequenza delle unità dei vari modelli, che riunisca la domanda di tutti i modelli fornita dal modello di produzione di breve periodo e l'ottimizzazione di alcuni obiettivi.

Le assunzioni base per il modello MALBP sono le medesime specificate in precedenza per il modello SALBP. In questo caso, però, è necessario introdurre delle ulteriori ipotesi di lavoro con riferimento al prodotto:

- L'assemblaggio di ogni modello richiede l'esecuzione di una serie di attività che sono mappate nel diagramma di precedenza, e tale diagramma esiste per ogni prodotto.
- Vi è un sotto insieme di operazioni comuni a tutti i modelli. È inoltre possibile creare un diagramma del ciclo operativo comune a questi, e non ciclico.
- Operazioni comuni a più modelli sono svolte all'interno della stessa stazione, anche con tempi ciclo differente. Tempi ciclo pari a zero indicano che l'operazione non è necessaria.
- È noto il tempo totale a disposizione in riferimento al periodo di pianificazione.
- È nota la domanda attesa, di tutti i modelli, in riferimento al periodo di pianificazione.

La simbologia utilizzata, salvo dove diversamente indicato, è introdotta nella seguente tabella.

Simbolo	Legenda	Formula derivata
M	numero totale di modelli di indice $m=1, \dots, M$	
d_m	domanda attesa per il prodotto m nel periodo di pianificazione	
D	domanda totale attesa nel periodo di pianificazione	$D = \sum_{m=0}^M d_m$
J	numero totale di operazioni richieste di indice $j=1, \dots, J$	
PT	tempo totale a disposizione nel periodo di pianificazione	
t_C	tempo (medio) di ciclo, l'intervallo di lancio in produzione sarà	$t_C \leq \frac{PT}{D}$
$t_{j,m}$	tempo per l'operazione j per il modello m	
t'_j	tempo cumulativo dell'operazione j per tutti gli m modelli interessati da quella operazione	$t'_j = \sum_{m=0}^M d_m t_{j,m}$
t_j	tempo (medio) dell'operazione j per unità prodotta	$t_j = \frac{t'_j}{D}$
K	numero di stazioni di indice $k=1, \dots, K$	
S_K	Operazioni assegnate alla stazione K	
$\tau_{m,k}$	tempo di lavorazione del modello m nella stazione k	$\tau_{m,k} = \sum_{j \in S_K} t_{j,m}$
$\tau'_{m,k}$	tempo totale del modello m nella stazione k	$\tau'_{m,k} = d_m \tau_{m,k}$
\bar{t}_m	tempo medio di operazione per stazione e unità del modello m	$\bar{t}_m = \sum_k \frac{\tau_{m,k}}{K}$
\bar{t}'_m	tempo totale medio di operazione per stazione e modello m	$\bar{t}'_m = d_m \bar{t}_m$
τ'_k	tempo di operazione totale nella stazione k	$\tau'_k = \sum_m \tau'_{m,k}$
τ_k	tempo medio per operazione per unità, della stazione k	$\tau_k = \frac{\tau'_k}{D}$

Fig.5.2 Notazioni di base

Prima di procedere allo sviluppo dei problemi MALBP, è necessario introdurre due ulteriori definizioni:

- In un problema di tipo MALBP ogni operazione comune a più prodotti, del diagramma di precedenza, è assegnata ad una sola stazione e il ciclo tecnologico è rispettato.

L'assegnamento delle operazioni alle K stazioni della linea è valido se, dato un tempo ciclo t_c si ha che $\tau_k \leq t_c$ per $k=1, \dots, K$.

Questa definizione, dunque, prevede che una data tipologia di operazione sia assegnata ad una sola stazione in grado di svolgerla, poiché questa tipologia di operazioni è rappresentata dallo stesso nodo del diagramma del ciclo operativo. Inoltre è assicurato che i tempi delle singole stazioni non eccedano il tempo ciclo e, quindi, $\tau'_k \leq PT$.

- Un *modello medio* (o prodotto medio) può essere definito tramite un diagramma di ciclo comune a più modelli e dai tempi medi di ogni operazione (t_j). Un *modello aggregato* può essere definito tramite il diagramma di ciclo comune, definito in precedenza, e i tempi di ciclo totali t'_j .

Riferiti al MALBP abbiamo quindi:

- MALBP-F: si assumono noti sia il tempo ciclo (t_c) che il numero di stazioni (K). Il tempo ciclo determinerà l'intervallo di lancio in produzione. Per ogni combinazione (t_c, K), come nel caso di SALBP-F, si otterrà una risposta circa la validità della soluzione. Questa definizione di MALBP-F corrisponde all'adattamento di SALBP-F utilizzando il modello medio. Per ogni problema MALBP-F con M modelli si potrà, dunque, ottenere il problema SALBP-F riferito al modello medio. Le proprietà di SALBP-F restano dunque valide, così come la sua formulazione e complessità.
- MALBP-1: per un dato tempo ciclo t_c , la funzione obiettivo mira a minimizzare il numero di stazioni. Il tempo ciclo è solitamente calcolato a partire dalla domanda D da soddisfare e dal tempo totale a disposizione, PT. Il problema equivalente, SALBP-1, può essere ottenuto considerando il modello medio con il proprio tempo ciclo, o il modello aggregato considerando il tempo ciclo pari al tempo totale PT.
- MALBP-2: per un dato numero di stazioni K, la funzione obiettivo mira a minimizzare il tempo ciclo t_c . Il problema è formulato in maniera equivalente massimizzando la produzione totale D nel periodo PT dato. Il problema equivalente SALBP-2 si ottiene tramite l'adozione del modello medio.
- MALBP-E: come per il problema SALBP-E possono variare sia il numero di stazioni che il tempo ciclo t_c . La funzione obiettivo mira a massimizzare l'efficienza della linea o minimizzare il prodotto $t_c K$.

La figura seguente mostra la simmetria fra le diverse versioni dei metodi SALBP e MALBP.

Problema SALBP	Problema MALBP	Procedura di adattamento di problema MALBP in SALBP
SALBP-F	MALBP-F	<ul style="list-style-type: none"> Utilizzo del modello medio e del diagramma di precedenza congiunto
SALBP-1	MALBP-1	<ul style="list-style-type: none"> Utilizzo del modello medio con il suo tempo ciclo caratteristico Utilizzo del modello aggregato con tempo ciclo pari al tempo totale PT
SALBP-2	MALBP-2	<ul style="list-style-type: none"> Utilizzo del modello medio
SALBP-E	MALBP-E	

Fig. 5.3 Simmetria fra problemi SALBP e MALBP

Lo step da intraprendere una volta definito un problema MALBP è quello di riportare il problema ad un SALBP, questo per la natura complessa del problema, come già affrontato nel capitolo 3.

Infatti le metodologie di bilanciamento, viste sopra fanno parte di quella generica classe di problemi che riguardano *l'ottimizzazione*. In generale, la *complessità* di questi problemi riguarderà la richiesta di risorse quali tempo di computazione e memoria necessarie alla risoluzione di questi con l'ausilio di un calcolatore e di un software rappresentativo dell'algoritmo. In genere *il tempo di computazione* è il parametro più utilizzato per valutare l'efficienza di un algoritmo.

Nella formalizzazione degli aspetti riguardanti la complessità è stata sviluppata, da Cook (1971) la *teoria della completezza NP*. Di seguito per completezza Di seguito verranno introdotti i concetti e la terminologia necessaria alla corretta comprensione della letteratura e degli algoritmi studiati.

Nello studio della complessità è necessario distinguere i differenti aspetti del problema analizzato:

- Tipo di problema: è il problema stesso.
- Istanze del problema: Possono essere ottenute specificando particolari valori per alcuni parametri.
- Lunghezza dell'input: caratterizzata dal numero di parametri e cifre con cui questi vengono rappresentati.

Solitamente il tempo di computazione dipende sia dal tipo di istanza analizzata che dal numero di cifre con cui vengono rappresentati i dati.

È possibile definire un *funzione di complessità*, che specifica il massimo tempo computazionale necessario alla risoluzione di ogni possibile istanza (ovvero il tempo massimo che è necessario spendere nella computazione). Questa funzione potrà essere polinomiale o esponenziale. Nel primo caso il tempo di computazione necessario potrà essere descritto con una *funzione polinomiale* di ordine n^p che dipende dalla lunghezza n dell'input. Nel secondo caso, invece, è necessario ricorrere ad una funzione esponenziale di ordine 2^n .

Note le diverse tipologie di funzioni di complessità è dunque possibile una classificazione della complessità dei problemi in:

- Problemi di classe NP: consistono in tutti i problemi di validità la cui soluzione può essere verificata tramite una funzione di tempo computazionale, polinomiale
 - Problemi di classe P: consistono in tutti i problemi per i quali è nota la funzione di tempo polinomiale.
 - Problemi di classe NPC (NP-complete): sono tutti i problemi per i quali non è nota una funzione di tempo polinomiale. Ognuno di questi problemi è però trasformabile, in un tempo esprimibile con una funzione polinomiale, in un problema NPC equivalente. Il che vuol dire che, nota una funzione di tempo, essa sarà applicabile anche a tutti gli altri problemi di questa classe.
- Problemi NP-hard: sono tali che un algoritmo per risolvere uno di questi problemi può essere convertito in un algoritmo per risolvere un qualunque problema NP. In pratica, questi problemi sono almeno complicati quanto un qualunque problema NP, anche se potrebbero esserlo di più.

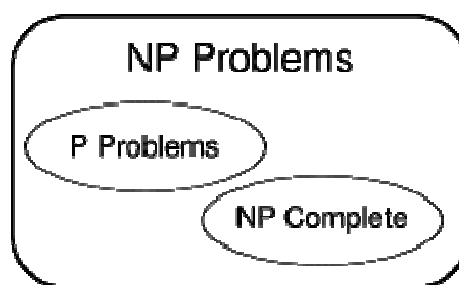


Fig. 5.4 Rappresentazione di problemi NP

Entrando nel merito delle linee mixed-model, il numero totale di permutazioni ottenibili di M modelli con domanda di mercato pari a d_m , può essere calcolato con la formula (McMullen, 2001):

$$\text{Sequenze totali} = \frac{\left(\sum_{m=1}^M d_m \right)!}{\prod_{m=1}^M (d_m!)}$$

Al crescere delle dimensioni del problema, il numero di soluzioni valide cresce in maniera esponenziale e la soluzione ottima non può essere ottenuta in un tempo ragionevole.

Ecco quindi chiarita l'importanza di ridurre il problema ad un caso di single line. Per i metodi di riduzione ed il calcolo dei tempi in particolare per i vari task si rimanda al capitolo 3.

Si definiscono qui delle grandezze per la misura della bontà del bilanciamento eseguito

Gli indici di Line Efficiency e di Smoothness Index relativi per questa soluzione sono

$$T_{sum} = \sum_k \sum_j T_j \cdot X_{j,k} = \sum_k T(S_k)$$

$$T = m \cdot T_c$$

$$E = T_{sum} / T_c$$

$$SX = \sqrt{\left(\sum_k T_c - T(S_k) \right)^2}$$

Entrambi i valori sono buoni considerando che E max=1 e che SX vicino a valori uguali a 4 sono considerati ottimi (School, 1996)

5.3 Analisi della letteratura: obiettivi di bilanciamento

Ogni algoritmo di bilanciamento sviluppato dai diversi autori può essere classificato in base al tipo di funzione obiettivo che deve venire ottimizzata ed in base alla metodologia utilizzata per fare ciò. In particolare vengono analizzate le tipologie di funzioni obiettivo presenti in letteratura.

Il livello di ottimizzazione della funzione obiettivo consente di valutare il valore della soluzione di bilanciamento ottenuta. In alcuni casi viene selezionato più di un obiettivo contemporaneamente.

Gli obiettivi presi in considerazione sono i seguenti:

- Minimizzare il numero di stazioni di lavoro una volta stabilito il livello di output desiderato in un certo orizzonte di pianificazione temporale, specificando il tempo ciclo o il tasso di produzione.
- Minimizzare il tempo ciclo, ovvero massimizzare il tasso di produzione per un certo numero di stazioni.
- Massimizzare l'efficienza della linea in modo tale che le restrizioni sul tasso di produzione e/o sul numero di stazioni siano soddisfatte.
- Minimizzare i costi per un dato livello di output.
- Massimizzare il profitto, definito come differenza tra ricavi e costi, che dipendono dal tasso produttivo e dal tempo ciclo.
- Uniformare/livellare i tempi delle stazioni.

In una linea produttiva mixed-model la variazione tra i tempi all'interno di ogni stazione causata dai diversi modelli deve essere ridotta il più possibile (bilanciamento orizzontale).

I tempi devono anche venire bilanciati su tutte le stazioni della linea (bilanciamento verticale).

- Minimizzare o massimizzare alcuni punteggi dipendenti da uno o più attributi relativi ad aspetti collegati a colli di bottiglia, misure di efficienza, qualità o numero dei semilavorati e cambi di posizione.

Autore	Funzione obiettivo							Metodologia							
	min n stazioni	min t ciclo	max efficienza	min costi	max profitto	uniformare tempi	min o max punteggi	modello lineare	modello non lineare	valore limite	procedura euristica	valore analitico	approccio simulativo	procedimento iterativo	procedura metaeuristica
Aase et al. (2003, 2004)	X							X		X		X	X		
Amen (1997, 2000,2001,2006)				X				X		X	X	X			
Arcus (1966)			X								X				
Askin e Zhou (1997)				X				X		X	X				
Bard (1989)				X								X			
Bartholdi (1993)	X										X				
Bautista e Pereira (2002,2006)	X	X					X	X						X	X
Berger et al. (1992)	X									X		X			

Autore	Funzione obiettivo							Metodologia							
	min n stazioni	min t ciclo	max efficienza	min costi	max profitto	uniformare tempi	min o max punteggi	modello lineare	modello non lineare	valore limite	procedura euristica	valore analitico	approccio simulativo	procedimento iterativo	procedura metaeuristica
Boysen e Flidner (2006)				X	X				X		X	X			X
Bukchin e Rabinowitch (2005)				X				X		X		X			
Bukchin e Tzur (2000)				X				X		X		X			
Bukchin et al. (1997, 2002)							X	X			X			X	
Buxey (1974)							X				X				
Capacho e Pastor (2004)	X							X							
Carnahan et al. (2001)		X					X				X				X
Dar-El e Rabinowitch (1988)				X				X							
Domschke et al. (1996)			X			X						X	X		
Erel e Gokcen (1999)	X							X				X			
Erel et al. (2001, 2005)	X			X							X				X
Hautsch (1972)			X								X				
Johnson (1983)	X									X		X			
Kao (1976, 1979)	X											X			
Karabati e Sayin (2003)							X	X			X				
Kim e Park (1995)	X							X			X	X			
Kim et al. (1972)	X					X									X
Kottas e Lau (1973, 1976, 1981)				X							X				
Lapierre e Ruiz (2004)	X										X				
Lee et al. (2001)							X		X		X				
Leu et al. (1994)							X				X				X
Macaskill (1972)			X						X		X				
Malakooti (1991)				X				X	X		X	X			
Matanachai e Yano (2001)						X					X			X	
Mc Mullen e Frazier (1997, 1998)				X		X	X		X						X
Merengo et al. (1999)	X					X					X			X	
Miltenburg (1998, 2002)	X					X	X		X		X	X			X
Moodie e Young (1965)						X					X				
Nicosia et al. (2002)				X						X		X			
Park et al. (1997)		X									X			X	
Pastor e Corominas (2000)						X		X	X		X				X
Pinto et al. (1975, 1981, 1983)				X				X		X		X			
Raouf e Tsui (1982)	X					X					X				
Reeve e Thomas (1973)						X					X				

“scappare” dagli ottimi locali. Una volta che sia stata effettuata una mossa peggiorante, bisogna evitare di tornare alla mossa di partenza (nonostante questa sia migliorante), in quanto questo creerebbe un loop infinito. Risulta quindi indispensabile predisporre delle tecniche che evitino di incorrere in cicli.

Le tecniche meta-euristiche costituiscono dei paradigmi algoritmici generali che devono essere particolarizzati per i singoli problemi. Spesso i corrispondenti algoritmi non sono estremamente competitivi rispetto ad algoritmi sviluppati ad hoc per il problema, nel senso che le soluzioni prodotte sono paragonabili in termini di valore della soluzione ma i tempi di calcolo richiesti possono essere molto più elevati. In compenso, i tempi di sviluppo e di implementazione di un algoritmo meta-euristico di base sono molto inferiori rispetto ad una tecnica ad hoc. La fase critica nello sviluppo di questi algoritmi finisce spesso per essere la taratura di una serie di parametri che compaiono nell’algoritmo stesso.

Per i metodi euristici invece si sceglie iterativamente una nuova soluzione tentando di ridurre il valore della funzione (o delle funzioni) obiettivo muovendosi all’interno della regione ammissibile. Il vantaggio principale di questo tipo di approccio è la maggior velocità con la quale si raggiunge una soluzione, sia per il minor numero di iterazioni necessarie sia per la maggior semplicità delle operazioni eseguite. Altri metodi sono gli algoritmi genetici, applicati anche su supporto SW. Un primo tentativo è stato fatto dall’azienda produttrice di software “Optimal Design” (www.optimaldesign.com), è stato creato il MS Windows software “Optiline”. Tale software, basandosi su algoritmi genetici combina i dati in input in modo di ottimizzare automaticamente degli obiettivi. Le varie metodologie in linea generale saranno riprese ed approfondite nel capitolo relativo al Sequencing.

5.4 Fattori di influenza sul bilanciamento: approfondimento su layout e tempi delle operazioni

5.4.1 Layout

Dal punto di vista del layout gli studi sul bilanciamento delle linee di assemblaggio possono essere distinti in due categorie, quelli riferiti al bilanciamento delle linee seriali e quelli sul bilanciamento delle linee ad U. Le linee ad U come emerso da vari studi permettono una più efficace flessibilità nell’assegnazione dei compiti e un più efficiente bilanciamento.

Per quanto riguarda i problemi di bilanciamento delle linee ad U, la letteratura al riguardo sta crescendo soprattutto negli ultimi anni

Come i problemi di bilanciamento tradizionali, il bilanciamento delle linee ad U è di tipo NP-hard. Se ci sono m compiti e r costrizioni di ordine ci sono $\frac{m!}{2^r}$ possibili soluzioni. Con un così

ampio spazio di ricerca, è impossibile trovare la soluzione ottimale utilizzando un algoritmo di tipo deterministico. Pertanto in letteratura si trovano molte procedure euristiche volte a risolvere i problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio. In questi tipi di problemi, il tempo di calcolo per trovare la soluzione ottimale cresce esponenzialmente con la dimensione del problema. Questa complessa natura matematica del problema rende difficile risolverlo in modo ottimale.

SULB (simple U-line Balancing problem), sono stati esaminati per la prima volta da Miltenburg e Winjngaard, nei loro studi, si evidenziano le differenze fondamentali fra i tradizionali problemi di bilanciamento delle linee seriali e quelli delle linee ad U. Nel bilanciamento delle linee seriali, i compiti da assegnare sono scelti fra gruppo di compiti, i cui predecessori sono già stati assegnati e sono destinati alle varie stazioni. Mentre nel bilanciamento delle linee ad U il gruppo di compiti che può venir assegnato è dato dall'unione dei compiti i cui predecessori e successori sono già stati assegnati. I compiti sono scelti da tali gruppi per formare le stazioni. Inoltre, questi autori introdussero e cercarono di modellare i problemi di bilanciamento delle linee ad U sotto l'ipotesi di tempi di ciclo deterministici. Proposero un modello di programmazione lineare che prevedeva di trovare la soluzione ottimale per problemi di piccola dimensione (fino a 11 compiti) e svilupparono anche delle procedure euristiche per trovare il buon bilanciamento per problemi di grandi dimensioni.

Urban, negli anni seguenti, propose un modello di programmazione lineare intera, con il quale cercò di scoprire una soluzione ottimale al bilanciamento di tipo I ai problemi fino a 45 compiti con un software disponibile commercialmente.

Sparling e Miltenburg, nei loro studi illustrarono che le differenze che si possono riscontrare tra le linee seriali e quelle ad U, sono più evidenti nelle produzioni mixed-model rispetto a quelle single model.

Tali tipi di problemi, non sono altro che un caso particolare dei problemi SMULBP (Single-model U-lines balancing problem) che a loro volta sono un tipo particolare dei problemi MMULB (Mixed-Model U-lines balancing problem). Quindi MMULB sono di natura NP-difficile ed è necessario avere a disposizione un algoritmo che dia una soluzione approssimata per risolvere i problemi che si incontrano nella realtà. Gli autori presentano un algoritmo in quattro fasi. Le prime due fasi, permettono di trasformare i problemi di tipo multi-model in un equivalente problema di tipo single –model. La terza fase permette di ottenere un ottimo bilanciamento a tale problema utilizzando l'algoritmo branch-bound. Infine, la quarta fase, permette di aggiustare il bilanciamento ricavato dalle fasi precedenti, in modo da trovare una soluzione adeguata al problema originale di tipo multi-model.

Nel 1998, Ajemblit e Wainwright, proposero un algoritmo genetico per risolvere i problemi di tipo I per le linee ad U di grandi dimensioni. Uno dei maggiori pregi di tale ricerca, è che

provvede a dare un'ossatura globale che può essere usata per dare due possibili variazioni al problema: minimizzare il tempo totale inattivo, o bilanciare il carico di lavoro fra le stazioni, o entrambi. I risultati dimostrano che tale algoritmo è una tecnica di risoluzione eccellente del problema, inoltre in alcuni casi standard riportati dalla letteratura, si dimostra che l'algoritmo ottiene risultati migliori rispetto alle tecniche sviluppate fino a quel momento.

School and Klein, svilupparono invece una procedura di tipo branch-bound, che si rivelò efficace nel risolvere problemi sia ottimali sia sub-ottimali con al massimo 297 compiti.

Miltenburg, parte dalla constatazione che una produzione non può continuare con lo stesso output per sempre. Quindi, quando l'output richiesto cambia, la linea deve essere ribilanciata. Il ribilanciamento consiste nell'aggiungere operatori nella linea quando si vuole aumentare la percentuale di produzione, e toglierli nel caso contrario.

L'articolo di Gokcen e Agpak presenta un modello di programmazione lineare per bilanciare le linee ad U semplici. Il modello sviluppato si basa sul modello di programmazione intera sviluppato da Urban per bilanciare le linee ad U e lo scopo è ricavato da Decoro e Rangachari, sviluppato per i tradizionali problemi di bilanciamento delle linee single model. Il modello sviluppato da questi due autori è stato il primo che forniva una decisione multi criterio sulle linee ad U. Lo scopo del programma era quello di sembrare il più possibile uno strumento di modellazione naturale e un più realistico approccio ai problemi di bilanciamento delle linee ad U. Questo è confermato dal fatto che lo scopo del programma è quello di giungere ad una soluzione soddisfacente piuttosto che ottimale a causa degli obiettivi conflittuali. Il modello proposto aumenta la flessibilità di chi prende le decisioni quando si valutano differenti alternative

Urban e Chiang, si rendono conto che, mentre le ricerche precedenti potevano essere utilizzate per analizzare le performance delle linee ad U sotto l'ipotesi di tempi di ciclo stocastici, nessuna si era ancora concentrata sul bilanciamento delle linee ad U. Infatti come avevano notato Miltenburg e Wijngaard alla fine delle loro ricerche, serviva sviluppare un modello probabilistico per il bilanciamento di tali linee.

Quindi lo scopo delle loro ricerche era quello di ricercare una procedura per trovare la soluzione ottimale ai problemi di bilanciamento di tali linee con tempi di ciclo stocastici.

Partendo dall'assunto di Miltenburg che affermava che solitamente le linee ad U sono abbastanza piccole, infatti delle 114 linee che aveva esaminato, il numero medio di compiti era 10.2 e il numero medio di stazioni 3.4; volevano sviluppare un modello che gli permettesse di ottenere un ottimo bilanciamento per problemi di tali dimensioni con software disponibili commercialmente, e che potessero essere facilmente modificati in modo da tener conto della varietà presente nelle situazioni reali.

Il problema di bilanciamento delle linee ad U formulato da tali autori era ottenuto integrando i modelli delle linee seriali con tempi di ciclo stocastici e i modelli delle linee con tempi di ciclo deterministici. Aase (2001), cercò di determinare il livello di miglioramento nella produttività, quando si passa da una linea seriale ad una linea ad U. I risultati confermano che il layout a U porta in media ad un aumento della produttività rispetto a quello in serie, ciò che sorprende è che tali risultati non accadono nella maggioranza dei casi. Ciò deve portare ad una maggior cautela nel passaggio alle linee ad U, in quanto non è detto che queste portino ad un aumento automatico dell'efficienza

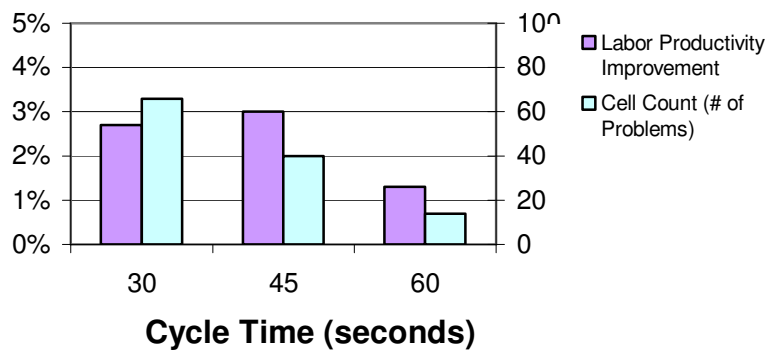
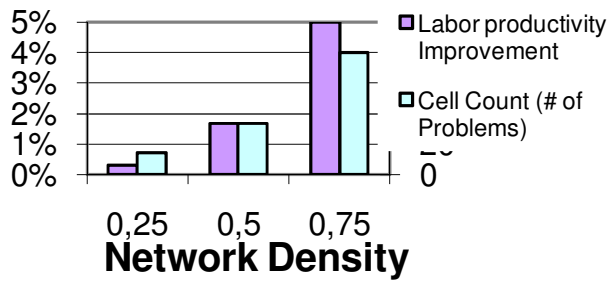
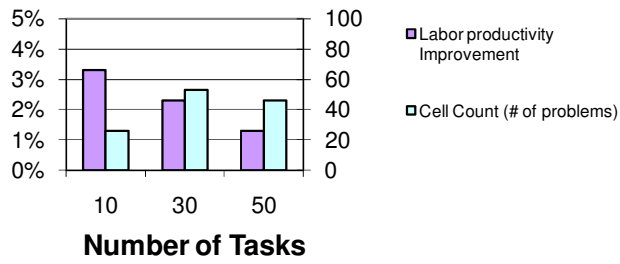


Fig. 5.6 Opportunità principali per migliorare la produttività (Aase et all. 2004)

Il risultato più interessante della ricerca, riguarda la grandezza del problema (numero di stazioni). La precedente tabella mostra che i problemi di più piccola dimensione producono

una aumento della produttività maggiore rispetto ai problemi di più grande dimensione. I programmatori della linea, che sono costretti a ridurre la dimensione del problema, ad esempio attraverso la modularizzazione dei componenti, possono ottenere migliori risultati passando alla linea ad U rispetto alla situazione originaria.

Inoltre i risultati indicano che ci sono più opportunità nell'aumento della produttività, quando c'è una maggiore network density (0.75), ovvero una misura sostitutiva della forza della relazione di precedenza fra tutti i compiti richiesti per completare una unità di prodotto finito; e un minore tempo di ciclo minore.

Nel 2005, Baykasoglu e Ozbakir, proposero un algoritmo genetico, volto a bilanciare le linee ad U sotto l'ipotesi di tempi di ciclo stocastici. Tale algoritmo ha lo scopo di trovare la soluzione ottimale in un tempo di calcolo più rapido.

Nel 1995, Miltenburg propose il primo studio sui problemi di bilanciamento delle *U-line facility*. Propose un algoritmo di programmazione dinamica volto a determinare un bilanciamento ottimale. La U-line facility non è altro che una linea ad U composta da molte linee ad U connesse da stazioni multi linee. Gli obiettivi della procedura erano quelli di assegnare i compiti ad un numero minimo di stazioni, soddisfacendo il tempo di ciclo, le relazioni di precedenza e gli spazi. Inoltre si voleva concentrare il tempo inattivo in una stazione. Si riscontrarono buoni risultati per U-line facility con un numero vario di linee ad U, tuttavia quest'ultime non dovevano presentare un numero di compiti maggiori a 22.

Nel corso degli anni sono state sviluppate poche procedure volte a bilanciare il *layout a tavola rotante*. Il primo studio al riguardo è stato condotto da Battini et al. nel 2006. Secondo questi autori è importante effettuare un bilanciamento di tale tipo di layout, in quanto si ritrova molto spesso in molti ambienti industriali come una alternativa efficiente al layout a postazione fissa e al job-shop, inoltre grazie ad una notevole ripetitività dei compiti permette di diminuire la monotonia e la noia degli operatori.

La procedura utilizzata è di tipo euristico, ed intende minimizzare il tempo medio di ciclo del prodotto che deve essere assemblato. In particolare gli autori si interessano del bilanciamento delle linee di assemblaggio di tipo mixed-model. Il metodo sviluppato, come evidenziato dai risultati ottenuti permette la riduzione del tempo di ciclo.

Per quanto riguarda le *linee seriali*, nel 2001 il gruppo di ricerca capitanato da Rekiek et al. sviluppò un algoritmo genetico che permette di risolvere problemi di tipo multi obiettivo. Lo scopo del lavoro è quello di assegnare i compiti di assemblaggio alle varie

stazioni e selezionare le attrezzature che permettono di eseguirli. Il metodo proposto è chiaramente uno strumento per supportare il processo di progettazione, e in nessun caso secondo gli autori deve andare a sostituire l'intelligenza e la creatività dei progettisti.

L'anno seguente Bukchin et al, si occuparono delle linee di assemblaggio di tipo mixed-model. Il modello proposto assume di lavorare con una politica di produzione di tipo ATO. Quindi, la procedura di bilanciamento diventa l'aspetto di maggior importanza nella progettazioni di tali processi.

I moderni sistemi di assemblaggio sono basati su delle linee corte. Venne sviluppata una procedura euristica volta a minimizzare il numero delle stazioni per un determinato tempo di ciclo. Il metodo proposto è costituito da tre fasi:

1. Bilanciamento del diagramma di precedenza.
2. Bilanciamento di ogni modello separatamente, in accordo con le relazioni di precedenza precedentemente sviluppate.
3. procedura migliorativa che utilizza determinate misure di performance in modo da comparare le soluzioni.

Bartholdi è stato il primo ad occuparsi del bilanciamento delle *linee di assemblaggio a due lati*. L'obiettivo fondamentale della sua ricerca, è stato quello di progettare e usare un programma iterativo che aiutasse i manager ad assegnare i compiti, e definisse le regole per trovare velocemente una soluzione.

Kim (1999), sviluppò un modello matematico per i problemi di bilanciamento delle linee a due lati con vari obiettivi, come minimizzare la lunghezza della linea, il numero di stazioni e le variazioni nei carichi di lavoro.

Lee et al. (2000), invece svilupparono una procedura euristica, introducendo come criteri decisionali il rapporto di lavoro e la lentezza delle operazioni. Questi due obiettivi molto spesso entrano in conflitto con i tradizionali criteri decisionali, quali il numero di stazioni ed il tempo di ciclo.

Dai risultati emerge che tale metodologia comporta un effettivo miglioramento nel rapporto di lavoro e nella lentezza delle operazioni, con piccola o nessuna perdita nel tempo di ciclo e nel numero di stazioni.

Per quanto riguarda il bilanciamento delle *linee in serie con stazioni di lavoro in parallelo* e le *linee in parallelo*, nel 1997 McMullen e Frazier, condussero una ricerca sui problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio con un numero determinato di stazioni e un'alta percentuale di produzione. Lo scopo era quello di ridurre il tempo di ciclo. Svilupparono una procedura euristica volta a bilanciare le linee di assemblaggio di tipo mixed-model e sotto

l'ipotesi di tempi di ciclo stocastici. La ricerca condotta, modificava i lavori precedenti e incorporava nuove regole di selezione a quelle esistenti, in modo da assegnare i compiti ai vari centri di lavoro.

Askin e Zhou, nello stesso anno affermarono che la costruzione di stazioni in parallelo offre un modo per migliorare l'utilizzazione delle risorse nel sistema di produzione in serie, dove è difficile trovare un giusto bilanciamento della linea senza avere un significativo tempo inattivo. Loro utilizzarono una procedura euristica per trovare una soluzione fattibile dal punto di vista del bilanciamento e in poco tempo.

La procedura euristica permette ad una stazione di essere resa parallela. La decisione di rendere parallela una stazione non deve essere basata solo sul tempo dei compiti, ma anche sul confronto fra l'aumento dei costi delle attrezzature e degli strumenti e il costo di non utilizzo della capacità disponibile delle stazioni. Si dimostra che la procedura euristica risponde bene alle implicazioni economiche dei costi degli strumenti e delle attrezzature e al tempo inattivo degli operatori. La procedura euristica permette di trovare buone soluzioni per problemi di grande dimensione in breve tempo.

Nel 2004, Simaria e Vilarinho, tramite la loro procedura di bilanciamento cercarono di massimizzare la percentuale di produzione di una linea di assemblaggio con un numero predeterminato di operatori. Tale problema si riscontra quando le linee esistono già, e si cerca di effettuare un ri-bilanciamento a seguito di cambi produttivi o di cambi nelle strategie di produzione.

I due autori presentarono un modello di programmazione matematica. Oltre all'obiettivo di minimizzare il tempo di ciclo, il modello permette di bilanciare il carico di lavoro fra le stazioni.

		TIPOLOGIA DI LAYOUT CONSIDERATA								
		LINEA DRITTA	LINEA DRITTA CON STAZIONI IN SERIE	LINEA DRITTA CON STAZIONI IN PARALLELO	LINEE IN PARALLELO	LINEE A DUE LATI	LINEE AD U	POSTAZIONE FISSA	TAVOLA ROTANTE	
PUBBLICAZIONE	ANNO									METODOLOGIA
J.F. Bard	1989			X						Algoritmo di programmazione dinamica
J.A.Buzacott	1990			X						Modello teorico
J.J. Bartholdi	1993					X				Procedura euristica
J.Miltenburg and Winjngaard	1994						X			Modello di programmazione lineare
R.R. Imman and M. Leon	1994		X							Modello di Simulazione
J.Miltenburg	1995						X			Algoritmo di programmazione dinamica
T.Engstrom et al.	1996				X					Letteratura e caso studio
R. Kadefors et al.	1996				X					Letteratura e caso studio
J.I. Van Zante-de F.and T.G. de Kok	1997	X								Procedura euristica di comparazione
P.R.Mcmullen and G.V.Frazier	1997			X	X					Procedura euristica
J.Miltenburg and D.Sparling	1997						X			
R.G. Askin and M.Zhou	1997			X						Procedura euristica
H.Gokcen and E.Erel	1997	X								Modello di programmazione lineare
T.L.Urban	1998						X			Modello di programmazione lineare
D.Sparling and J.Miltenburg	1998						X			Modello di programmazione lineare
G.A. Suer	1998			X	X					Modello di programmazione lineare
D.A. Ajenblit and R.L. Wainwright	1998						X			Algoritmo genetico
B.R. Sarker and H.Pan	1998	X								Modello di programmazione lineare
P.R.Mcmullen	1998							X		Procedura euristica
A.Scholl and R. Klein	1999						X			Algoritmo Branch and Bound
Y.K.Kim et al.	1999					X				Modello matematico
E.Erel and H.Gokcen	1999	X								Shortes route model
Y.K.Kim and Y.Kim	2000					X				Algoritmo genetico
J.Miltenburg	2000						X			Survey e casi studio
T.O. Lee at al.	2001					X				Procedura euristica
G.Heike et al.	2001							X		Modello di Simulazione
B.Rakiek et al.	2001	X								Algoritmo genetico
B.R. Sarker and H.Pan	2001	X								Modello di programmazione lineare
B.R. Sarker and H.Pan	2001	X								Modello di programmazione lineare
G.R.Aase et al.	2001						X			Analisi statistica
P.M.Vilarinho and A.S.Simara	2002			X						Procedura euristica
J.Bukchin et al.	2002	X								Procedura euristica
K.Kurashige et al.	2002	X								Modello di Simulazione
M.Jin and S.D. Wu	2002	X								Procedura euristica
L.F. Munoz and J.R. Villalobos	2002	X								Modello di Simulazione
S.Karabat and S.Saying	2003	X								Procedura euristica
N.Van Hop	2004	X								Fuzzy linear model
H.Gokcen and K.Agpak	2004						X			Modello di programmazione lineare
T.L.Urban and W.C. Chiang	2004						X			Modello di programmazione lineare
W.C.Chiang and T.L.Urban	2004						X			Procedura euristica
Y.K. Kim et al.	2004						X			Algoritmo genetico
A.S.Simara and P.M.Vilarinho	2004			X						Algoritmo genetico
Y. Bukchin and I.Rabinowitch	2005	X								Algoritmo Branch and Bound
A.BayKasoglu and L.Ozbakir	2005						X			Algoritmo genetico
C.Beker and A.Scholl	2006	X	X	X	X	X	X	X	X	Survey e casi studio
D.Battini et al.	2006								X	Procedura euristica

Figura 5.7 Confronto sulle varie tipologie di layout

Caso applicativo di bilanciamento di linea mixed model con layout particolare: Tavola rotante

Nel corso degli anni non sono stati condotti studi sul bilanciamento del layout a tavola rotante.

Il primo lavoro in questa direzione, è stato svolto da Battini et al. nel 2006.

Si tratta di una procedura euristica volta a minimizzare il tempo medio di ciclo, per un determinato numero di stazioni di lavoro. Questo è possibile quando le operazioni sono sia manuali sia automatizzate, il volume di produzione molto basso, tempi di set-up rilevanti, prodotti mediamente complessi e ciclo di assemblaggio lungo con molte attività.

Nello studio condotto da questi ricercatori, si considerano sistemi di assemblaggio di tipo mixed-model.

Le *assunzioni* alla base di tale procedura sono:

1. tavola rotante multi-giro;
2. i grafici che mostrano le relazioni di precedenza dei vari modelli, possono essere riassunti in un singolo diagramma di precedenza;
3. la politica di produzione è di tipo ATO;
4. assemblaggio a posto fisso con l'operatore che assembla l'intero prodotto (un pezzo per volta);
5. ogni stazione è occupata o da un operatore o da una macchina;
6. gli operatori inattivi non possono aiutare gli operatori nelle altre stazioni;
7. la tavola gira, solo quando è stato terminato il lavoro in tutte le stazioni aperte;
8. la prima operazione, che consiste nel caricamento di tutti i pezzi da lavorare dello stesso lotto nella tavola, è assegnata al primo operatore;
9. l'ultima operazione consiste nello scaricamento delle unità assemblate dalla tavola;
10. ogni compito automatizzato viene svolto da una specifica macchina.

Gli *obiettivi* della ricerca sono:

1. ottimizzare il bilanciamento del carico di ogni stazione attivata della tavola;
2. ottimizzare il posizionamento delle risorse e il tempo medio di ciclo.

Dati in input:

O Insieme dei compiti svolti da operatori umani

A Insieme dei compiti svolti da macchine

G Grafico delle precedenze

m Numero di stazioni

t_j Tempo necessario a svolgere il compito j

t_{\max} Massimo tempo del compito

Dati in output:

Z Numero di giri che la tavola deve compiere

S_{kz} Caricamento della stazione durante il giro z

$T(S_{kz})$ Tempo impiegato nella stazione k durante il giro z

c Tempo di ciclo

Il metodo consiste nella identificazione di tre *categorie di compiti*:

AT Compiti disponibili: un compito j può essere assegnato ed eseguito quando tutte le operazioni precedenti sono state completate;

PT Compiti preferibili: un compito disponibile j diventa preferibile quando può essere assegnato ad una risorsa con il conseguente incremento del caricamento delle stazioni caricate, con un valore del saving maggiore del cost;

CT Compiti critici: un compito libero j diventa critico quando ha un numero maggiore di compiti successivi o in caso di equità quando t_j è massimo;

Parametri decisionali:

SAVING: rappresenta la chiusura avanzata del ciclo di assemblaggio quando il compito j è assegnato all'operatore corrente anziché al successivo.

COST: rappresenta il ritardo della tavola quando il compito j è assegnato all'operatore corrente. Tale categoria di compiti è presa in considerazione solo quando una stazione è ancora vuota.

Al tempo generico t , la velocità di avanzamento della tavola è limitata superiormente dall'operazione con tempo di carico maggiore. Il tempo inattivo delle altre risorse attivate, dipende dal gap tra il tempo di caricamento maggiore e dal loro tempo di caricamento.

Ad una risorsa umana attivata (quando è ancora vuota), è inizialmente assegnata l'attività critica CT, selezionata dalla lista delle attività disponibili. Un limite superiore alle ulteriori assegnazioni, deve essere fissato in modo da non sovraccaricare l'operatore corrente. Questo limite è definito come il tempo massimo di compito per la prima risorsa attivata, mentre per le successive risorse attivate è considerato essere il tempo di carico di un operatore con il maggior tempo di caricamento. Dopo che la lista AT è riempita, l'ulteriore assegnazione di compiti all'operatore corrente deve essere verificata.

A questo proposito, il modello calcola i due parametri SAVING and COST per ogni operazione della lista AT e lo esprime come una porzione del tempo di ciclo.

Quindi conviene definire la lista di attività preferibili, la quale include tutti i compiti disponibili che possono essere assegnati ad un operatore con $SAVING > COST$.

$$SAVING(\lambda) = \frac{(t_\lambda + t_s) \cdot Y}{m}$$

Dove:

λ : è il generico compito che appartiene alla lista AT

Per valutare il parametro COST deve essere considerato il ritardo della tavola quando l'attività λ scelta dalla lista AT, è assegnata all'operatore corrente Op_c . Possono capitare tre casi:

il tempo di ciclo è condizionato dal caricamento della risorsa più lenta Op_{max}

$$\text{Se } t(S'op_c) \leq t(Sop_{max})$$

$$COST(\lambda) = \frac{t_\lambda \cdot X}{m}$$

l'operatore corrente diventa il più lento della tavola

$$\text{Se } t(S'op_c) > t(Sop_{max}) \quad \text{e} \quad t_\lambda > [t(S'op_c) - t(Sop_{max})]$$

$$COST(\lambda) = \frac{\sum_{k:t(S_k) > t(Sop_c)} \{ [t(S'op_c) - t(S_k)] \cdot X_k \}}{m} + \frac{t_\lambda \cdot X}{m}$$

l'operatore corrente rappresenta la risorsa più lenta della tavola e le ulteriori assegnazioni di compiti causano un ritardo alla tavola pari al tempo di operazione.

$$\text{Se } t(S'op_c) > t(Sop_{\max}) \quad \text{e } t_\lambda < [t(S'op_c) - t(Sop_{\max})]$$

$$COST(\lambda) = t_\lambda$$

I compiti disponibili con $SAVING > COST$ sono incluse nella lista PT e da queste sono scelte le operazioni con il valore di $SAVING$ maggiore. Quando la lista PT è vuota nessuna ulteriore attività è assegnata all'operatore corrente e l'operatore successivo viene attivato.

Quando la lista AT include solo le attività svolte dalle macchine ognuna di esse viene assegnata direttamente alla macchina senza ulteriori considerazioni.

Quando le attività che riguardano lo scaricamento della tavola vengono assegnate, il ciclo si conclude e si può calcolare il tempo medio di ciclo.

$$c = \frac{\sum_{z=1}^Z \sum_{k:k \in AS_z} \{\max[t(S_k)]_z + t_s\} \cdot X_k}{m}$$

Dove:

AS_z è il gruppo di compiti attivato durante il giro z

$z = 1, \dots, Z$ sono i giri della tavola

X_k è la distanza tra la stazione caricata maggiormente e le altre stazioni attivate in un giro z

Cambiando la disposizione delle risorse presenti nella tavola le loro reciproche distanze cambieranno di una distanza X . Quindi è possibile ottenere diverse configurazioni a cui corrispondono diversi valori di c . Valutando tutte le varie configurazioni, è possibile trovare la soluzione migliore con minimo tempo di ciclo. Quindi la procedura euristica descritta è di tipo iterativo, che permette di trovare differenti tempi di ciclo e scegliere infine la tipologia di layout che minimizza tale valore.

Esempio numerico di applicazione della procedura euristica volta a bilanciare la tavola rotante.

Il seguente esempio, tratto sempre dall'articolo di Battini et al. del 2006, permette una comprensione immediata della procedura euristica appena sviluppata. L'esempio tratta la condizione di una tavola rotante

con sei diverse stazioni, con due operatori umani (la presenza delle macchine è tralasciata per non complicare il bilanciamento). Il tempo di switch della tavola è pari a $t_s = 2$ s.

Come dati vengono inoltre forniti i vari compiti, il loro tempo di esecuzione e le relazioni di precedenza.

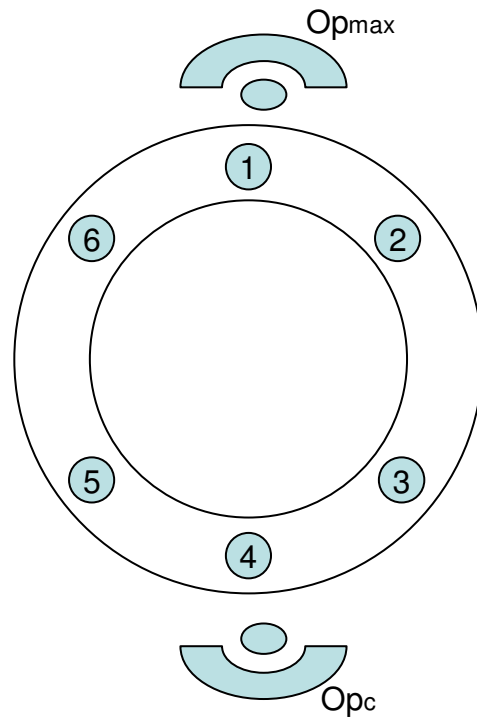


Fig. 5.8 Tavola rotante a sei stazioni

Compito	Successori	Tempo[s]
1	2,3,4,5,6,7,8	18
2	8	13
3	7,8	6
4	5,6,8	9
5	6,8	7
6	8	14
7	8	11
8	—	2

Fig. 5.9 Tabella dei tempi dei compiti e compiti successivi

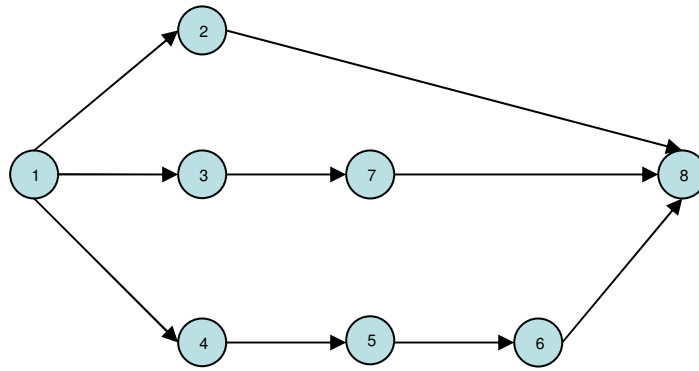


Fig.5.10 Diagramma di precedenza

La Tabella seguente, riassume i calcoli svolti per effettuare il carico delle stazioni. Le formule utilizzate sono quelle riportate precedentemente, nella descrizione della procedura. I tre casi tenuti in considerazione per calcolare il valore del parametro COST, sono evidenziati nella legenda.

Giro z	Risorsa	Assegnazione	Lista AT	Cost	Saving	Lista PT	Lista CT	Commenti
1	Op 1	—	1[18]	—	—	—	1	Carico
		1[18]	2[13]	13	7,5	—	—	Cost>Saving
			3[6]	6	4	—	—	Cost>Saving
			4[9]	9	5,5	—	—	Cost>Saving
	Op 2	—	2[13]	—	—	—	—	—
			3[6]	—	—	—	—	—
			4[9]	—	—	—	4	Carico
		4[9]	2[13]	8,5	7,5	—	—	Cost>Saving
			3[6]	3	4	3	—	Cost<Saving
			5[7]	3,5	4,5	5	—	Cost<Saving S5>S3
		4,5[16]	2[13]	12	7,5	—	—	Cost>Saving
			3[6]	8,5	4	—	—	Cost>Saving
			6[14]	13	8	—	—	Cost>Saving
2	Op 1	—	2[13]	—	—	—	—	—
			3[6]	—	—	—	3	Carico
			6[14]	—	—	—	—	—
		3[6]	2[13]	8	7,5	—	—	Cost>Saving
			6[14]	9	8	—	—	Cost>Saving
			7[11]	6	6,5	7	—	Cost<Saving
		3,7[17]	2[13]	13	7,5	—	—	Cost>Saving
			6[14]	14	8	—	—	Cost>Saving
	Op 2	—	2[13]	—	—	—	—	—
		—	6[14]	—	—	—	6	Carico
		6[14]	2[13]	11,5	7,5	—	—	Cost>Saving
3	Op 1	—	2[13]	—	—	—	2	—
		2[13]	8[2]	1,5	2	8	—	Cost<Saving
		2,8[15]	—	—	—	—	—	Scarico

Fig. 5.11 Applicazione della procedura euristica

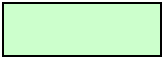
$$t(S'op_c) > t(Sop_{max}) \text{ e } t_\lambda < [t(S'op_c) - t(Sop_{max})]$$

$$COST(\lambda) = t_\lambda$$



$$t(S'op_c) > t(Sop_{max}) \text{ e } t_\lambda > [t(S'op_c) - t(Sop_{max})]$$

$$COST(\lambda) = \frac{\sum_{k:t(S_k) > (Sop_c)} \{ [t(S'op_c) - t(S_k)] \cdot X_k \}}{m} + \frac{t_\lambda \cdot X}{m}$$



$$t(S'op_c) \leq t(Sop_{max}) \quad COST(\lambda) = \frac{t_\lambda \cdot X}{m}$$

Ora si può calcolare il tempo di ciclo, utilizzando la seguente formula:

$$c = \frac{\sum_{t=1}^Z \sum_{k:k \in AS_z} \{ \max[t(S_k)]_z + t_s \} \cdot X_k}{m}$$

$$c = \frac{(18+2)*3 + (18+2)*3 + (17+2)*3 + (17+2)*3 + (15+2)*3 + (15+2)*3}{6} = 56s$$

5.4.2 Variabilità dei tempi sui task delle operazioni

In questo paragrafo vengono esaminate le relazioni tra funzioni obiettivo e variabilità. In particolare al mix produttivo per linee di assemblaggio mixed model, e studiate metodologie innovative di sensibilità al fine di determinare al variare dell'obiettivo, il miglior obiettivo da utilizzare ed il miglior modo di determinazione del task time per l'average model, utilizzando le metodologie già introdotte nel capitolo 3. Verranno qui utilizzate le seguenti notazioni:

M Numero di modelli, $m=1, \dots, M$

D Totale domanda per il periodo

d_m Domanda per il modello m nel periodo

J Numero di task, $j=1, \dots, J$

c Tempo ciclo

t_{jm} Tempo per task j per il modello m

σ_{jm} Deviazione standard per task j e modello m

τ_{mk} Tempo totale per modello m nella stazione k , $\tau_{mk} = \sum_{j \in Station k} t_{jm}$

τ'_k Tempo totale nella stazione k , $\tau'_k = \sum_m \tau_{mk}$

\bar{t}_m Tempo medio per stazione sul modello m $\bar{t}_m = \sum_k \tau_{mk} / k$

t_j Task time per task j per virtual average model

σ_j Deviazione standard per task j per virtual average model

In questo caso vengono studiati le seguenti funzioni obiettivo:

Thomopolous (1970) propone la seguente funzione obiettivo che minimizza la somma delle differenze assolute tra il tempo medio della stazione e il tempo totale di lavorazione di tutti (1).

$$\text{Min } O.F.1 = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |\tau_{mk} - t_m| \quad (1)$$

Link (1992) introduce la seguente funzione che minimizza la massima deviazione del tempo di attività di ogni modello dal il tempo medio della stazione per unità (2).

$$\text{Min } O.F.2 = \max \{ |\tau_{mk} - t_m| \} \text{ with } k=1, \dots, K \text{ and } m=1, \dots, M \quad (2)$$

Klein (1993) definisce questa semplice funzione obiettivo che minimizza la somma delle violazioni del tempo ciclo di tutti i modelli in tutte le stazioni (3).

$$\text{Min } O.F.3 = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \max \{ 0, \tau_{mk} - c \} \quad (3)$$

Macaskill (1972) minimizzazione l' idle time totale (4).

$$\text{Min } O.F.4 = \frac{K \cdot c}{K \cdot c - \sum_k \sum_m \tau_{mk}} \quad (4)$$

Un altro approccio studiato è quello di minimizzare I numero delle stazioni (5).

$$\text{Min } O.F.5 = K \min = \frac{\sum_m \sum_j t_{jm}}{c} \quad (5)$$

L'ultimo obiettivo studiato è quello si livellare il carico tra le stazioni minimizzando le differenze in valore assoluto tra task time e tempo medio, che si avrebbe se il carico fosse perfettamente distribuito tra le stazioni(6).

$$\text{Min } O.F.6 = \sum_k \left| \tau'_k - \frac{\sum_m \sum \tau_{mk}}{K} \right| \quad (6)$$

La metodologia è composta da cinque passaggi fondamentali:

- 1) Costruzione del diagramma combinato delle precedenze tecnologiche (viene adottato il metodo binario)
- 2) Assegnazione dei tempi di esecuzione delle varie attività j per il prodotto rappresentativo con l'utilizzazione dei metodi precedentemente viste.
- 3) Dimensionamento della linea di assemblaggio considerando il prodotto rappresentativo del mix e quindi usando una metodologia per linee di tipo single model (in questo caso è stato usato il modello di Kottas Lau)
- 4) Analisi di sensitività: dopo aver dimensionato la linea (apertura di un numero K di stazioni e assegnazione ad ognuna di queste di un alcune attività) usando il prodotto caratteristico, si considera l'effettiva assegnazione per il caso mixed-model. A questo punto si ha una linea con M prodotti diversi, ognuno dei quali richiede l'esecuzione di tutte le attività j (se una attività j non è richiesta per assemblare il prodotto m , il tempo t_{jm} di esecuzione dell'attività j sul prodotto m è zero), per questa linea si possono calcolare i valori delle funzioni obiettivo elencate precedentemente.
- 5) Replicando i punti 2, 3 e 4 assegnando i tempi di esecuzione con i vari metodi proposti precedentemente si arriverà a una serie di valori per ognuna delle funzioni obiettivo in base al metodo usato per calcolare i tempi. A questo punto si è davanti a un problema di due dimensioni: metodo di peso dei tempi, tipo di funzione obiettivo. Valutando quale metodo usato per calcolare i tempi, ottimizza il raggiungimento di determinate funzioni obiettivo si potrà usare il lavoro fatto per scegliere uno o l'altro modo di calcolare i tempi, in base a quale o quali funzioni obiettivo si desiderano massimizzare nel caso da analizzare. Nella nostra analisi, non avendo una linea reale da ottimizzare, il punto 5 corrisponderà alle osservazioni sui risultati ottenuti e quindi alle conclusioni che si possono trarre dal lavoro svolto.

Nell'esempio riportato il tempo ciclo vale 72 min, il costo di manodopera in linea è 30 €/h mentre fuori di 50 €/h

Esempio numerico di applicazione della metodologia di determinazione del calcolo dei tempi per il virtual average model rispetto alla funzione obiettivo

Step 1

Per la costruzione del diagramma combinato delle precedenze tecnologiche è stato adottato il metodo binario in quanto facilmente automatizzabile con un foglio di calcolo elettronico. Si riportano di seguito come esempio i vari diagrammi delle precedenze e il foglio elettronico.

		Task														
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>mix</i>
Modello	<i>1</i>	3	1	4	2	2	5	6	6	2	3	2	5	4	3	3
	<i>2</i>	2	5	2	4	2	5	3	0	4	3	2	6	2	3	2
	<i>3</i>	3	5	4	3	4	2	6	3	5	3	3	0	3	4	1

Fig. 5.12 Task time per ciascun modello (min)

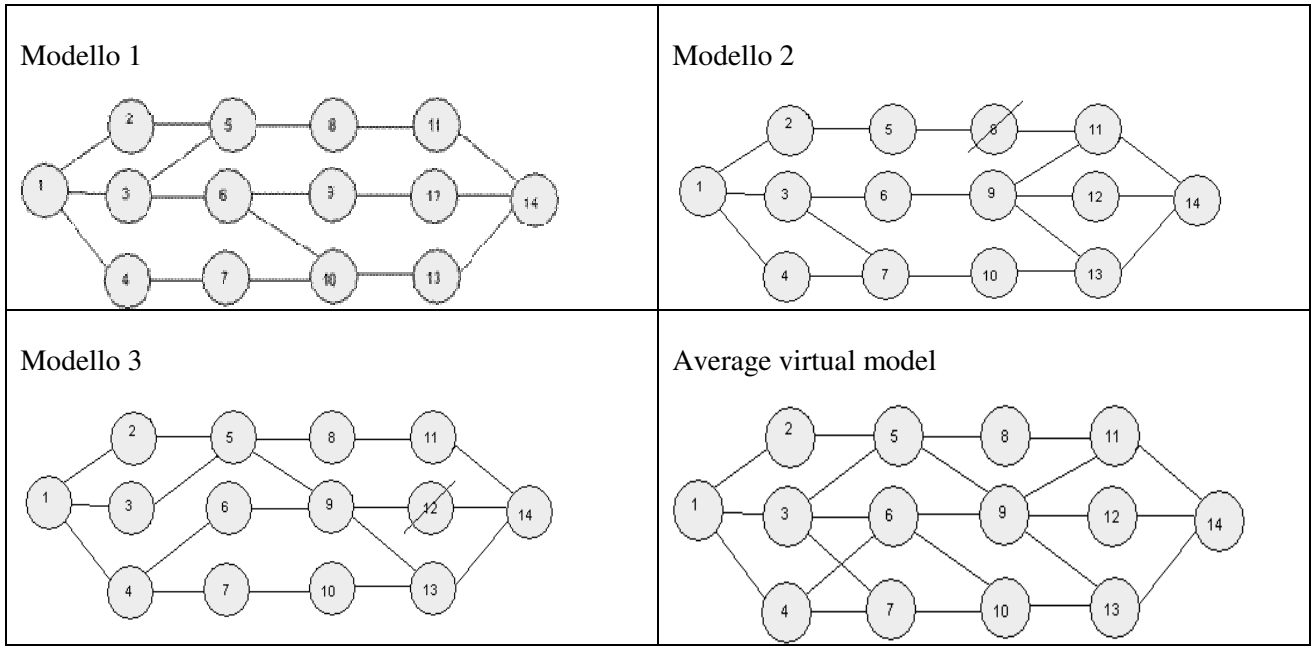


Fig. 5.13 Diagrammi delle precedenze

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 5.14 Diagramma delle precedenze con metodo binario per virtual avrage model

Calcolo dei tempi da assegnare al prodotto caratteristico: sono stati calcolati usando le formule riportate precedentemente. In particolare:

Metodologia proposta da Thomopoulos (1970) modificata per trovare un tempo medio per il task time.

$$A) t_j = \frac{\sum_m d_m \cdot t_{jm}}{\sum_m d_m}$$

Il max t_{jm} .

$$B) t_j = \max\{ t_{jm} \} \quad \text{for } m=1, \dots, M$$

Una media pesata non solo sui modelli ma anche sui tempi per i vari modelli m .

$$C) t_j = \frac{\sum_m t_{jm} \cdot d_m \cdot \sum_j t_{jm}}{\sum_m d_m \cdot \sum_j t_{jm}}$$

Max tra il valore min di t_{jm} e $t_{jm} - \sigma_{jm}$ per ciascun modello m

$$D) t_j = \max\{ \min(t_{jm}), \max(t_{jm} - \sigma_{j,m}) \} \text{ for } m=1, \dots, M$$

Le deviazioni standard σ_j sono calcolate come:

$$1) \sigma_j = 0,01 \cdot t_j \quad (1\% \text{ of } t_j)$$

$$2) \sigma_j = \sqrt{\left(\sum_m (t_{jm} - \frac{\sum_m d_m \cdot t_{jm}}{\sum_m d_m})^2 \right)}$$

Il primo metodo consiste nel non considerare variabilità, il secondo di considerare l'operazione j come fosse sempre la stessa tra i diversi modelli con variabilità dipendente proprio dal modello.

		Task													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Task time con 1 tipo di standard deviation	τA	2,62	3,00	3,33	2,83	2,33	4,50	5,00	3,50	3,17	3,00	2,17	4,50	3,17	3,17
	$\sigma 1$	0,02 6	0,03 0	0,03 3	0,02 8	0,02 3	0,04 5	0,05 0	0,03 5	0,03 2	0,03 0	0,02 2	0,04 5	0,03 2	0,03 2
	τB	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	6,00	6,00	5,00	3,00	3,00	6,00	4,00	4,00
	$\sigma 1$	0,03 0	0,05 0	0,04 0	0,04 0	0,04 0	0,05 0	0,06 0	0,06 0	0,05 0	0,03 0	0,03 0	0,06 0	0,04 0	0,04 0
	τC	2,70	2,96	3,40	2,79	2,38	4,43	5,10	3,63	3,17	3,00	2,19	4,35	3,21	3,19
	$\sigma 1$	0,02 7	0,03 0	0,03 4	0,02 8	0,02 4	0,04 4	0,05 1	0,03 6	0,03 2	0,03 0	0,02 2	0,04 4	0,03 2	0,03 2
	τD	2,97	4,95	3,96	3,96	3,96	4,95	5,94	5,94	4,95	3,00	2,97	5,94	3,96	3,96
	$\sigma 1$	0,03 0	0,05 0	0,04 0	0,04 0	0,04 0	0,05 0	0,05 9	0,05 9	0,05 0	0,05 0	0,03 0	0,03 0	0,05 9	0,04 0
Task time con 2 tipo standard deviation	τA	2,62	3,00	3,33	2,83	2,33	4,50	5,00	3,50	3,17	3,00	2,17	4,50	3,17	3,17
	$\sigma 1$	6,48 0	7,28	8,71	6,06	4,36	12,1 1	13,0 7	14,9 2	5,89	6,71	4,33	13,6 6	8,87	6,58
	τB	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	6,00	6,00	5,00	3,00	3,00	6,00	4,00	4,00
	$\sigma 1$	6,48 0	7,28	8,71	6,06	4,36	12,1 1	13,0 7	14,9 2	5,89	6,71	4,33	13,6 6	8,87	6,58
	τC	2,70	2,96	3,40	2,79	2,38	4,43	5,10	3,63	3,17	3,00	2,19	4,35	3,21	3,19
	$\sigma 1$	6,48 0	7,28	8,71	6,06	4,36	12,1 1	13,0 7	14,9 2	5,89	6,71	4,33	13,6 6	8,87	6,58
	τD	2,97	4,95	3,96	3,96	3,96	4,95	5,94	5,94	4,95	3,00	2,97	5,94	3,96	3,96
	$\sigma 1$	6,48 0	7,28	8,71	6,06	4,36	12,1 1	13,0 7	14,9 2	5,89	6,71	4,33	13,6 6	8,87	6,58

Fig 5.15 Task time per il virtual average model con i vari metodi, t_j σ_j , (min)

Step 3

Utilizzando ora l'euristico di Kottas and Lau vengono fatte le assegnazioni ottenendo il seguente risultato (esempio su metodo τA e σ primo tipo).

		Task assignation		
		1°	2°	3°
Station	1	1	2	
	2	3	5	
	3	4	8	
	4	7		
	5	6	10	
	6	9	11	10
	7	12	14	

Fig 5.16 Assegnazione task

Step 4 e 5

Vengono ora calcolati I valori delle 6 funzioni obiettivo utilizzando i vari metodi di calcolo dei tempi. I valori delle F.O. si riferiscono a $1/\Psi$ e moltiplicati per costanti di proporzionalità per questioni grafiche. Il confronto avverrà all'interno della stessa F.O. per diversi metodi di calcolo dei tempi

		F.O.					
		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6
K		105	10	31	0,2	0,9	36

Fig. 5.17 Costanti per le diverse F.O.

		Valori F.O.					
		$1/\Psi_1$	$1/\Psi_2$	$1/\Psi_3$	$1/\Psi_4$	$1/\Psi_5$	$1/\Psi_6$
Task time metodi	τ_A, σ_1	0,318	0,256	0,126	0,351	0,680	0,403
	τ_B, σ_1	0,356	0,417	0,167	0,178	0,485	0,542
	τ_C, σ_1	0,318	0,256	0,126	0,351	0,680	0,403
	τ_D, σ_1	0,360	0,333	0,079	0,224	0,566	0,682
	τ_A, σ_2	0,356	0,370	0,182	0,178	0,485	0,606
	τ_B, σ_2	0,849	0,833	1,017	0,123	0,309	0,602
	τ_C, σ_3	0,356	0,370	0,182	0,178	0,485	0,606
	τ_D, σ_4	0,849	0,833	1,017	0,123	0,309	0,594

Fig. 5.18 Valori delle F.O.

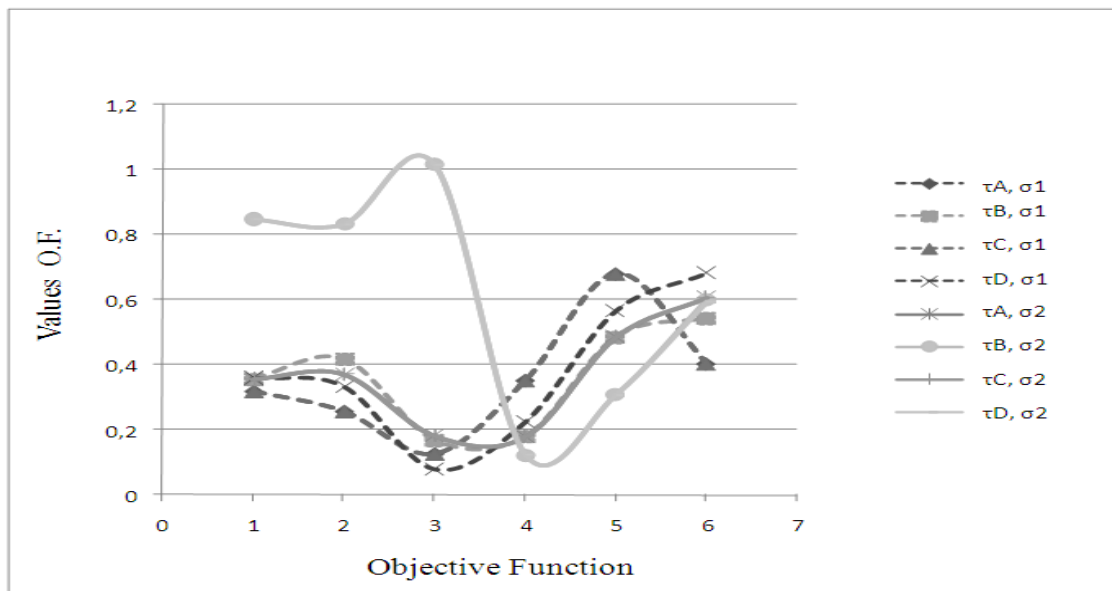


Fig. 5.19 Valori delle F.O. grafico

Come definite prima I task time e le varianze sono calcolate nei diversi modi. Nel grafico è mostrato che la variazione dei task time (gruppo σ_1 contro gruppo σ_2) influenza il bilanciamento nelle varie situazioni. In particolare per le F.O. 1,2,3 si hanno migliori risultati per il gruppo σ_2 , quindi con elevata variabilità dei task time tra i modelli, viceversa per le tipologie D, E, F. Il metodi A e C, come B e D danno risultati simili su diverse F.O.

Il passo successivo è valutare un'analisi della sensitività al variare del mix e della domanda, e i task tie tra i diversi modelli (2 dimensioni di variabilità) in modo da utilizzare le migliori F.O. di bilanciamento per contesti industriali diversi.

Analisi di sensitività

Caso 1: alta variabilità del mix e bassa variabilità del task time tra i modelli

		Task														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Demand mix
Modelli	1	2	1,5	2	2,5	4	2,5	1,5	3	4	3	2	2	4	3	4
	2	3	2	1,5	2,5	3	2	2	3	3,5	3	1,5	3	4	3	1
	3	3	2	2	3	4	2,5	1,5	3	3,5	3	2	2	3	2,5	9

Fig. 5.20 Caso 1 di variabilità

I relativi valori delle F.O. sono:

		Valori F.O.					
		$1/\Psi_1$	$1/\Psi_2$	$1/\Psi_3$	$1/\Psi_4$	$1/\Psi_5$	$1/\Psi_6$
Task time metodi	τ_A, σ_1	0,270	0,211	0,102	<u>0,349</u>	<u>0,678</u>	0,473
	τ_B, σ_1	0,270	0,254	0,102	<u>0,349</u>	<u>0,678</u>	<u>0,899</u>
	τ_C, σ_1	0,270	0,220	0,101	<u>0,349</u>	<u>0,678</u>	0,374
	τ_D, σ_1	<u>0,270</u>	<u>0,231</u>	<u>0,102</u>	<u>0,349</u>	<u>0,678</u>	0,519
	τ_A, σ_2	<u>0,463</u>	<u>0,516</u>	<u>0,424</u>	0,122	0,301	0,468
	τ_B, σ_2	<u>0,463</u>	<u>0,516</u>	<u>0,424</u>	0,122	0,301	0,468
	τ_C, σ_3	<u>0,463</u>	<u>0,516</u>	<u>0,424</u>	0,122	0,301	0,468
	τ_D, σ_4	<u>0,379</u>	0,268	0,250	0,122	0,301	0,433

Fig. 5.21 Caso 1, valori F.O.

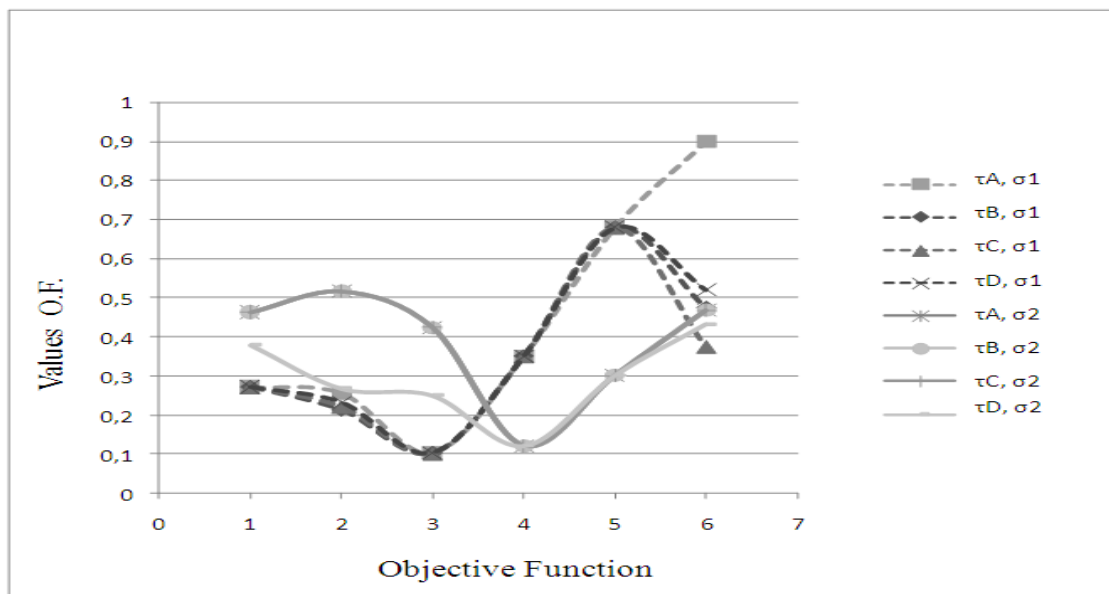


Fig. 5.22 Caso 1, grafico

Il grafico mostra ancora che per le F.O. 1,2,3 e 6 il gruppo σ_2 presenta I migliori risultati a parità di F.O. La maggiore variabilità del mix incrementa il numero di stazioni per la F.O. 4 che ottiene largamente risultati migliori a basse variabilità.

Caso 2: bassa variabilità del mix e alta variabilità del task time tra i modelli

		Task														Demand mix
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Modelli	1	0,5	0,5	5	0,3	1	0,5	3	4	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1
	2	5	3	0,5	0,5	4	4	0,5	0,5	3	1	1,5	1	0,5	1	1
	3	5	4	2	4	3	3	1	2	4	3	3	4	3	6	1

Fig. 5.23 Caso 2

I relativi valori delle F.O. sono:

		Valori F.O.					
		$1/\Psi_1$	$1/\Psi_2$	$1/\Psi_3$	$1/\Psi_4$	$1/\Psi_5$	$1/\Psi_6$
Task time metodi	τ_A, σ_1	1,830	0,988	2,652	<u>0,533</u>	<u>0,748</u>	3,860
	τ_B, σ_1	<u>2,996</u>	1,739	<u>12,200</u>	0,139	0,374	3,270
	τ_C, σ_1	1,846	0,762	2,773	<u>0,533</u>	<u>0,748</u>	<u>8,459</u>
	τ_D, σ_1	2,834	1,739	<u>12,200</u>	0,139	0,374	3,062
	τ_A, σ_2	2,092	0,939	7,625	0,221	0,561	4,517
	τ_B, σ_2	2,593	<u>2,424</u>	<u>12,200</u>	0,117	0,281	5,853
	τ_C, σ_3	1,846	0,762	2,773	<u>0,533</u>	<u>0,748</u>	<u>8,459</u>
	τ_D, σ_4	2,593	<u>2,424</u>	<u>12,200</u>	0,117	0,281	5,853

Fig. 5.24 Caso 2 valori F.O.

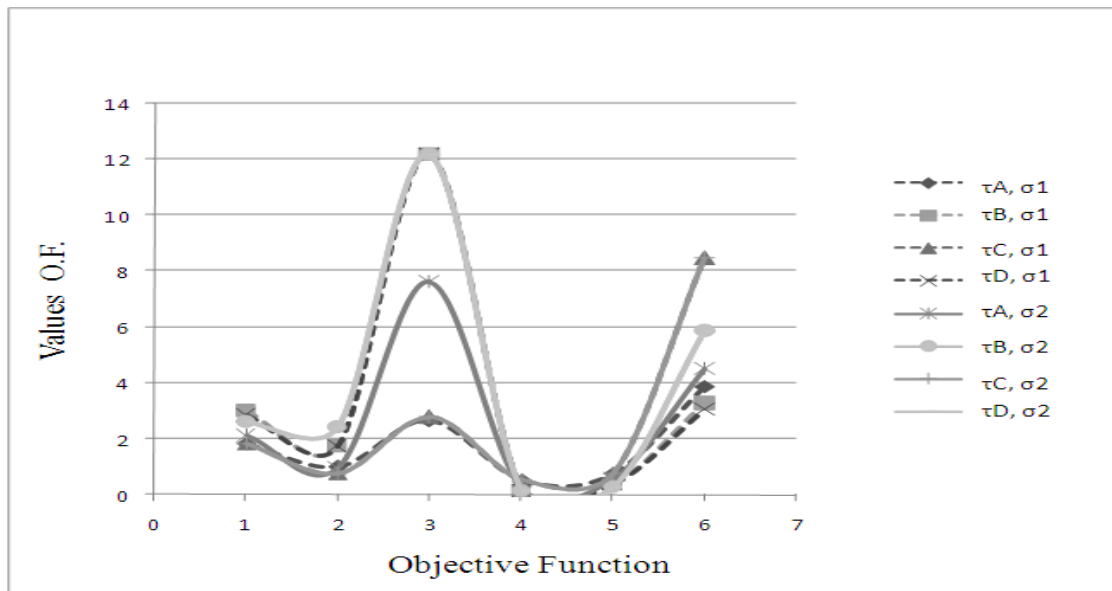


Fig. 5.25 Caso 2, grafico

Con un'alta variabilità dei tempi dei task tra I modelli le F.O. 4 e 5 danno le stesse soluzioni. Per i calcoli di tipo B e D abbiamo gli stessi risultati prendendo i massimi tra i task time.

Caso 3: alta variabilità del mix e alta variabilità del task time tra i modelli

		Task														Demand mix
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Modelli	1	0,5	0,5	5	0,3	1	0,5	3	4	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	4
	2	5	3	0,5	0,5	4	4	0,5	0,5	3	1	1,5	1	0,5	1	1
	3	5	4	2	4	3	3	1	2	4	3	3	4	3	6	9

Fig. 5.26 Caso 3 di variabilità

I relativi valori delle F.O. sono:

		Valori F.O.					
		$1/\Psi_1$	$1/\Psi_2$	$1/\Psi_3$	$1/\Psi_4$	$1/\Psi_5$	$1/\Psi_6$
Task time metodi	$\tau A, \sigma 1$	0,327	0,200	0,130	<u>0,364</u>	<u>0,686</u>	0,373
	$\tau B, \sigma 1$	0,351	0,305	0,168	0,167	0,458	0,463
	$\tau C, \sigma 1$	0,327	0,217	0,129	0,364	0,686	0,384
	$\tau D, \sigma 1$	0,351	0,305	0,168	0,167	0,458	0,463
	$\tau A, \sigma 2$	0,477	0,452	0,318	0,122	0,305	0,495
	$\tau B, \sigma 2$	<u>0,730</u>	<u>0,567</u>	<u>0,763</u>	0,108	0,229	0,636
	$\tau C, \sigma 3$	0,684	<u>0,567</u>	0,693	0,108	0,229	<u>0,643</u>
	$\tau D, \sigma 4$	0,724	<u>0,567</u>	<u>0,763</u>	0,108	0,229	0,641

Fig. 5.27 Caso di variabilità valori F.O.

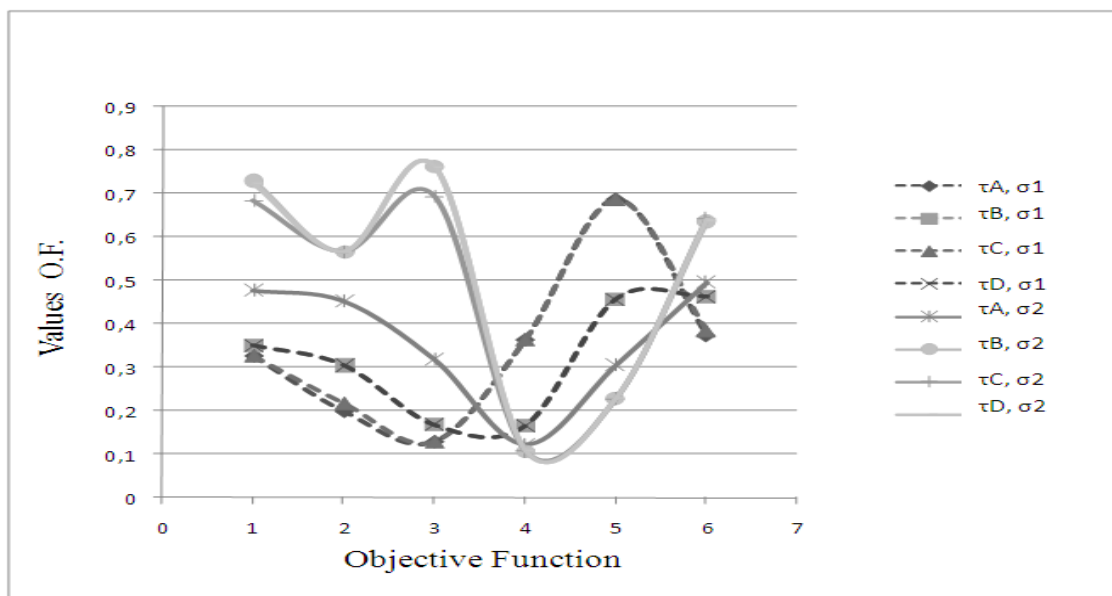


Fig. 5.28 Caso 3 di variabilità valori F.O.

L'analisi finale mostra che l'alta variazione sia del task time che del mix da valori migliori per le F.O. 1, 2, 3, 6 con il gruppo $\sigma 2$, mentre per la 4 e la 5 per il gruppo $\sigma 1$.

La metodologia introdotta permette usando un semplice approccio di:

- Confrontare all'interno della stessa F.O. diverse metodologie per il calcolo dei task time per il modello medio e quindi valutarne il migliore
- Valutare l'effetto della variabilità sul mix dei valori delle F.O. al variare delle metodologie di calcolo dei tempi
- Valutare l'effetto della variabilità sui task time tra i diversi modelli dei valori delle F.O. al variare delle metodologie di calcolo dei tempi

Questa metodologia consente al variare del contesto industriale di scegliere la migliore F.O. da utilizzare e il miglior modo per creare il task time per il virtual average model ottenendo quindi la migliore soluzione di bilanciamento.

6. MSP, Mixed Model Sequencing Problem

6.1 Introduzione

Ci si focalizza ora sul problema, riferito al breve periodo, *MSP (mixed-model sequencing problem)* che si occupa di ricercare una sequenza di modelli intermixati da lanciare in produzione lungo la linea in modo da riuscire a soddisfare la domanda di mercato e ottimizzare alcuni obiettivi di costo o tempo. L'ambito di analisi rimane quello delle linee mixed-model, le uniche per le quali ha senso formulare un problema MSP.

6.2 Formulazione del problema MSP

Facendo riferimento alla classificazione e agli aspetti operativi delle linee di assemblaggio, già trattati nell'introduzione e via via approfonditi in seguito, è evidente come sia impossibile fornire una formulazione generale e sempre valida del problema MSP. Si devono dunque accettare delle ipotesi semplificative, alcune delle quali rispecchiano quelle precedentemente utilizzate nella formulazione del problema MALBP.

In riferimento al bilanciamento della linea e al layout si considerano entrambi come dati, a causa dell'impossibilità di agire su di essi nel breve periodo. È dunque nota la soluzione di un particolare MALBP. Si considera un periodo di pianificazione di un giorno o di una settimana e ci si basa sugli ordini pervenuti, con tempo di consegna definito. Si fa riferimento al *mix produttivo* per indicare gli ordini (la domanda) di ciascun modello.

I lanci in produzione avvengono ad intervalli di tempo costanti, per la maggiore facilità di gestione di questo tipo di strategia. Le stazioni sono considerate chiuse, anche se non vi è sostanziale differenza fra stazioni aperte e chiuse ai fini del sequenziamento (Ziegler, 1990).

Il lavoro si considera suddiviso equamente fra tutti gli operatori presenti nelle stazioni, così che essi possano essere analizzati come un unico. Nel caso il tempo per il completamento di un'operazione non sia sufficiente, si ipotizza che altri operatori possano intervenire nella misura in cui un raddoppio degli operatori porta ad un dimezzamento del tempo necessario (in proporzione inversa).

La linea si considera in movimento a velocità costante e il semilavorato rimane a disposizione di una stazione per un intervallo di tempo noto e costante. L'operatore ritorna in posizione, dopo aver eseguito l'operazione, in un tempo nullo (o con velocità infinita) e inizia la lavorazione sul semilavorato successivo o, se questo non è ancora disponibile all'interno della sua stazione, ha un tempo di ozio.

6.2.1 Simbologia

La simbologia utilizzata, salvo diversamente indicato, sarà la seguente:

Simbolo	Legenda	Formula derivata
M	numero totale di modelli di indice $m=1,\dots,M$	
d_m	domanda attesa per il prodotto m nel periodo di pianificazione	
D	domanda totale attesa nel periodo di pianificazione	$D = \sum_{m=0}^M d_m$
J	numero totale di operazioni richieste di indice $j=1,\dots,J$	
PT	tempo totale a disposizione nel periodo di pianificazione	
t_c	tempo (medio) di ciclo, l'intervallo di lancio in produzione sar�	$t_c \leq \frac{PT}{D}$
$t_{j,m}$	tempo per l'operazione j per il modello m	
t'_j	tempo cumulativo dell'operazione j per tutti gli m modelli interessati da quella operazione	$t'_j = \sum_{m=0}^M d_m t_{j,m}$
t_j	tempo (medio) dell'operazione j per unit� prodotta	$t_j = \frac{t'_j}{D}$
K	numero di stazioni di indice $k=1,\dots,K$	
S_K	Operazioni assegnate alla stazione K	
$\tau_{m,k}$	tempo di lavorazione del modello m nella stazione k	$\tau_{m,k} = \sum_{j \in S_K} t_{j,m}$
$\tau'_{m,k}$	tempo totale del modello m nella stazione k	$\tau'_{m,k} = d_m \tau_{m,k}$
\bar{t}_m	tempo medio di operazione per stazione e unit� del modello m	$\bar{t}_m = \sum_k \frac{\tau_{m,k}}{K}$
\bar{t}'_m	tempo totale medio di operazione per stazione e modello m	$\bar{t}'_m = d_m \bar{t}_m$
τ'_k	tempo di operazione totale nella stazione k	$\tau'_k = \sum_m \tau'_{m,k}$
τ_k	tempo medio per operazione per unit�, della stazione k	$\tau_k = \frac{\tau'_k}{D}$

Simbolo	Legenda	Formula derivata
I	lunghezza della sequenza, pari alla domanda totale, con indice $i=1, \dots, I$	$D = \sum_{m=0}^M d_m$
l_k	lunghezza della stazione k, espressa in termini di tempo	
x_{mi}	variabile binaria	$= \begin{cases} 1 & \text{se una unità del modello m è assegnata nella sequenza alla posizione i} \\ 0 & \text{in caso contrario} \end{cases}$
s_{ki}	posizione iniziale dell'operatore della stazione k per l'i-esima unità	
e_{ki}	posizione finale dell'operatore della stazione k dopo aver lavorato l'i-esima unità	
w_{ki}	lavoro richiesto alla stazione k per completare l'i-esima unità	
v	velocità del sistema di movimentazione (costante)	
TU	unità di tempo, assumendo costante la velocità del sistema di movimentazione è possibile assumere le distanze come $v * TU$	
$y_{mi} = \sum_{q=1}^i x_{mq}$	volume di produzione del modello m alla posizione i della sequenza	
$r_m = \frac{d_m}{I}$	rapporto della domanda del modello m rispetto al volume totale della sequenza	

Tabella 6.1, Simbologia

Prima di procedere è necessario introdurre anche due strumenti di analisi del problema relativi al tracciamento dei movimenti dell'operatore lungo la linea.

6.2.2 Diagramma di movimento e calcolo dello spostamento

Il movimento degli operatori, necessario per permettere a questi di processare i semilavorati in transito all'interno delle loro stazioni, è visualizzato nel *diagramma di movimento*. Questo mostra lo spostamento eseguito dall'operatore e la movimentazione dei prodotti. Se le stazioni sono chiuse gli operatori non interferiscono fra loro e queste possono essere completamente descritte dalle loro lunghezze l_k . La figura di seguito mostra un esempio di rappresentazione per questo caso:

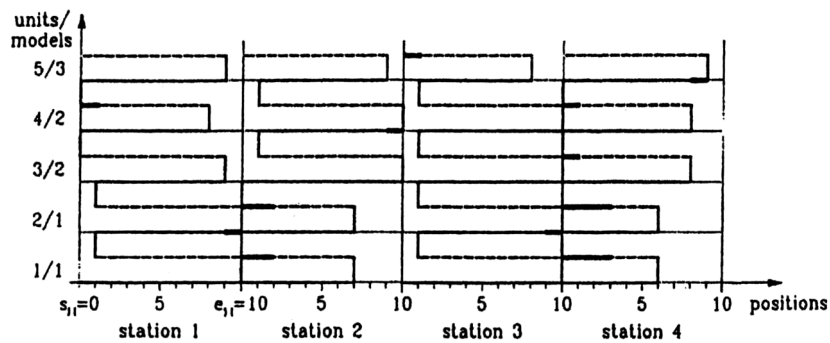


Fig 6.2, Diagramma di movimento (Scholl, 1999)

La posizione iniziale delle stazioni è considerata zero partendo dal lato sinistro. Sull'asse delle ordinate sono rappresentati gli i modelli della sequenza. Sull'asse delle ascisse sono indicate le posizioni nel tempo per le singole operazioni, tramite linee orizzontali che collegano i punti s_{ki} e e_{ki} . Il cammino di ritorno dell'operatore (si ricorda che è considerato un solo operatore per ogni stazione) è rappresentato dai segmenti orizzontali di lunghezza $e_{ki} - s_{k,i+1}$. Le porzioni tratteggiate che collegano le posizioni e_{ki} e $s_{k,i+1}$ rappresentano i tempi nei quali nessun semilavorato è processato dalla stazione k o $k+1$. Infine le porzioni in grassetto indicano la necessità di operatori aggiuntivi.

Si può quindi procedere al *calcolo dello spostamento* dell'operatore della stazione k per la lavorazione del modello m . Noti i tempi di ozio o le violazioni si definiscono le quantità $\Delta_{mk}^+ \cdot TU$ e $\Delta_{mk}^- \cdot TU$ (per $k=1, \dots, K$ e $m=1, \dots, M$) che indicano, rispettivamente, lo slittamento dell'operatore della stazione k verso destra o sinistra e, se si oltrepassassero i confini della stazione, sovraccarichi di lavoro o tempi di ozio.

Si definisce, infine, *stato della linea* prima di processare l' i -esima unità (e lo si indica con $S = (s_{1i}, \dots, s_{Ki})$) il vettore delle posizioni s_{ki} degli operatori in relazione al lato sinistro delle stazioni $k=1, \dots, K$. Lo stato iniziale della linea sarà dato dal vettore $S=(0, \dots, 0)$.

6.3 Classificazione cronologica del problema MSP

Le tecniche di programmazione della produzione nel breve periodo (*short-term*) hanno subito una notevole evoluzione a partire dagli anni settanta, parimenti con il crescente numero di linee mixed-model impiegate nella realtà industriale. Dopo una prima fase di studi basati principalmente su tecniche di ottimizzazione, i lavori successivi si sono invece concentrati maggiormente su approcci euristici, nel tentativo di superare i problemi dell'ottimizzazione ma, nello stesso tempo, introducendone di nuovi. Gli studi più recenti hanno invece tentato di introdurre paradigmi sempre più efficaci e aderenti al complesso e dinamico contesto produttivo dei nostri giorni. Si può dunque proporre un processo evolutivo delle tecniche individuando quattro "ere" principali (Caridi e Senesi, 1999).

L' *Era dell'ottimizzazione* è propria degli anni '70 e '80 nei quali domina la “*Computer Integrated Manufacturing*” (CIM) ed è caratterizzata da un forte controllo gerarchico e automatizzato del processo produttivo. L'applicazione di questa tecnica non ha portato a un successo, infatti:

- Raggiungere la piena automatizzazione era un processo lento e in contrasto con le esigenze di una rapida risposta al mercato.
- La standardizzazione, conseguenza naturale dell'automazione, introduce dei vincoli per l'azienda tali da non permetterle di aderire alle richieste del mercato, sempre più orientate verso la differenziazione.
- Difficoltà nella rappresentazione di complessi sistemi produttivi attraverso algoritmi, contenenti regole decisionali e di processo, comprese e fruibili da un sistema computerizzato.

In seguito al presentarsi di queste limitazioni e a una loro piena comprensione nasce un approccio nuovo e diametralmente opposto: l'approccio euristico.

L' *Era euristica*, dominante negli anni '80, nasce dalla presa di coscienza che la modellazione delle realtà spinta ad un livello di dettaglio eccessivo (tipica dell'era dell'ottimizzazione) può generare problemi troppo complessi da analizzare e risolvere. Il metodo euristico si presenta dunque come una tecnica in grado di offrire maggiore rapidità di calcolo e supporto ai processi di decision-making. I benefici di questa metodologia sono principalmente:

- Il modello logico si avvicina maggiormente a quello fisico;
- Il diagramma di flusso è sviluppato sulla base dell'esperienza del pianificatore, quindi è implicitamente una tecnica multi obiettivo.

Le principali limitazioni di questa tecnica sono dovute alla sua “staticità” dato che i vincoli e le priorità sono decise al momento della definizione, non del modello stesso, ma del sistema di pianificazione nel quale esso andrebbe implementato. Questo è in contrasto con la rapida evoluzione del contesto (in termini di prodotti, processi, richieste di mercato e strategia d'impresa) nel quale questa tecnica dovrebbe essere applicata. La soluzione di codificare nel sistema di pianificazione tutte le possibili reazioni alla maggior parte degli eventi indesiderati è persa, sin da subito, praticamente impossibile.

L' *Era dell'intelligenza artificiale (AI)*, conosciuta anche come “*Virtual Manufacturing Era*”, si protrae dalla metà degli anni '80 ad oggi ed è la risposta alla necessità di pianificazione delle moderne, complesse, realtà produttive. Questa era ha dato alla luce un gran numero di tecniche:

- *Expert systems*: la conoscenza acquisita dal pianificatore viene trasferita all'interno del sistema di pianificazione che, in questo modo, simula un vero e proprio processo di apprendimento. I punti deboli di questa tecnica che consistono nella difficoltà di trasporre nel sistema (implementato via software) il know-how rendono questi sistemi adattabili a pochi casi concreti.
- *Neural networks*: sono un sottoinsieme degli *expert systems* nei quali la tecnica è implementata in costrutti software in grado di emulare il funzionamento delle reti neurali biologiche. Sono però, anche questi, soggetti agli stessi punti deboli tipici degli *expert systems*.
- *Algoritmi genetici*: sono un caso particolare di tecnica euristica adattiva, basati sui principi dell'evoluzione dei sistemi biologici (con i principi di sopravvivenza degli individui portatori di

alcune particolari caratteristiche genetiche). Questa tipologia di sistemi mostra le stesse limitazioni qualitative delle *neural networks*.

- Architetture ad agenti autonomi: negli ultimi anni si è studiata la possibilità di applicare la teoria degli agenti autonomi alla programmazione della produzione. Secondo questa teoria il processo decisionale è distribuito fra entità autonome e intelligenti che agiscono sinergicamente per raggiungere un comune obiettivo. Quest'ultimo è suddiviso in un numero di obiettivi locali e solo attraverso il raggiungimento di questi potrà risultare possibile raggiungere l'obiettivo globale iniziale. Questa tipologia di sistemi presenta il vantaggio di poter superare con successo i problemi di complessità e la trattazione di eventi indesiderati, attraverso:
 - Coordinamento all'interno del sistema produttivo grazie l'uso degli agenti;
 - Grandi quantità di dati sono distribuiti fra tutti gli agenti;
 - Il sistema non mira al raggiungimento di una complessa funzione obiettivo globale;
 - Gli eventi esterni inattesi (disturbi) possono essere risolti attraverso l'analisi della loro influenza sui singolo agenti;

Questi sistemi possono quindi fornire soluzioni provenienti da varie risorse e possono dunque reagire prontamente. I difetti principali di queste tecniche non sono ancora stati riscontrati a causa della precoce fase di implementazione in cui si trovano ad oggi. È dunque ancora difficile valutare con esattezza la loro efficienza ed efficacia.

Infine si ha l' *Era dei pianificatori interattivi*. Gli anni novanta sono stati caratterizzati dalla ricerca di sistemi produttivi versatili e flessibili (sistemi Just in time, JIT). Le limitazioni poste dai sistemi CIM e dai metodi euristici hanno portato alla ricerca della massima semplicità nella programmazione delle produzione. Sono i sistemi più semplici, dato che la pianificazione è eseguita dal pianificatore stesso e il sistema controlla solo che la soluzione (in termini di pianificazione) scelta sia fattibile. I sistemi di pianificazione automatizzata sono utilizzati solo per una prima pianificazione di massima (che ancora si basa su metodi di ottimizzazione o euristici). I pianificatori interattivi sono, al giorno d'oggi, quelli di maggior applicazione.

La classificazione dei sistemi di pianificazione può avvenire secondo due dimensioni: efficacia ed efficienza. È però bene fare una prima distinzione fra tecniche ad alta dinamicità (proprie dell'era dell'AI e dei pianificatori interattivi) e a bassa dinamicità (tecniche euristiche e di ottimizzazione), intendendo con questi termini la facilità di adattamento alle mutazioni del mercato da parte del sistema di pianificazione. Se ne può ricavare una rappresentazione grafica di questo tipo:

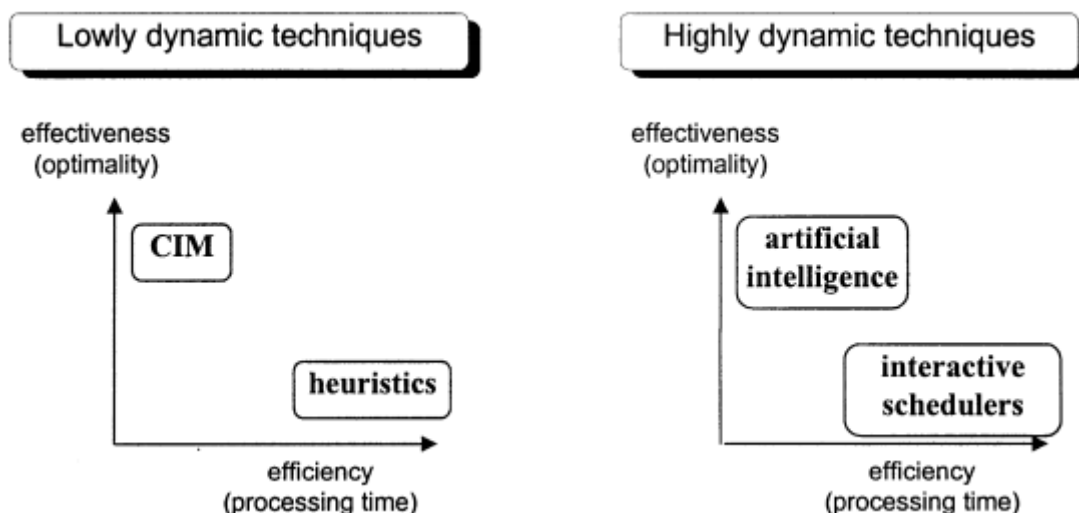


Fig. 6.3, classificazione delle tecniche di programmazione della produzione nel breve periodo (Fonte: M. Caridi e Sianesi, 2000)

6.3.1 Mappa evolutiva delle tecniche di programmazione della produzione (short-term)

Entrando nel merito dei testi degli autori che hanno contribuito allo sviluppo delle tecniche sopra menzionate, prima di entrare nel dettaglio delle problematiche specifiche, e delle relative tecniche risolutive e F.O. sulle quali si sono focalizzati, è opportuno cercare di contestualizzare il loro lavoro all'interno della suddivisione in "ere" proposta. Questo per permettere una maggiore comprensione di particolari scelte che questi autori possono avere operato, dettate, per citare alcuni esempi, dal diverso grado di maturazione del mercato (in termini di richiesta di customizzazione) o dalla capacità di calcolo a disposizione per i computer nei quali gli algoritmi da loro proposti dovevano essere implementati.

Anni	Era di riferimento			Autori
1965	Era dell'ottimizzazione			<ul style="list-style-type: none"> • Wester e Kilbridge (1964) • Thomopoulos (1967)
1970				<ul style="list-style-type: none"> • Mutsimori e Takada (1972)
1975				<ul style="list-style-type: none"> • Dar-El e Cother (1975) • Vrat e Virani (1976) • Dar-El (1978) • Baker (1978)
1980	Era euristica			<ul style="list-style-type: none"> • Okamura e Yamashina (1979) • Monden (1983)
1985		Era AI		<ul style="list-style-type: none"> • Chakravarty (1985) • Shtub (1986) • Yano e Bolat (1989) • Miltenburg (1989)

1990			Era dei pianificatori interattivi	<ul style="list-style-type: none"> • Ziegler (1990) • Inman e Bulfin (1991) • Schneeweiß e Söhner (1991) • Kubiak e Sethi (1991) • Decker (1993) • Domschke (1993) • Ding e Cheng (1993) • Bolat (1994) • Bolat et al. (1994) • Ng e Mark (1994) • Steiner e Yeomans (1994)
1995				<ul style="list-style-type: none"> • Pinedo (1995) • Keun Kim, Hyun e Kim Y. (1995) • Xiaobo e Ohno (1996) • Xiaobo, Zhou e Asres (1996) • Hyun, Kim Y. e Keun Kim (1996) • Korkmaz e Meral (1997) • Caridi e Sianesi (1998) • Zhu e Ding F.Y (1998) • Xiaobo e Ohno (1998) • Park e Kim Y.D. (1998) • McMullen (1998) • McMullen e Frazier (1998) • Kurashige, Yoshinari, Miyazaki e Kameyama (1999) • Celano, Fichera, Grasso, La Commare e Perrone (1999) • Scholl (1999)
2000 – oggi				<ul style="list-style-type: none"> • Celano, Costa, Fichera, Perrone (2001) • Drexler e Kimms (2001) • Ventura e Radhakrishnan (2002) • Ho e Ji (2003) • Mansouri (2004) • Ding, Zhu e Sun (2004) • Celano, Costa e Fichera (2004) • Xiaobo, Liu, Ohno et al. (2005) • Bautista e Cano (2005) • Tavakkoli-Moghaddam e Rahimi-Vahed (2006) • Rahimi-Vahed, Mirghorbani e Rabbani (2007) • Kim S., Joeng (2007) • Flidner e Boysen (2007) • Boysen, Flidner e Scholl (2007)

Tabella 6.4, Classificazione degli autori in base al contesto storico-produttivo in cui si collocano

Come si vede dalle date di pubblicazione dei lavori degli autori la classificazione non è da intendersi cronologicamente vincolante. Vi sono autori che in dati anni, come si vedrà più avanti, hanno pubblicato lavori appartenente ad altre “ere”, sia in senso innovativo che non. Questo, come già ricordato, è da imputarsi al contesto produttivo con cui si sono confrontati e che può avere subito diversi livelli e tempi di sviluppo, anche in riferimento all’area geografica e al paese di appartenenza.

2.4.Problematiche riguardanti il sequenziamento dei prodotti analizzate in letteratura

La letteratura individua tre classi principali di obiettivi da raggiungere nel sequenziamento di una MMAL: obiettivi relativi ai tempi, obiettivi di costo, e obiettivi legati ad una particolare gestione delle scorte e dei semilavorati.

Il sistema produttivo in cui l'azienda opera determina quale di questi tre obiettivi acquisisce importanza preponderante. Una componente importante del sistema produttivo che è opportuno precisare prima di procedere è la politica di gestione delle violazioni dei tempi che si possono avere nelle diverse stazioni lungo la linea. Queste violazioni, sotto le ipotesi poste precedentemente (stazioni chiuse), porta:

- Nei sistemi JIT, dove è data la possibilità all'operatore di fermare il sistema di trasporto della stessa nel caso non sia stato in grado di completare le operazioni assegnate, ad un fermo della linea
- Negli altri sistemi produttivi è invece previsto che le operazioni non completate lungo la linea principale siano svolte da altri operatori (*utilità workers*) oltre il confine della linea. Ogni prodotto, dunque, nel caso non sia stato possibile completare un'operazione potrà essere sottoposto solo a quelle operazioni che non richiedevano il completamento della precedente.

Infine si ricorda che la trattazione delle metodologie parte da una linea già efficacemente bilanciata e il problema MALBP, dunque, può essere tralasciato dall'analisi poiché il risultato si considera dato a priori.

Si può notare inoltre, che molti degli obiettivi proposti possono considerarsi (sotto particolari condizioni o meno, a seconda del caso) equivalenti. Scholl (1999) ha proposto un esauriente commento circa l'equivalenza degli obiettivi presenti in letteratura.

2.4.1. Obiettivi relativi ai tempi

Gli *obiettivi relativi ai tempi* si possono considerare come obiettivi legati alla minimizzazione della somma del tempo totale o di un tempo massimo. Non ha senso però cercare di minimizzare il tempo totale della linea poiché i pezzi escono da questa ad intervalli di tempo predeterminati (Schneeweiß e Söhner, 1991).

Si preferisce dunque procedere alla *minimizzazione della violazione dei tempi* che coincide (nei sistemi non JIT) con la minimizzazione del tempo necessario per gli operatori aggiuntivi. Una formalizzazione di questo obiettivo è data dalla F.O. :

$$\min WO = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I w_{ki} \quad (\text{eq. 2.1})$$

In alternativa è possibile tentare di *minimizzare i tempi di ozio* causati da una particolare sequenza che sta attraversando la linea. Questo obiettivo è esprimibile tramite la F.O. :

$$\min IT = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \max\{0, c - e_{ki}\} \quad (\text{eq. 2.2})$$

che considera i tempi di ozio che si hanno fra il ritorno dell'operatore all'inizio della stazione e l'arrivo, sempre nella stazione, del semilavorato successivo. Questa formulazione prevede che la linea non sia vuota all'interno del periodo di pianificazione. Nel caso questa ipotesi non fosse verificata tutte le stazioni dovranno aspettare l'arrivo della prima unità. Questo tempo di ozio è, però, indipendente dalla particolare sequenza scelta, e dunque ininfluenza ai fini della nostra analisi. Un tempo di ozio non voluto, comunque, è

sempre presente all'interno della linea (a causa del continuo cambio del carico di lavoro nelle varie stazioni per i diversi modelli del mix). Per ogni stazione questo è pari a: $PT - \tau'_k$.

Le due formulazioni riferite ai tempi sarebbero del tutto equivalenti se fosse possibile eliminare ogni tempo di ozio lungo la linea (Yano and Bolat, 1989). Questo deriva dal fatto che il tempo totale necessario τ'_k per la stazione k sarà fornito o dall'operatore della stazione o da un operatore oltre i confini della linea, dunque l'operatore nella stazione sarà in ozio per il tempo $PT - \tau'_k + \sum_i w_{ki}TU$, se si riesce ad eliminare i tempi di

ozio non voluti lungo la linea si ottiene:

$$PT - \tau'_k + \sum_i w_{ki}TU = 0 \Rightarrow PT - \tau'_k = \sum_i w_{ki}TU,$$

come volevasi dimostrare.

Altri autori (Schneeweiß e Söhner, 1991; Decker, 1993) hanno considerato gli obiettivi di minimizzazione del *tempo in eccesso*. La premessa necessaria a questi obiettivi è data dalla presenza di stazioni aperte con una zona di sovrapposizione di lunghezza costante. Il tempo in eccesso è definito come il tempo necessario ad un operatore per completare la lavorazione operando all'interno di queste zone. È stata considerata sia la minimizzazione della somma totale dei tempi in eccesso, sia la minimizzazione della differenza fra tempi in eccesso positivi e negativi. Quest'ultimo obiettivo presuppone che sia possibile compensare un tempo positivo con uno negativo, anche se questa non è una condizione sempre aderente alla realtà.

Altri obiettivi riguardano la minimizzazione degli *spostamenti dell'operatore* verso la destra della loro stazione (Mutsimori e Takada, 1972 e Okamura e Yamashina, 1979). Questo obiettivo è un surrogato del minimizzare il rischio di fermata del sistema di movimentazione.

Sempre nell'ottica di minimizzare i tempi di ozio e le violazioni, alcuni autori (Dar-El e Cother, 1975; Dar-El, 1978), partono dall'assunto per cui sia possibile *variare la lunghezza della linea* anche nel breve periodo. In questo caso sarà possibile eliminare del tutto le violazioni dei tempi dovute a sovraccarico di lavoro e minimizzare il tempo di attraversamento della linea. Nonostante i vantaggi di questo approccio è sensato considerarlo applicabile solo nei casi in cui è disponibile un sistema di movimentazione sufficientemente lungo e nessun macchinario fisso è necessario.

6.4.2 Obiettivi relativi ai costi

A livello operativo, a volte, gli obiettivi relativi ai tempi risultano non appropriati, poiché tendono a dare identico peso a diverse tipologie di inefficienze. In questi casi un'opzione può essere quella di considerare obiettivi relativi ai costi.

Un primo obiettivo può essere quello di *minimizzare il costo totale del lavoro* definendo un compenso per gli operatori nelle stazioni e fuori dai limiti della linea. Si possono identificare 3 situazioni:

- I compensi possono variare a seconda del modello e della tipologia di operazione da effettuare nella stazione (Ziegler, 1990).
- Nel caso di stazioni aperte possono essere considerati costi aggiuntivi nelle zone di sovrapposizione (Thomopoulos, 1967).

- Può essere incluso nell'analisi anche il tempo necessario oltre i confini della linea (Vrat e Virani, 1976).

Nel caso di particolari tipi di stazioni significative operazioni di setup possono dover essere eseguite ad ogni cambio di modello. In questo caso un obiettivo più aderente alla realtà (Bolot, 1994) può essere quello di minimizzare la somma dei costi di setup e dei costi per le operazioni fuori linea (*costo totale operativo*). Altri autori (Chakravarty e Shtub, 1985 e 1986) propongono di considerare la minimizzazione del costo del lavoro, delle attività di set-up e dei semilavorati.

2.4.3.Obiettivi JIT/gestione delle scorte

Questa ultima tipologia di obiettivi prende in considerazione un diverso aspetto della linea: l'approvvigionamento di materiali alle stazioni. Lo stock di materiale comporta sempre l'immobilizzazione di capitali e, nel caso di una linea mixed-model, diventa critica una corretta gestione delle scorte per far fronte a tutti i modelli processati. Un sistema *just-in-time (JIT)* può risultare la soluzione migliore, permettendo un approvvigionamento delle parti solo nel momento in cui esse sono richieste e, contemporaneamente, un tasso di produzione complessivo della linea in grado di mantenersi aderente alla reale domanda di mercato (Hall, 1983). Il raggiungimento di tali obiettivi risulta, ovviamente, facilitato nel caso di un tasso di utilizzo costante, come trattato da Monden (1983), Miltenburg (1989) e Kubiak e Sethi (1991).

Nel caso i prodotti presentino grandi analogie, in termini di *utilizzo di parti simili*, può risultare sufficiente considerare i prodotti finali in uscita dalla linea, in quanto un livello di utilizzo pressoché costante può essere ottenuto livellando il tasso di uscita dei singoli prodotti. Questa situazione ideale non è, spesso, ottenibile nella realtà. Una misura del grado di applicabilità di questa ipotesi è dato dalla formula: $y_{mi} = i \cdot r_m$ per $i=1, \dots, I$ e $m=1, \dots, M$. Se questa eguaglianza non è soddisfatta allora l'ipotesi cade ed è necessario prendere in considerazione obiettivi che pesino la differenza fra le produzioni cumulate y_{mi} e la domanda. La struttura delle F.O. che ne derivano sono di formulazione simile a quelle relative al bilanciamento del lavoro fra le stazioni. Alcune di esse sono state proposte da Miltenburg (1989), Ding e Cheng (1993) e Ng e Mark (1994). Una possibile funzione obiettivo che tenti di minimizzare la somma delle deviazioni quadratiche, rispetto alla domanda e i volumi in uscita, cumulate, è:

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I (y_{mi} - i \cdot r_m)^2$$

Nel caso di un sistema di produzione *multi-livello* l'assemblaggio dei componenti dei diversi modelli viene eseguito in sotto-processi rispetto alla linea di assemblaggio del prodotto finito. Sempre in un'ottica di gestione JIT l'assemblaggio dei componenti avverrà solo per necessità di approvvigionare la linea principale (tramite sistemi noti come "Kanbans"). Le F.O. proposte in questo caso da Miltenburg e Sinnamon (1989 e 1992) e Inman e Bulfin (1992) prendono in considerazione l'utilizzo di parti a tutti i livelli.

Focalizzandosi sull'ottimizzazione della sola gestione delle scorte si può finire, però, col generare degli ampi scompensi e sbilanciamenti all'interno della linea. Molti autori preferiscono per questo proporre delle F.O. che tengano conto di obiettivi multipli. In questo caso gli obiettivi JIT vengono associati, nella ricerca

di una soluzione complessivamente fattibile e ottima, ad obiettivi di tempo e carico di lavoro. Autori come Drexel e Jordan (1995) hanno invece preferito porre delle restrizioni (sui tempi e i carichi di lavoro) alle F.O. che includevano solamente l'ottimizzazione di obiettivi JIT.

Come già accennato, Scholl (1999), ha eseguito, per alcune delle F.O. proposte in precedenza, un interessante commento circa l'equivalenza degli obiettivi, sotto particolari condizioni. Queste equivalenze vengono riassunte nella tabella seguente e risultano di grande importanza sia nella classificazione della letteratura stessa, sia in applicazioni pratiche dove può accadere che non sia applicabile un particolare obiettivo, ma lo sia il suo equivalente.

Obiettivo 1		Obiettivo 2	Condizioni
Minimizzare il sovraccarico di lavoro $\min WO = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I w_{ki}$	\Leftrightarrow	Minimizzare il tempo di ozio $\min IT = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \max\{o, c - e_{ki}\}$	$PT - \tau'_k = \sum_i w_{ki} TU$
Minimizzare la lunghezza della linea	\Leftrightarrow	Minimizzare il superamento a destra della stazione da parte dell'operatore	
Minimizzare la lunghezza della linea	\Rightarrow	Minimizzare il tempo di attraversamento	
Minimizzare il costo totale del lavoro	\Leftrightarrow	Minimizzare il sovraccarico di lavoro	Costo del lavoro indipendente dal modello e dall'operazione
Minimizzare il costo totale del lavoro	\Leftrightarrow	Minimizzare il tempo di ozio	Costo del lavoro indipendente dal modello e dall'operazione

Tabella 6.5, equivalenza fra gli obiettivi, Scholl (1999)

6.5 Approcci alternativi al problema del sequenziamento

Prima di entrare nel dettaglio delle procedure risolutive per questi obiettivi è bene identificare i tre principali approcci alternativi, per la risoluzione di problemi MSP, presenti in letteratura.

6.5.1 Mixed-model sequencing

Il bilanciamento della linea MMAL viene effettuato, come già precisato, sulla base del diagramma di ciclo operativo congiunto e sulla base di un modello medio. Per questo motivo, alcuni dei tempi di lavorazione (per i diversi modelli) saranno minori mentre, altri, risulteranno inevitabilmente maggiori. Se modelli con tempi di lavorazione maggiore del tempo ciclo si susseguono in una stazione, allora l'operatore non sarà in grado di completare le operazioni assegnategli, con la conseguente fermata della linea o completamento delle operazioni al di fuori dei confini di questa. Il problema risulta, dunque, quello di alternare lungo la linea modelli con tempi maggiori a modelli con tempi minori, considerando anche lo spostamento necessario all'operatore e tutte l'insieme di caratteristiche operative proprio di una data linea (Domschke, 1997 e Scholl, 1999). A questo primo approccio, che è, in generale, il più diffuso, fanno parte gli obiettivi descritti nei paragrafi precedenti.

6.5.2 Car sequencing (CS)

Approccio nato, in origine, per il sequenziamento di modelli nell'industria automobilistica ma è ora applicato ad una grande varietà di aziende. In questo caso, al posto di una programmazione dettagliata del lavoro, partendo dal presupposto che un insieme di varianti, di un dato modello, può essere soggetto a regole di precedenza nelle lavorazioni. Si deve dunque individuare una sequenza che, soddisfacendo la domanda, non violi i vincoli imposti.

Si formulano una serie di regole di sequenziamento del tipo $H_0 : N_0$, ciò significa che, per evitare sovraccarichi di lavoro, una data variante può essere contenuta solo da H_0 e N_0 , in sequenza (Drexel e Kimms, 2001). Queste regole possono essere del tipo, per esempio, operatori : tempo di montaggio per una data opzione (in rapporto al tempo di ciclo). Con l'ausilio di queste regole di sequenziamento, il problema può essere formulato come un modello matematico per soddisfare i vincoli imposti dalle regole stesse, ovvero:

$$\sum_{t=t}^{t+N_0-1} \sum_{m \in M} a_{mo} x_{mt} \leq H_0, \quad \forall o \in O; t = 1, \dots, T - N_0 + 1 \quad (\text{eq. 2.4})$$

Dove la relativa simbologia è riportata nelle seguente tabella

Simbolo	Legenda	Formula derivata
O	insieme di varianti (opzioni) per il modello m	
T	numero di cicli produttivi (t=1,...,T)	
x_{mt}	variabile binaria	$= \begin{cases} 1 & \text{se una unità del modello m è lavorata al tempo t} \\ 0 & \text{in caso contrario} \end{cases}$
a_{mo}	variabile binaria	$= \begin{cases} 1 & \text{se il modello m contiene l'opzione o} \\ 0 & \text{in caso contrario} \end{cases}$

Tabella 6.6, Simbologia relativa ad un approccio car sequencing

Questo modello può essere poi risolto tramite algoritmi di ottimizzazione tramite l'assegnazione di penalità al verificarsi di una violazione (Gottlieb, 2003 e Gravel, 2005). L'algoritmo ha dunque il compito di minimizzare tali penalità o, se esistente, di individuare una sequenza in grado di evitarle completamente.

6.5.3 Level scheduling

Mira ad uniformare le richieste di materiali, in modo da rendere possibile un approvvigionamento di tipo JIT, con scorte di sicurezza minime o assenti. Comprende tutte quelle F.O. formulate con l'obiettivo di individuare sequenze il cui livello di consumo dei materiali sia il più vicino possibile al tasso ritenuto accettabile. Per esempio basti considerare la relazione fra l'uniformità nel consumo di componenti, ottenuta grazie alla produzione di piccoli lotti, e il costo crescente associato ai setup che tale strategia comporta.

6.6 Procedure di calcolo

Si è già accennato di come i problemi MSP e MALBP facciano parte di quella generica classe di *problemi di ottimizzazione*, nei quali si cerca di *massimizzare* o *minimizzare* un specifica quantità denominata *obiettivo* (F.O.) che dipende da un numero finito di variabili input, indipendenti l'una dall'altra o collegate fra loro da uno o più vincoli. La quantità trovata verrà definita come *ottimo* della F.O. .

Come visto nei precedenti paragrafi, in letteratura, negli anni, sono stati presentati svariati modelli (intesi come F.O.) in grado di prendere in considerazione, e valorizzare, differenti aspetti dei problemi di bilanciamento e sequenziamento. Si considerano di seguito, dunque, le F.O. come date.

In contemporanea all'apparizione di questi modelli si è reso necessario lo sviluppo di procedure di calcolo in grado di risolverli e che fossero rappresentabili in forma software. La ricerca operativa è venuta, in questo caso, in aiuto.

Le procedure che vedremo di seguito sono in parte noti precedentemente, o sono stati adattati da ambiti diversi alla formulazione dei problemi a MALBP e MSP, a cui sono stati poi applicati.

Una prima macro-classificazione di queste procedure è in base al metodo scelto nella ricerca dalla soluzione ottimale. Si individuano procedure esatte, procedure euristiche e procedure meta-euristiche.

6.6.1 Procedure esatte

Sono procedure già ampiamente note e studiate. Vi ricadono due tecniche principali: le tecniche di programmazione dinamica e branch and bound.

Le tecniche *branch and bound* (M. Fischetti, 1999) si basano su due operazioni principali: il branching e il bounding. Il *branching* (o enumerazione) è la prima operazione in sequenza. Consiste nella suddivisione del problema principale in vari sotto-problemi. Un'iterazione nella suddivisione del problema in sotto-problemi e in una nuova suddivisione di questi ultimi porta alla creazione di un albero con i sottoproblemi rappresentati sui nodi. Il primo livello di questo albero consiste nel nodo principale (il problema originario). I nodi per i quali è nota la soluzione ottimale saranno detti *foglie*. Il percorso da un nodo ad un altro dell'albero è detto *ramo*. La metodologia con cui si procede alla creazione dei diversi rami dell'albero può essere di due tipi:

- Ricerca prima in profondità (DFS): consiste nello sviluppare un singolo ramo dell'albero sino a quando si raggiunge una foglia. Quando questo accade si procede a ritroso verso la radice sino a quando si trova un ramo che non è ancora stato sviluppato e si procede lungo questo sino a che ogni ramo è stato completamente sviluppato.
- Strategia del minimo lower-bound (MLB): si procede allo sviluppo dei rami (non ancora esplorati) che presentano il valore minimo di un lower-bound. Di tutti i nodi sviluppati si terranno solo quelli con valore minimo, mentre gli altri verranno esclusi da successive analisi.

Il *bounding* serve a ridurre la dimensione dell'albero. Questo produce evidenti vantaggi in termini di tempi di computazione e memoria necessaria, nel caso di implementazione di questo algoritmo via software. Il bounding avviene calcolando il valore minimo, in ogni nodo, della soluzione perché questa sia accettabile. I *lower-bound* (limiti inferiori, LB) per ogni nodo sono ottenuti rilassando alcuni dei vincoli imposti alla F.O. Il valore minimo già noto per il nodo sarà definito come upper-bound (limite superiore, UB). Si procede allo sviluppo dei soli rami per i quali $LB < UB$.

Anche le tecniche di *programmazione dinamica* prevedono la suddivisione del problema iniziale in sottoproblemi (*stages*) che sono sequenzialmente risolti sino a quando il problema iniziale è finalmente risolto. Ad ogni stage corrisponde un numero di *stati* che descrivono tutte le possibili condizioni del processo decisionale. Gli stati presenti ad uno stage k sono trasformati da una *decisione* allo stage $k+1$. Un insieme di decisioni che porta da uno stato k ad uno stato h ($h > k$) si chiama *politica*. Infine si può formulare il seguente principio (Bellman e Dreyfus, 1962): la procedura che porta alla formulazione di una soluzione ottima, partendo da uno stage iniziale, deve includere politiche ottime per ogni sotto-problema. La risoluzione di un problema in un processo multi-stage può avvenire secondo due direzioni:

- Procedendo frontalmente: ogni stage viene considerata nell'ordine in cui si presenta. Per ogni stage vengono formulati tutti i possibili stati prima di procedere allo stage successivo.
- Procedendo a ritroso: si procede sempre attraverso ogni stage. Per ogni k stage si valutano tutti gli stati che possono essere stati generati partendo dallo stage $k-1$ attraverso una politica ottima.

6.6.2 Procedure euristiche e meta-euristiche

Fanno parte di quell'ambito della ricerca che si prefigge come obiettivo quello di favorire l'accesso a nuovi sviluppi teorici o scoperte empiriche. Sono caratterizzate da un approccio non strutturato alla risoluzione del problema, cercando, nel contempo, di rendere progressivo l'approfondimento di una teoria garantendo uno sviluppo empirico tale da poter prevedere fatti non noti al momento dell'elaborazione del nocciolo della teoria stessa. In particolare, in informatica, si definisce *euristico* un software che non opera meccanicamente ma utilizza una tecnica risolutiva virtualmente "creativa", non limitandosi dunque ad analizzare dati ma provando a simulare il comportamento. La differenza fra procedure euristiche e meta-euristiche risiede nel fatto che l'input per la risoluzione, nel caso delle procedure meta-euristiche, è un insieme di procedure (solitamente euristiche) combinate in maniera efficiente. Da qui il nome meta (oltre) euristiche.

Nell'ambito della letteratura si riscontrano, fra queste tecniche, la tabu search, la ricottura simulata, gli algoritmi genetici, le reti neurali e gli agenti autonomi. Come si illustra di seguito molte di queste presentano elementi in comune sia per quanto riguarda le problematiche (evitare punti di ottimo locale) sia riguardo i passaggi (inizializzazione, iterazioni, etc.).

Tecnica tabu search

La tecnica di *tabu search* è una tecnica combinatoria per la ricerca di una soluzione quasi-ottima. Presenta la peculiarità di mantenere una memoria delle ultime soluzioni esplorate, in modo da prevenire che la procedura cada in una situazione di stallo attorno ad un ottimo locale. La tecnica tabu search prevede che ogni permutazione della soluzione sia memorizzata all'interno della lista tabu. Al passaggio successivo tutti gli "scambi" contenuti nella lista sono proibiti. La prima combinazione potrà essere generata casualmente o tramite altre procedure di calcolo. All'utente è lasciata la scelta del numero di permutazioni precedenti da mantenere in memoria.

L'esplorazione dello spazio delle soluzioni avviene effettuando scambi casuali fra coppie di uguali elementi nella sequenza e tramite il ricalcolo del valore della F.O. . Se essa risulta migliore (ovvero minore) del precedente valore, la nuova sequenza verrà considerata come ottima e la procedura continua iterativamente. La procedura finirà quando, o si raggiunge un numero massimo di iterazioni totali (indicate con N nel

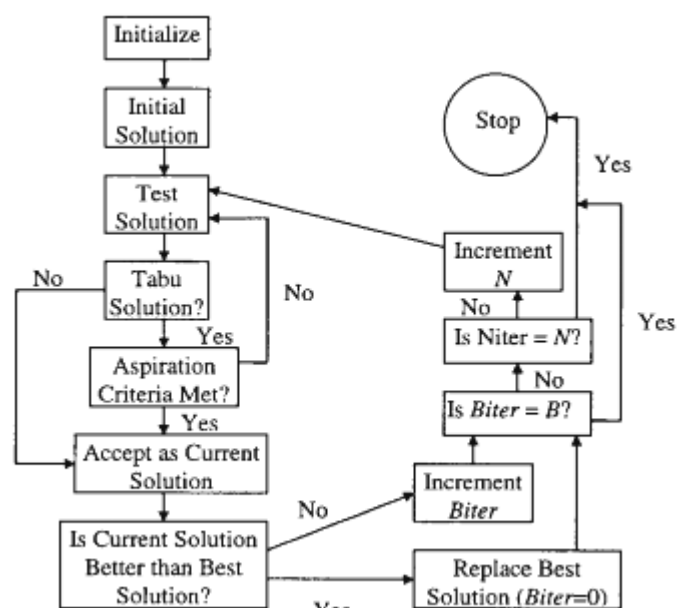


Fig 6.7, diagramma di flusso della tecnica tabu-search (McMullen, 1998)

diagramma), o si ha un numero definito di iterazioni senza che una soluzione migliore sia trovata (indicate con B nel diagramma), (McMullen, 1998).

Ricottura simulata

La tecnica di ricottura simulata, come la tabu search, propone metodi per la ricerca di soluzione quasi-ottime per problemi di ottimizzazione combinatoria, cercando di prevenire lo stallo in un ottimo locale. I parametri di misura della bontà di una soluzione trovata saranno il livello di temperatura (T) e il tasso di raffreddamento (CR). Il nome della tecnica deriva dalla scienza dei metalli, dov'è usato per descrivere il processo di eliminazione di difetti reticolari dai cristalli tramite una procedura di riscaldamento seguita da un lento raffreddamento. La procedura si articola nei seguenti step (McMullen e Frazier, 1999).

- Inizializzazione: vengono specificate le temperature iniziali (T_i) e finali (T_f), insieme al tasso di raffreddamento (CR) e al numero massimo di iterazioni (N) per ogni livello di temperatura (T). Una soluzione iniziale è selezionata con criteri, definiti a seconda del caso, partendo da una ampia popolazione di soluzioni valide.
- Generazione di soluzione successive: dopo l'inizializzazione si procede alla generazione di una soluzione vicina alla precedente. Questa viene ottenuta tramite la permutazione di coppie di elementi della sequenza. Per la nuova soluzione ottenuta (denominata *test*) viene ricalcolato il valore della F.O.. Si può procedere anche alla permutazione di tre elementi ad ogni iterazione. Questa tecnica non sembra aver però portato a variazioni significative nella determinazione dell'ottimo.
- Comparare la soluzione test con la soluzione corrente: il valore della F.O. per la soluzione test (E_T) viene paragonata alla precedente soluzione ottima (E_C). Se il nuovo valore della F.O. è inferiore ($E_T < E_C$) allora si sostituisce la migliore soluzione con la nuova sequenza test e si incrementa l'indice delle iterazioni (n).

Se il valore della F.O. per la soluzione test risulta superiore alla precedente soluzione ottima ($E_T > E_C$), allora si procede al calcolo della differenza percentuale fra E_T e E_C :

$$\Delta E = 100 \left(\frac{E_T - E_C}{E_C} \right)$$
 Tramite il *criterio di Metropolis* si calcola quindi la probabilità che la

soluzione E_T sia accettata. La probabilità è data dalla formula: $P(A) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{K_b T}\right)}$ dove K_b è la costante di Boltzman. Viene poi generato un numero casuale compreso fra 0 e 1. Se questo è inferiore a P(A) allora la soluzione E_C viene sostituita con la soluzione test E_T e l'indice n viene incrementato.

- Aggiustamento della temperatura: si ricalcola la temperatura T utilizzata nel calcolo della probabilità P(A), ponendo la variabile T pari a $T \cdot CR$. Se T è minore della temperatura T_f , alla quale si fermano le iterazioni, allora la procedura termina, altrimenti si procede alla generazione di una nuova soluzione

Algoritmi genetici

Gli *algoritmi genetici* gestiscono una popolazione di soluzioni. Ogni singola soluzione è considerata come un individuo (o un *cromosoma*). Una nuova popolazione è generata attraverso un processo di selezione, incrocio e mutazione rispetto agli individui della popolazione corrente. La nuova popolazione di soluzione, chiamate *figli*, dovrebbero aver ereditato gli attributi migliori della precedente soluzione. La qualità media della soluzione dovrebbe essere, dunque, migliore. Questo procedimento iterativo continua sino a che un qualche criterio viene soddisfatto. Si definisce $P(t)$ la popolazione ad una iterazione (t). I vantaggi di questa tecnica risiedono nell'abilità di combinare lo

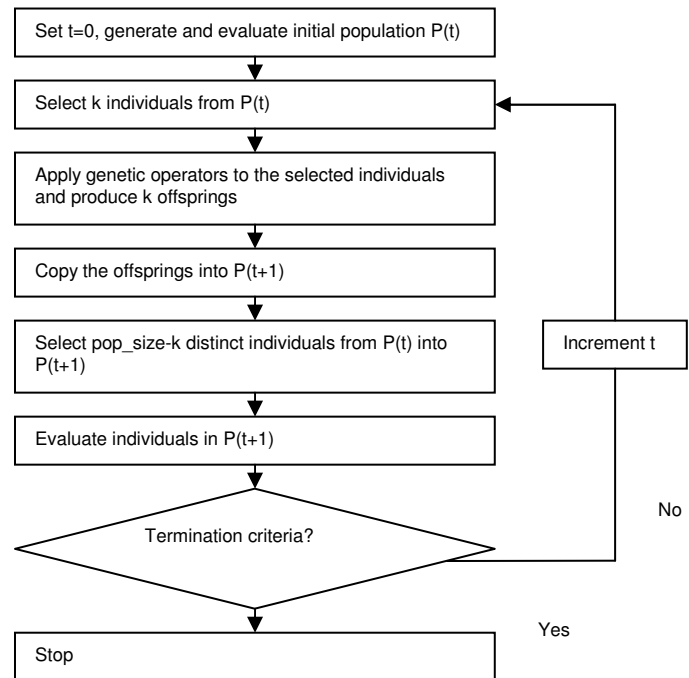


Fig 6.8, diagramma di flusso per un algoritmo genetico
(Fonte: Hyun et Al., 1998)

sfruttamento delle soluzioni precedentemente calcolate con l'esplorazione dello spazio delle soluzioni. La validità della tecnica risiede proprio in un corretto bilanciamento di queste due elementi. La difficoltà principale sta negli schemi di selezione, nella scelta degli operatori genetici e dei parametri di controllo.

La tecnica prevede la definizione, da parte dell'utente, dei seguenti elementi (Hyun et al., 1998):

- **Rappresentazione genetica:** consiste nel definire una rappresentazione genetica in grado di descrivere correttamente le caratteristiche specifiche del problema. In molti casi si tratta di una stringa di elementi dove uno stesso elemento può apparire anche più volte.
- **Definizione della *funzione di salute*:** si definisce come *salute* l'abilità di un individuo di sopravvivere all'interno della popolazione. Per ogni soluzione valida viene misurato il livello di salute attraverso la F.O. . La selezione avviene poi tramite un ordinamento delle soluzioni o tramite una distribuzione di probabilità, gli individui che sopravvivono vengono utilizzati per la generazione della successiva popolazione. La metodologia scelta nella selezione influenza il grado di velocità e precisione con cui si converge all'ottimo.
- **Definizione dei *parametri genetici*:** le prestazioni della metodologia genetica dipendono pesantemente dai parametri genetici su cui si basa. Questi includono: dimensione della popolazione (pop_size), numero di riproduzioni (k), il tasso di incrocio e mutazione, le condizioni necessarie a fermare le interazioni, e il parametro (q) per definire l'ordinamento della soluzione ottenuta.
- **Definizione degli *operatori genetici*:** si possono distinguere in operatori binari o unitari. I primi richiedono due soluzioni per generare un figlio, i secondi ne richiedono una sola. In letteratura è

presente una ampia trattazione di questi operatori. Ogni autore, per adattarli ai problemi MALBP o MSP, ha dovuto procedere, nella maggioranza dei casi, a crearne ad-hoc, o modificarne di esistenti, per fare in modo che le soluzioni generate si mantengano all'interno dello spazio delle soluzioni.

Una digramma di flusso di come la tecnica opera secondo i parametri appena discussi è rappresentato in figura 6.8.

Lo svantaggio principale risiede nel carattere euristico secondo il quale avviene la scelta degli operatori genetici, di cui sono state proposte in letteratura solo delle linee guida partendo dalla definizione del dominio del problema specifico in esame.

Reti neurali

Una *rete neurale artificiale* (ANN) è un metodo di calcolo basato sulla logica delle reti neurali biologiche. Consiste in un'interconnessione di neuroni artificiali che processano le informazioni utilizzando i collegamenti instaurati fra loro. È, inoltre, un sistema *adattivo*, in grado di mutare secondo input esterni o interni attraverso un *processo di apprendimento*. Possono essere utilizzate per modellare complesse relazioni fra input e output o per trovare analogie in un insieme di dati.

La caratteristica peculiare di questa metodologia consiste nel poter variare dinamicamente il peso delle interconnessioni, per produrre un desiderato flusso informativo. Le unità che processano i dati (i *neuroni*) eseguono le operazioni di calcolo attraverso un collegamento in parallelo con altri neuroni, senza che vi sia una chiara suddivisione del problema analizzata fra le unità. I tipi possibili di reti neurali sono molti, in base al percorso con cui l'informazione si muove nei nodi e alle diverse direzioni che può prendere (monodirezionale, bidirezionale, cicli o iterazioni fra i nodi).

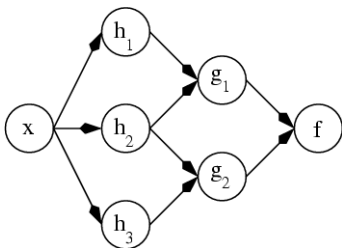


Fig 6.9, decomposizione della funzione $f(x)$ (Fonte: Web)

L'approccio pratico più utilizzato nell'ambito dei problemi di ottimizzazione risolti applicando questa teoria, consiste nel creare una funzione $f: X \rightarrow Y$, definita come composizione di funzioni $g_i(x)$ che a loro volta possono essere definite come la composizione di altre funzioni ($h_j(x)$, etc., con $j < i$) Una variabile in ingresso viene dunque trasformata in un vettore di valori per le h_j funzioni, che a sua volta viene utilizzate come input per le g_i funzioni, sino al calcolo del valore $f(x)$. Come accennato,

comunque, l'aspetto più interessante riguardo a questa metodologia di calcolo consiste nel processo di apprendimento. Si può definire apprendimento, data un problema e una classe di funzioni F , il processo di ricerca di una funzione f^* che risolva il problema nel modo più efficiente. Per definire l'efficienza è necessario utilizzare una funzione di costo (la F.O.), per la quale $F.O.(f^*) \leq F.O.(f)$, $\forall f \in F$, e che permetta di misurare la distanza dall'ottimo. Nel caso il problema presenti dei vincoli è importante che questi siano considerati all'interno della funzione di costo per specificare lo spazio delle soluzioni che si sta esplorando.

Per quanto riguarda il processo di apprendimento, esso può essere strutturato secondo tre paradigmi.

- Apprendimento controllato: alla rete neurale viene fornita una coppia di valori (x,y) e l'obiettivo è trovare una funzione $f \in F$ che soddisfi i valori dati. La funzione di costo sarà misura dell'errore fra la funzione $f(x)$ testata e la coppia (x,y) .
- Apprendimento non controllato: alla rete viene fornito il valore x e la funzione costo, da minimizzare, può essere funzione del valore fornito e dell'output della rete $f(x)$, ovvero $C(x, f(x))$.
- Rafforzamento: un valore x , in questo caso, non è solitamente dato, ma generato da un agente tramite delle interazioni con l'ambiente. In ogni istante t , l'agente esegue un'azione y_t e l'ambiente genera un output x_t , e un costo istantaneo c_t , secondo una dinamica conosciuta. L'obiettivo è quello di scoprire una *politica* di selezione delle azioni che minimizza la funzione di costo nel lungo termine, vale a dire il costo cumulativo. L'ambiente e la dinamica del costo a lungo termine per ogni politica di solito sono sconosciute, ma possono essere stimate.

Come illustrato, il più grande vantaggio nell'uso di reti ANN risiede nella possibilità di utilizzarli come metodi per l'approssimazione di una funzione arbitraria e che imparano dall'osservazione dei dati. Nonostante questi vantaggi, la loro applicazione non è così diretta e richiede attente analisi nella selezione dei modelli e degli algoritmi di apprendimento, pena l'affidabilità del metodo stesso.

Sistemi multi agente

Un sistema multi agente (MAS) si può definire come una rete di risolutori che lavorano assieme al fine di risolvere problemi che vanno al di là delle loro capacità individuali. (O'Hare e Jennings, 1996). Un problema viene dunque demandato, nella sua risoluzione, ad una serie di agenti, ognuno atto a ottimizzare il sottoproblema assegnatogli. Questa tecnica permette la risoluzione di problemi altrimenti troppo grandi (in termini di risorse richieste) per essere risolti da un sistema centralizzato.

Nell'ottica di questa collaborazione fra agenti il processo di negoziazione acquisisce un ruolo fondamentale. Si definisce *negoziazione* il processo di comunicazione tramite il quale diversi agenti raggiungono un accordo (*consenso*) circa una qualche questione. Il processo di negoziazione può essere competitivo o cooperativo, a seconda del comportamento dei singoli agenti. La strategia generale di una negoziazione è strutturata come segue (Caridi e Sianesi, 1999):

- Uno o più agenti effettuano una proposta che viene messa al vaglio degli altri agenti.
- Gli altri agenti valutano la proposta e effettuano, a loro volta, una nuova proposta basandosi sulle nuove informazioni ricevute.
- Il processo continua sino al raggiungimento di un accordo fra gli agenti.

Questo tipo di negoziazione sarà dunque a più passaggi (step) e a più direzioni (way). È a più passaggi, poiché ogni agente ha la possibilità di accettare o rifiutare le offerte pervenutegli, sino al raggiungimento di un consenso. È a più direzioni, poiché un agente dovrà gestire diverse risorse contemporaneamente per gestire l'obiettivo assegnatogli.

Altri vantaggi evidenziati in letteratura, nell'applicazione di questi sistemi, riguardano anche la possibilità di fornire soluzioni nel caso il problema analizzato o le informazioni necessarie alla sua soluzione, siano

implicitamente distribuite. L'implementazione di questa tecnica di calcolo avviene mediante software, che hanno la peculiarità di non agire su richiesta dell'utente ma, secondo le aspettative di sviluppo future, in collaborazione. L'utente viene dunque visto egli stesso come un agente che negozia con il sistema. Egli è un agente che è solamente in grado di influenzarne il comportamento, non di modificarlo a proprio piacimento.

6.6.3 Altre procedure di calcolo

Procedure ACO e SOM: si tratta di procedure di calcolo recenti, la cui applicazione a problemi relativi ai problemi MSP e MALBP non è ancora stata approfondita. Gli acronimi stanno, rispettivamente, per *Ant colony optimization* e *Self-organizing map*. La prima, è una tecnica probabilistica per la risoluzione di problemi, che può portare alla scoperta di buoni percorsi risolutivi attraverso grafi. La seconda è una particolare applicazione di reti neurali ad apprendimento non supervisionato per la produzione di esempi per l'apprendimento che preservino le proprietà dello spazio delle soluzioni. Sino ad oggi, sono stati presentati solo alcune applicazioni per testarne la validità in termini di velocità di calcolo e bontà della soluzione ottenuta (McMullen, 2001).

Infine, in letteratura sono presenti anche altre tecniche fra cui si ricordano: il *Goal Chasing* e l'*Extended Goal Chasing Method*, gli algoritmi memetici, le tecniche di *Bounded Dynamic Programming*, la tecnica *Scatter Search* e la procedura *Sliding Windows*. L'approfondimento di tutte queste esula dagli scopi di questo lavoro. La mappa presentata nel seguente paragrafo permette di identificare nel dettaglio gli autori che le trattano specificatamente all'interno dei rispettivi studi.

6.7 Tabelle di classificazione della letteratura per obiettivi e algoritmi

Sottolineiamo ora la relazione fra F.O. proposte e procedure di calcolo utilizzate per la loro risoluzione. Per fare questo e dare una mappatura del lavoro svolto dai diversi autori analizzati, si propone la seguente tabella.

Inoltre come più volte ricordato, il problema dell'assemblaggio contiene al suo interno diversi sottoproblemi che nel corso di questa tesi sono stati via via descritti. Tutti questi sottoproblemi o fattori sono tra loro collegati e solo la trattazione in maniera integrata di questi può offrire dal punto di vista applicativo soluzioni accettabili nel contesto specifico. In particolare na delle dimensioni di classificazione è proprio:

- Caratteristiche del sistema produttivo
 - Layout (linee in serie, parallelo, ad U, etc.)
 - Linee sincrone / asincrone.
 - Tempi (stocastici o deterministici)
 - Vincoli sulle operazioni e/o sui tempi (presenti o meno)

Se è possibile identificare una particolare variante di ogni caratteristica, essa viene indicata con la relativa sigla presentata in legenda. Inoltre:

- Funzione Obiettivo: può riferirsi ai tempi, ai costi o alla gestione delle scorte (paragrafo 2.4). Rilassando le condizioni che permettono relazioni di equivalenza fra gli obiettivi proposte da Scholl (1999), (vd. tabella 2.3) questi possono essere ancora scomposti in:

- Minimizzare il carico di lavoro
- Minimizzare la lunghezza totale della linea
- Minimizzare la variazioni nella richiesta di componenti
- Minimizzare lo spostamento degli operatori
- Minimizzare la variazioni nella produzione in uscita (PRV, *Product rate variation*)
- Minimizzare i fermi d'impianto
- Minimizzare obiettivi relativi ai costi
- Minimizzare altri obiettivi

Inoltre sono state poi considerate:

- Procedura di calcolo: vengono suddivise in esatte, euristiche e meta euristiche (paragrafo 2.5). Se è possibile identificare una procedura in particolare, essa viene indicata con la relativa sigla presentata in legenda.
- Simulazioni numeriche: indica la presenza o meno di eventuali simulazioni effettuate basandosi sulla F.O. presentata e utilizzando la procedura di calcolo scelta. Solitamente queste vengono anche completate con un *benchmark* rispetto a procedure di calcolo alternative e/o a F.O. proposte precedentemente da altri autori, al fine di avvalorare le scelte fatte.

La forma di rappresentazione scelta è una tabella a doppia entrata. Il simbolo ■ indica una relazione fra autore, tipologia di F.O. e procedura di calcolo utilizzata (se non specificata), oltre che la presenza o meno di una simulazione numerica.

Autore	Caratteristiche del sistema produttivo				Funzione obiettivo								Procedura di calcolo			
	tipologia di layout	linee sincrone/asincrone	tempi stocastici/deterministici	vincoli sulle operazioni/tempi	min. sovraccarico di lavoro	min. lunghezza della linea	min. la variazione nei componenti	min. lo spostamento degli operatori	min. PRV (product rate variation)	min. i fermi impianto	min. obiettivi relativi ai costi	min. altri obiettivi	esatta	euristica	meta euristica	simulazione numerica
Bautista e Cano (2005)		S	D	■											■	■
Boysen, Flidner e Scholl (2007)							■		■							■
Caridi e Sianesi (1998)							■								M S	B
Celano, Fichera, Grasso, La Commare e Perrone (1999)							■	■		■				G A		■
Celano, Costa, Fichera, Perrone (2001)	U			■						■		■		G A		■
Celano, Costa e Fichera (2004)		S	D	■		■	■	■						G C		■
Ding, Zhu e Sun (2004)			D				■							■		■
Drexler e Kimms (2001)					■	■				■				L B		■
Flidner e Boysen (2007)					■									B B		■

Ho e Ji (2003)	P			■							■			G A		■
Hyun, Kim Y. e Keun Kim (1996)		S	D	■	■		■				S			G A		B
Keun Kim, Hyun e Kim Y. (1995)		S	D				■				S			G A		B
Kim S., Joeng (2007)		S		■	■						S		B B	■		■
Korkmazel e Meral (1997)			D				■		■				nl p	■		B
Kurashige, Yoshinari, Miyazaki e Kameyama (1999)			D				■							■		B
Mansouri (2004)		S	D	■	■						S			G A		B
McMullen (1998)							■				S				T S	■
McMullen e Frazier (1998)							■				S				T S	B
Park e Kim Y.D. (1998)				■							FW		B B	■		B
Rahimi-Vahed, Mirghorbani e Rabbani (2007)							■			■	S				P S	B
Steiner e Yeomans (1994)												■				
Tavakkoli- Moghaddam e Rahimi-Vahed (2006)		S	D		■				■		S				M A	B
Ventura e Radhakrishnan (2002)				■							F			■		■

Xiaobo e Ohno (1996)		S	D					■		■					S	A	■
Xiaobo e Ohno (1998)		S	D							■				■			■
Xiaobo, Liu, Ohno e Kotani (2005)	S	S	S		■			■						■			■
Xiaobo, Zhou e Asres (1996)			D						■					G	C		■
Zhu e Ding F.Y (1998)									■						■		B

Layout:

S	Linee seriali
P	Linee parallele
U	Linee ad U

Tempi:

S	Tempi stocastici
D	Tempi deterministici

Obiettivi relativi ai costi:

F	Finished Products
W	Work in Progress
S	Setup

Procedure di calcolo:

BB	Branch and Bound
GA	Genetic Algorithm
GC	Goal Chasing
TS	Tabu Search
SA	Simulated Annealing
MA	Memetic Algoritihm
Nlp	Non-linear Programming
MS	Multi Agent System

Simulazioni numeriche:

B	Benchmar k
---	------------

Tabella 6.10, mappa riassuntiva della letteratura relativa al problema MSP con relativa legenda

6.8 Architettura di prodotto e influenza sui problemi MALBP e MSP

Poco abbiamo detto sino ad ora dell'influenza che può avere la diversa concezione del prodotto nelle problematiche di bilanciamento e sequenziamento. Un'azienda, nel procedere alla sviluppo di un nuovo prodotto da immettere sul mercato, delega ai responsabili della produzione la responsabilità di progettare e gestire il sistema produttivo necessario alla creazione "fisica" del prodotto stesso e di gestire gli acquisti, la distribuzione e l'eventuale installazione necessari a questo processo. Dato l'ambito di analisi di questo

lavoro, è opportuno concentrarsi solo su quelle dimensioni del prodotto che possono influire nelle decisioni di bilanciamento e sequenziamento.

Come ricordato precedentemente lo strumento che permette il passaggio da un problema SALBP ad un problema MALBP è il prodotto medio. Questo è stato definito tramite un diagramma di ciclo comune a più prodotti e dai tempi medi di ogni operazione (t_j). Questa definizione risulterà tanto più aderente alla realtà (e, di conseguenza, le successive analisi basate su questa) quanto più i diversi modelli presenteranno minori variazioni in termini di tempi e cicli tecnologici.

Le decisioni, a livello di sviluppo, che possono incidere su queste comunanze riguardano la scelta dell'architettura del prodotto, e la determinazione delle interfacce. In termini generali l'*architettura* consiste nella definizione delle funzioni del prodotto e la loro mappatura nei singoli componenti fisici (Ulrich, Eppinger e Filippini, 2007). Una prima distinzione può essere fatta fra architettura modulare e integrale.

L'architettura *integrale* prevede che singoli componenti fisici del prodotto svolgano diverse sottofunzioni del prodotto che, virtualmente sommate, danno la funzionalità finale del prodotto.

L'architettura *modulare* prevede che ogni singolo componente fisico del prodotto sia deputato allo svolgimento di una sola funzione. Si possono identificare tre tipi di architettura modulare (Ulrich, 2007):

- Slot: ogni interfaccia del prodotto è diversa dalle altre, i componenti del prodotto non possono essere scambiati fra di loro.
- Bus: vi è un componente, nel prodotto, al quale sono connessi tutti i componenti con un'interfaccia comune.
- Sectional: tutte le interfacce sono dello stesso tipo e non vi è alcun elemento al quale sono collegati tutti gli altri. I componenti si assemblano fra di loro connettendoli tramite una identica interfaccia.

La modularità è una utile strategia per organizzare la produzione di prodotti complessi in maniera efficiente e per garantire all'azienda di ridurre la varietà interna. I moduli si abbinano poi tra loro per mezzo di interfacce integrati in essi, che definiscono le interazioni fra i componenti e la geometria di accoppiamento, nel caso di collegamenti fisici.

Le *interfacce* possono essere di tipo accoppiato o disaccoppiato a seconda che, rispettivamente, una modifica su di un componente provochi la necessità di ridisegnare l'interfaccia o meno.

Risulta evidente come una architettura modulare con interfacce di tipo disaccoppiato si possa abbinare ad un sistema di assemblaggio mixed-model dove diversi moduli possono essere uniti fra loro per dare origine al livello di varietà desiderato.

In definitiva è importante comprendere come i problemi di bilanciamento e sequenziamento dei prodotti debbano essere tenuti presenti (ovviamente con diverso peso) già da prima della creazione o del set-up della linea. Infatti, un attento studio delle interfacce e dei moduli, atto a rendere quanto più uniformi possibili i tempi di assemblaggio e il ciclo tecnologico di ogni prodotto, può garantire il raggiungimento di obiettivi, in termini di omogeneità di utilizzo della capacità produttiva e delle scorte, altrimenti implicitamente irrealizzabili nonostante la corretta applicazione di tutte le metodologie presentate in letteratura.

6.9 Proposte per direzioni di ricerca future

Gli studi quantitativi e le simulazioni presenti in letteratura sono, da parte di alcuni autori, completate con *benchmark* (analisi comparative quantitative) fra la tecnica da loro proposta e quelle già presenti. Le dimensioni su cui questo benchmark avviene sono solitamente tre (Mansouri, 2004) :

- La qualità della soluzione;
- La diversità delle soluzioni (nel caso di procedure euristiche o meta-euristiche);
- Il tempo di calcolo necessario all'esecuzione (in un computer) di un problema di una data complessità.

Questi aspetti sono maggiormente approfonditi nel paragrafo 3.3.3. Risulta comunque intuitivo come queste tre misure siano un ottimo metro quantitativo della bontà dello studio proposto, ma non contengano informazioni circa l'effettiva possibilità di implementazione degli stessi. Studi mirati all'applicabilità sul campo delle diverse tecniche rintracciabili in letteratura, non sono ancora presenti e, tali valutazioni, rimangono relegate ad analisi "caso per caso" della realtà produttiva a cui tali tecniche si dovrebbero applicare. Due aspetti di questa analisi, di carattere comunque prevalentemente qualitativo, possono essere evidenziati, e riguardano:

- La complessità della F.O. e la quantità di dati necessari al calcolo, nonché una valutazione sul grado di incertezza a cui questi sono implicitamente soggetti.
- La difficoltà di codifica, su sistema informatico, dell'algoritmo di calcolo proposto.

Per quanto riguarda questo secondo aspetto, le procedure euristiche e meta-euristiche risultano certamente più semplici e dirette da implementare in sistemi informatici, proprio per la loro natura non rigorosa. Si crea dunque un trade-off fra costo di sviluppo di un'eventuale supporto informatico e il tempo di calcolo necessario, a tale supporto, a fornire una soluzione valida. Il continuo aumento della potenza processori, e i loro costi decrescenti, rende, probabilmente, più vantaggiosa una tecnica euristica. In particolare gli algoritmi di tipo genetico, oltre a questo aspetto di semplicità formale appena evidenziato, offrono anche più soluzioni quasi-ottime ed è lasciata al controllore la capacità di scegliere fra le diverse sequenze proposte, al fine di includere nella valutazione complessiva, anche aspetti non esplicitamente inclusi nel modello matematico. Questo li rende più facilmente adattabili a casi reali.

Per quanto riguarda le diverse F.O., l'applicabilità può essere valutata in funzione della tipologia dei dati necessari al calcolo e alle fonti da cui questi provengono. In particolare, come fonti, se ne possono individuare principalmente due:

- Fonti interne al sistema produttivo, quali: tempi, diagrammi di ciclo, etc. sono fonti che possono essere facilmente reperibili e che possono essere considerate soggette ad un basso grado di errore.
- Fonti esterne al sistema produttivo, quali: domanda di mercato, etc. Sono utilizzate nei sistemi JIT dove è la domanda a "tirare" la produzione.

6.10 Analisi di un caso di MSP e sviluppo di un modello innovativo di soluzione

Il caso qui proposto si riferisce ad un'azienda produttrice di macchine per la lavorazione del legno, ed in particolare ai modelli con elevati volumi di vendita attualmente assemblati in una linea di assemblaggio di tipo mixed model. In particolare il modello proposto ha l'obiettivo di minimizzare la saturazione dei buffer

di una linea a cadenza non imposta con buffer a capacità limitata eseguendo un bilanciamento ed un sequenziamento al fine di aumentare la produttività.

La linea di assemblaggio inoltre presenta buffer di disaccoppiamento tra le varie stazioni. I materiali vengono riforniti 1 volta /gg su magazzini posti a bordo linea con presenti. Contengono quindi rispetto al mix previsto i materiali per quel piano di produzione. Il prodotto è presente a partire da 3 diverse soluzioni di telaio, rispettivamente di lunghezza 1625mm, 2087 mm e 3042 mm, fattore critico per la dimensione dei buffer (5m); con diverse possibilità di presenza o meno di alcuni moduli di lavorazione, oltre che di diversa tipologia, dando alla fine 15 diversi modelli. Dopo una prima fase di ricavo dei tempi di assemblaggio, si è passati al bilanciamento della linea utilizzando un obiettivo riguardante i tempi di assemblaggio, al fine di saturare le stazioni di assemblaggio. Il problema ha i seguenti macro dati in input:

$M=15$ modelli

$D=80$ pz/mese

$J=44$ operazioni

$PT= 9600$ min/mese

$T_c = 120$ min

In particolare utilizzando le notazioni introdotte nei capitoli precedenti, in linea con i risultati della ricerca sui metodi per il calcolo dei tempi medi per famiglie di prodotti, e rispetto alle necessità di carattere tecnico, partendo dalle rilevazioni e dai dati storici sulla domanda, con le seguenti formule

$$T_j = \frac{\sum_m d_m \cdot T_{jm}}{\sum_m d_m}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\left(\sum_m (T_{j,m} - \frac{\sum_m d_m \cdot T_{jm}}{\sum_m d_m})^2 \right)}$$

Operaz.	Average model (min)	Deviazione standard (min)	Operaz.	Average model (min)	Deviazione standard (min)
1	8,9	1,07	23	9	5,78
2	5,9	0,83	24	17,7	4,43
3	11,9	1,43	25	16,9	4,73
4	19,8	2,38	26	25,7	10,79
5	15,8	1,90	27	29,3	3,52
6	4,9	0,59	28	14,8	1,78
7	9,9	1,19	29	24,1	12,05
8	3	0,36	30	38,7	8,51
9	4	0,48	31	5,1	1,28
10	4,9	0,59	32	3,2	0,70
11	17,8	2,14	33	16,9	8,03
12	17,8	2,14	34	6,3	4,76
13	6,9	0,83	35	9,8	5,18
14	6,9	4,52	36	6,6	4,79
15	3	2,45	37	2,8	0,
16	21,3	10,82	38	5,7	0,68
17	11,9	3,81	39	1,8	0,22
18	9,9	1,19	40	4,3	0,52
19	7,9	0,95	41	4,9	1,08
20	5,9	0,71	42	29,6	3,55
21	44,5	5,34	43	14,8	3,26
22	53,9	16,17	44	14,8	1,78

Fig. 6.11 Tempi average model

Una volta calcolati i tempi per l'average model si è passati al bilanciamento, tenendo conto anche dei vincoli di natura tecnologica,

$X_{j,k} = 0,1$;1 se operazione j è assegnata alla stazione k , 0 altrimenti

ottenuto come:

$$F(X) = \sum_k t_c - \sum_j X_{j,k} \cdot t_j$$

Con vincoli

$$\sum_k X_{j,k} = 1 \text{ con } k=1, \dots, K,$$

$$\sum_k X_{j,k} \cdot t_j \leq t_c$$

$$E_j \leq K(X_{j,k}) \leq L_j$$

La soluzione ottenuta, tenendo conto anche delle peculiarità di alcune operazioni, lunghe complesse e richieste da pochi modelli prevede una stazione jolly, la quarta. Dal punto di vista dell'average model essendo i volumi richiesti per questi modelli bassi questo aspetti non viene messo in luce.

S1= (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13)

S2= (14,15,16,19,20,21,33,34,35,36)

S3= (16,17,22,23,24,25,26,29,30,31,32)

S4= (37,38,39,40)

S5= (27,28,41,42,43,44)

I reali valori si primi 6 modelli rispetto ai valori produttivi sono riportati in figura 6.12.

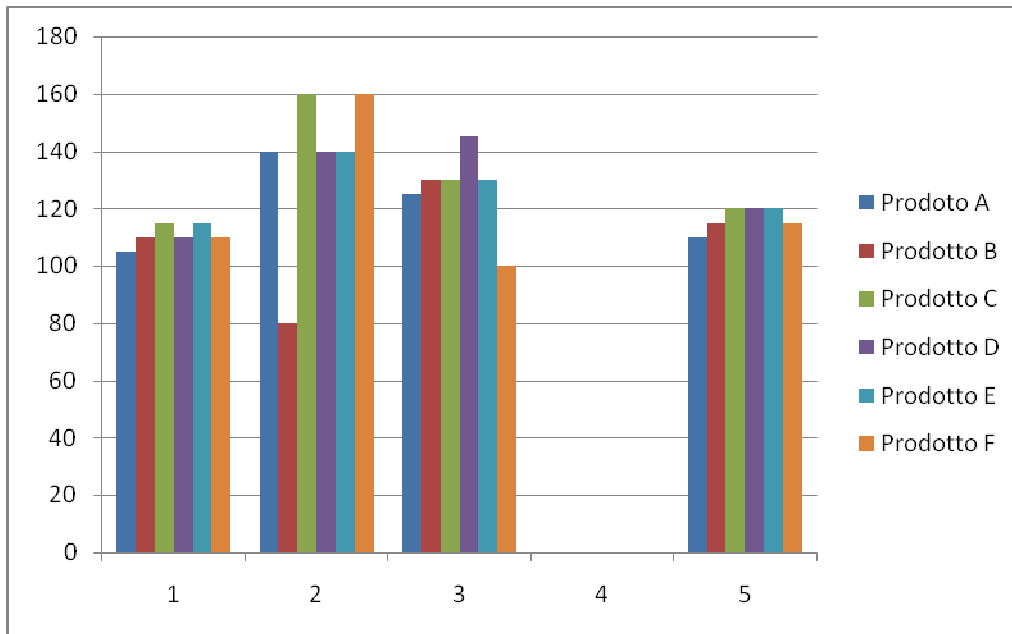


Fig. 6.12 Diagramma di utilizzazione stazione dei primi 6 modelli.

Come si nota ci sono, in particolare nelle stazioni 2 e 3, vi sono diversi modelli che eccedono il Tempo ciclo di 120 min con un'alta variabilità dei tempi introdotta dalla diversità dei modelli.

Gl indici di Line Efficiency e di Smoothness Index relativi per questa soluzione sono

$$T_{sum} = \sum_k \sum_j t_j \cdot X_{j,k} = \sum_k t(S_k)$$

$$T = m \cdot t_c$$

$$E = T_{sum} / t_c = 0,98$$

$$SX = \sqrt{(\sum_k t_c - t(S_k))^2} = 3,74$$

Entrambi i valori sono buoni considerando che E max=1 e che SX vicino a valori uguali a 4 sono considerati ottimi (School, 1996).

Il MSP è stato affrontato come segue:

L'obiettivo considerato riguarda i tempi ed in particolare il livellamento del carico di lavoro tra le stazioni, con una produzione in tiro, con stazioni coordinate e basii WIP. Fissata soluzione di bilanciamento e mix richiesto dal mercato il problema viene affrontato introducendo una nuova funzione obiettivo con un nuovo

modello lineare, quindi di tipo esatto, che tenga conto dei vincoli sui tempi. In particolare il modello introdotto è il seguente, con le solite notazioni:

$X_{i,m} = 0,1$, variabile binaria che vale 1 se il modello m è nella posizione i , 0 altrimenti

$\Delta_{m,k} = \tau_{m,k} - t_c, >0$ workoverload nella stazione, <0 idle time nella stazione

Definendo una variabile in maniera induttiva, che descrive il livello di carico positivo (workoverload) o negativo (idle time) arrivati all' i esimo modello della sequenza nella stazione k

$$S_{0,k} = 0$$

$$S_{1,k} = X_{1,m} \cdot \Delta_{m,k}$$

$$S_{i,k} = S_{i-1,k} + X_{i,m} \cdot \Delta_{m,k}$$

Con

$k=1, \dots, K$ numero di stazioni

$$i=1, \dots, I = \sum_m d_m$$

$m=1, \dots, M$, modelli assemblati nella linea

e dove la funzione obiettivo da Minimizzare viene calcolata come segue:

$$F(X_{i,m}) = \sum_k \left| \sum_i S_{i,k} \right|$$

Tale funzione obiettivo può anche essere riscritta in questo modo essendo gli $X_{i,m} \cdot \Delta_{m,k}$ moltiplicati per un peso

$w_i = (D + 1) - i$, con D total domanda nel periodo per il mix considerato

che tiene conto del fatto che i valori che vengono prima vengono sommati più volte, dato il carattere ricorsivo della variabile.

Poiché:

$$S_{1,k} = X_{1,m} \cdot \Delta_{m,k} = a$$

$$S_{2,k} = S_{1,k} + X_{2,m} \cdot \Delta_{m,k} = a + b$$

Quindi

$$F(X_{i,m}) = \sum_k \left| \sum_i S_{i,k} \right| = \left| S_{1,k} + S_{2,k} \right| = a + a + b = 2a + b$$

La Funzione obiettivo si può allora scrivere anche come:

$$F(X_{i,m}) = \sum_k \left| \sum_i w_i \cdot (X_{i,m} \cdot \Delta_{m,k}) \right|$$

La funzione obiettivo ha il compito di individuare una sequenza che mantenga mediamente, fissata una stazione, il tempo di lavoro vicino al tempo ciclo al variare dei modelli introdotti.

Dai dati storici sono stati ricavati i mix medi settimanali e le relative varianze su una base dati di un anno.

Al fine di valutare e validare il modello proposto sono stati definiti e studiati 4 mix di riferimento che hanno tali caratteristiche:

Mix 1: mix che si avvicina alla produzione media settimanale di 19 modelli.

Mix 2 e 3: mix critici poiché aumentano la produzione dei modelli di dimensioni maggiori, elemento che mette in crisi il sistema dei buffer (dimensioni 5 m). Vengono inoltre utilizzati modelli che utilizzano assiduamente la stazione 4 (prodotto M e prodotto I), il mix 3 invece ha una maggiore variabilità in ingresso.

Mix 3: mix con maggiore volumi sui prodotti best-seller, riducendo la variabilità in ingresso

Prodotto	Domanda sett	Dev standard	Mix 1	Mix 2	Mix 3
A	4,6	1,6	4	2	5
B	2	1,2	1	0	0
C	1,7	0,7	2	1	3
D	1,3	0,5	1	1	3
E	1,3	0,2	1	0	1
F	1,1	0,5	1	1	2
G	1,1	0,3	1	2	1
H	1,1	0,5	1	1	0
I	1,1	0,4	1	2	0
L	0,8	0,5	1	2	1
M	0,7	0,4	1	2	1
N	0,7	0,3	1	2	1
O	0,7	0,3	1	2	1
P	0,4	0,2	1	0	0
Q	0,4	0,4	1	1	0

Fig. 6.13 Mix produttivo settimanale e test mix

Per ottenere la soluzione dal modello proposto è stato utilizzato il software di programmazione lineare GAMS e per tesare la soluzione il software di simulazione e-M Plant.

La soluzione di sequencing ottenuta è la seguente:

Sequenz a	Mix 1	Mix 2	Mix 3
1	I	I	C
2	M	L	F
3	L	N	L
4	D	C	I
5	A	F	F
6	A	A	C
7	A	H	N
8	F	L	A
9	O	D	A
10	B	N	C
11	C	Q	D
12	H	N	D
13	Q	O	D
14	N	A	A
15	N	A	A
16	G	G	G
17	A	O	A
18	C	M	M
19	E	I	O

Fig. 6.14 Soluzione di sequencing su test-mix

La soluzione è stata da prima testata con simulatore. Gli input presi in esame sono stati:

- Soluzione di stazioni di assemblaggio rispetto alla soluzione di bilanciamento proposta
- Tempo ciclo di 120 min, ossia lancio nuovo modello in produzione ogni 120 min
- Lista dei modelli entranti come da soluzione sequencing su test-mix scelti
- Caratteristiche dei prodotti in esame: tempo di assemblaggio per ciascuna stazione, con varianza rispetto alle operazioni eseguite calcolata come medio geometrica delle operazioni eseguite sul modello dalle operazioni scelte, e caratteristiche fisiche del modello assemblato, in particolare lunghezza, che è la caratteristica che porta a saturazione il buffer di lunghezza 5 metri.

Output ottenuti sono, con una simulazione di 720 ore (4,5 mesi lavorativi), senza sequencing ottimizzato per il mix storico (mix 1):

Name	Entries	Exits	Max_Cont%	age_Wa	Waiting	WaitingTime
Buffer4	338	338	3	85,51	42525:15:42:06.1250	
Buffer3	338	338	3	98,91	35429:16:08:57.0750	
Buffer2	341	341	3	81,46	48024:10:31:50.5900	
Buffer1	344	344	3	63,15	57718:22:41:10.4200	
StazPE	338	338	1	7,80	3392:08:10:28.6700	
StazPD	338	338	1	82,83	33924:20:24:42.9750	
StazPC	339	339	1	2,47	34017:48:11.4000	
StazPB	342	342	1	0,51	3433:42:17.6050	
StazPA	345	345	1	0,47	3463:23:03.9350	
Source	346	346	1			
Drain	337	337	1			

Name	%Wo	WorkingTime	%_B	Blocks	BlockingTime
Buffer4	0	424 2:09:31.0850	14,18	764	06:08:22.7900
Buffer3	0	353 2:20:31.7350	0,76	55	30:31.1900
Buffer2	0	479 2:12:28.6900	18,23	95	5:11:15:40.7200
Buffer1	0	577 1:56:32.4600	36,57	207	10:23:22:17.1200
StazPE	92,20	338 27:15:49:31.3300	0,00	00	00.0000
StazPD	12,63	338 3:19:00:00.0000	4,52	391	08:35:17.0250
StazPC	97,40	339 29:05:17:21.3300	0,13	154	27.2700
StazPB	96,72	342 29:00:25:19.0600	2,76	21	19:52:23.3350
StazPA	93,18	345 27:22:54:13.9500	6,35	591	21:42:42.1150

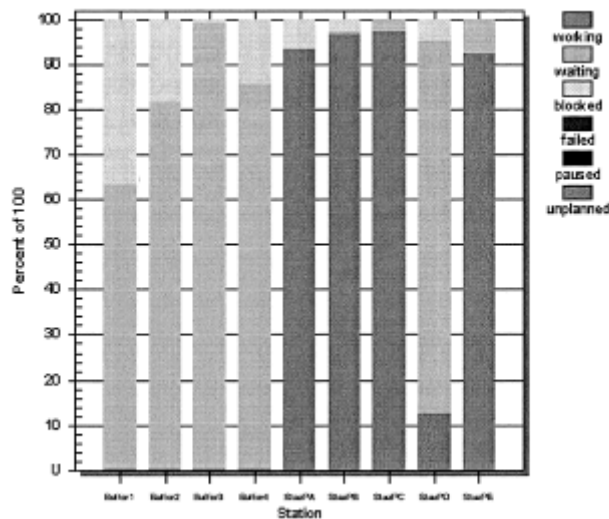


Fig. 6.15 Prestazioni linea su mix 1 random

Si vede innanzitutto che la soluzione di bilanciamento utilizzata è buona con elevate percentuali di working time presso le stazioni. Alta criticità tuttavia sui buffer 1 e 2, che sono i buffer che assorbono tutta la variabilità del sistema in questione, con elevati tempi di blocco e quindi saturi. (Fi. 6.15)

Eseguendo ora un'analisi del mix confrontando una sequenza randomizzata (a sx) contro una sequenza ottimizzata con il modello introdotto (a dx) per il Mix 1:

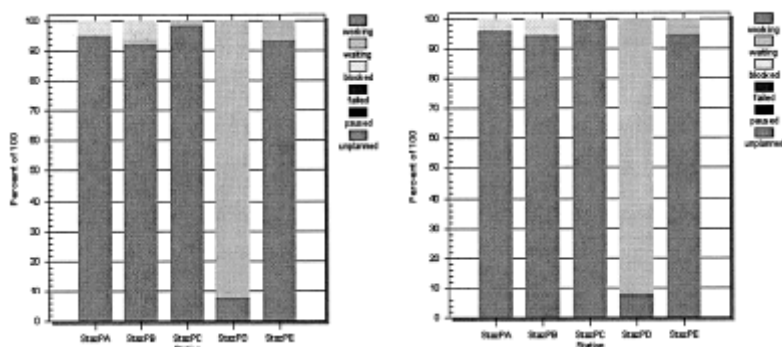


Fig. 6.16 Prestazioni linea su mix 1 random vs sequencing

Come si può vedere si ha un incremento delle prestazioni della linea leggero sulla sequenza ottimizzata, in particolare nella stazione 2 e 5. Tuttavia il fatto di ottenere un miglioramento solo lieve era prevedibile dato che la simulazione è fatta sullo stesso mix storico sul quale è stato fatto il bilanciamento. Nel momento in cui il mix inizierà a variare il sequencing darà in maniera maggiore i propri vtaggi.

Mix 2: mix critico poiché aumentano la produzione dei modelli di dimensioni maggiori, elemento che mette in crisi il sistema dei buffer (dimensioni 5 m). Di seguito i risultati. In figura 6.17 a soluzione random, in 6.17 b soluzione sequencing

Name	Entries	Exits	Max_Co nt	%Wa g	Waitin WaitingTime
Buffer4-ran	447	447	3	71,83	61028:17:31:55.8700
Buffer3-ran	447	447	2	98,58	46839:10:23:55.4350
Buffer2-ran	451	451	3	60,53	68624:05:06:22.1000
Buffer1-ran	454	454	3	38,33	72915:07:55:33.3250
StazPE-ran	447	447	1	8,54	4483:10:00:32.1300
StazPD-ran	447	447	1	70,50	44828:04:48:59.8400
StazPC-ran	448	448	1	1,26	44912:07:42.1300
StazPB-ran	452	452	1	0,36	4533:25:25.0000
StazPA-ran	455	455	1	0,19	4561:48:00.0000
Source-ran	456	456	1		
Drain_mix2rando m	446	446	1		
Buffer4-seq	457	457	3	75,97	64330:09:18:36.3750
Buffer3-seq	458	458	2	97,95	50739:04:19:04.9600
Buffer2-seq	460	460	3	58,72	78323:11:42:44.1950
Buffer1-seq	462	462	2	57,49	70122:23:56:41.0950
StazPE-seq	455	455	1	6,84	4562:17:42:40.0000
StazPD-seq	458	458	1	65,11	45926:01:01:10.3500
StazPC-seq	459	459	1	0,57	4605:30:50.0000
StazPB-seq	461	461	1	0,48	4624:35:25.0000
StazPA-seq	463	463	1	0,00	4640.0000
Drain_mix2seq	454	454	1		
Source	464	464	1		

Name	%W	Working	WorkingTime	%B	Blocks	BlockingTime
Buffer4-ran	0	609	2:46:34.0750	27,80	2180	11:03:41:30.055
Buffer3-ran	0	467	3:06:15.0000	1,03	15	10:29:49.5650
Buffer2-ran	0	686	2:50:41.9650	40,10	2640	15:16:02:55.935
Buffer1-ran	0	728	2:32:20.7200	61,40	3890	24:13:32:05.955
StazPE-ran	91,5	447	0	0,00	00	00.0000
StazPD-ran	26	447	0	3,47	100	1:09:21:00.1600
StazPC-ran	98,7	448	0	0,00	00	00.0000
StazPB-ran	94,7	452	0	4,90	71	1:23:04:19.4000
StazPA-ran	92,2	455	0	7,50	147	3:00:32:46.6700
Source-ran						
Drain_mix2random						
Buffer4-seq	0	643	2:28:46.6700	23,70	253	9:12:12:36.9550
Buffer3seq	0	506	3:10:50.0000	1,71	24	16:30:05.0400
Buffer2-seq	0	782	2:45:41.2900	40,94	2990	16:09:31:34.515
Buffer1-eq	0	700	2:48:46.3500	42,20	2340	16:21:14:32.555
StazPE-seq	93,1	455	0	0,00	00	00.0000
StazPD-seq	29,3	458	0	55,70	140	2:05:28:49.6500
StazPC-seq	99,4	459	0	0,00	00	00.0000
StazPB-seq	95,8	461	0	3,67	69	1:11:16:25.3350
StazPA-seq	94	463	0	5,99	137	2:09:34:52.6050

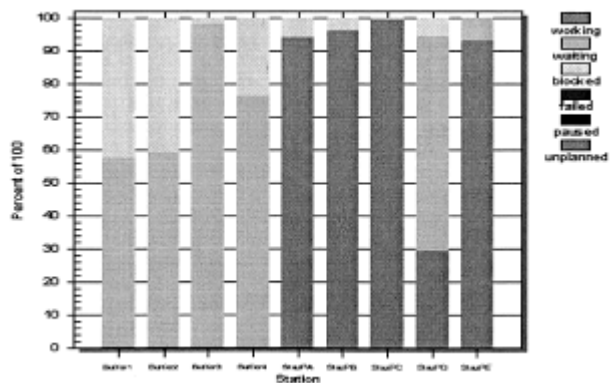
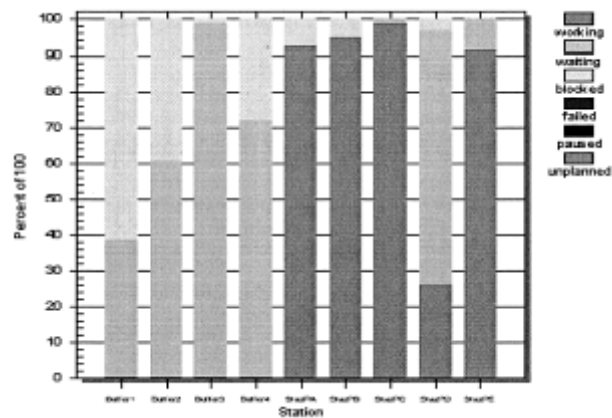


Fig. 6.17 a e b Prestazioni linea su mix 2 random vs sequencing

Come si vede in questo caso la presenza di un mix critico fornisce su mix random basse prestazioni, mentre nel caso sequencing abbiamo migliori working time, minori tempi di bloccaggio dei buffer.

In particolare una riduzione del 20 % dei tempi di blocco del buffer 1, del 4% del buffer 4 e l'umento medio dell'1,5% del working time. Una riduzione di 37 minuti del Lead time su un totale di 20 ore. Rispetto ai costi della produzione della linea questo corrisponde ad un aumento di produttività di 2.500.000€/anno.

Mix3: mix con maggiore volumi sui prodotti best-seller. Nella figura 6.18 a e 6.18 b i risultati random e sequencing.

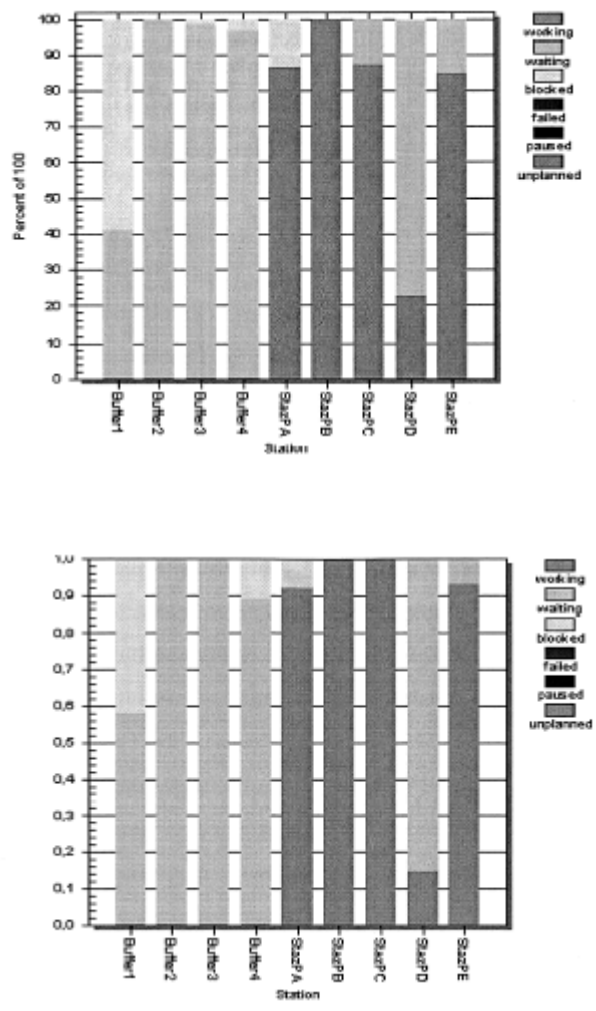


Fig. 6.18 a e b Prestazioni linea su mix 2 random vs sequencing

Come si vede chiaramente il sistema risponde in maniera ancora differente, e ciò denota, come era prevedibile, una forte sensibilità al mix. In questo caso la sequenza ottimizzata offre una riduzione dei tempi di bloccaggio pari al 17% ed un aumento del 12% dei tempi di lavorazione nella stazione e 2.

Dai risultati ottenuti sfruttando il simulatore si ottiene che:

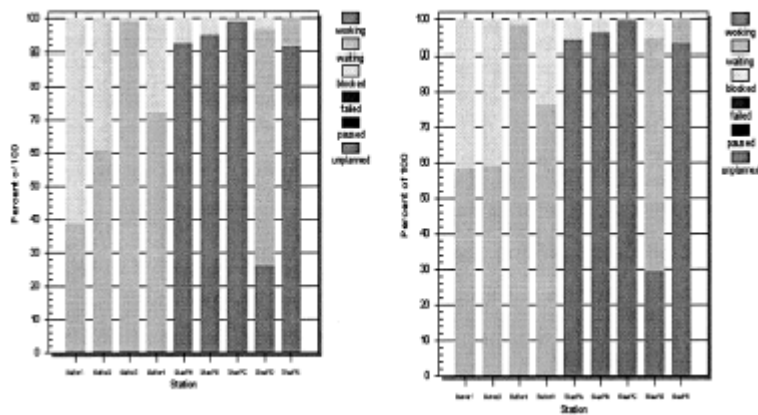
Il sistema è fortemente influenzato dal mix

Più ci si allontana dallo storico su cui è stato fatto il bilanciamento, più le sequenze ottimizzate orono vantaggi considerevoli, e questo nel caso reale di una produzione pull tirata dal mercato è un fattore critico di successo

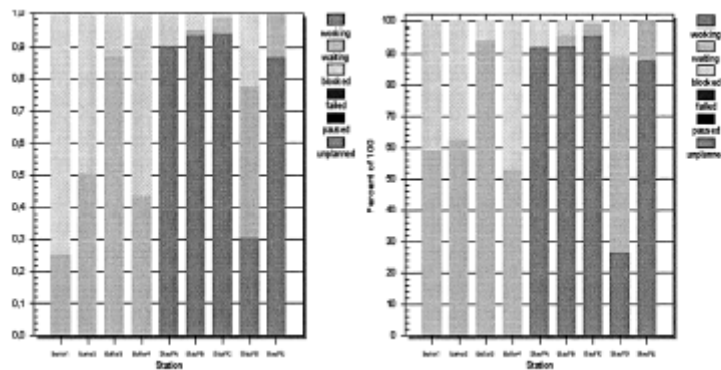
La buona risposta del modello matematico fornito porta alla riduzione considerevole dei tempi di bloccaggio per i buffer 1 e 2 e il relativo aumento dei tempi di lavoro per le stazioni ad essi vicino. Questo dimostra nel caso di buffer di dimensione limitata, vincolati in capacità, come nel caso in questione, e dove la stessa dipende dal mix presente (lunghezza diversa dei modelli con distanza fissata tra le stazioni), che il sequencing diventa ancora più necessario.

Si esegue ora un'analisi sulla criticità dei buffer, visto che il modello proposto ha l'obiettivo di minimizzare la saturazione dei buffer di una linea a cadenza non imposta con buffer a capacità limitata. Di seguito i diagrammi per le varie dimensioni dei buffer in fig. 6.19 1,b,c

Buffer 5m



Buffer 2m



Buffer 7m

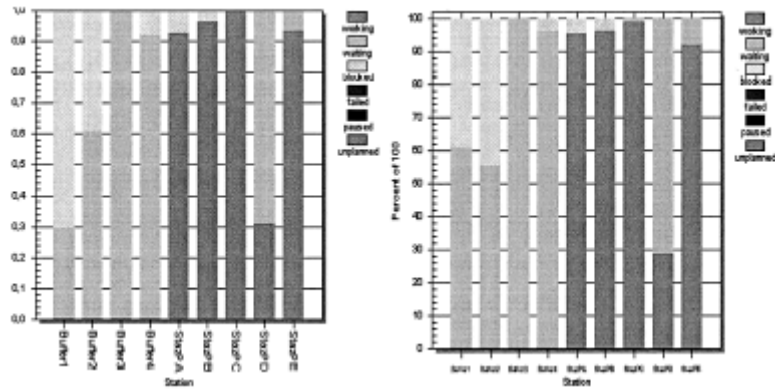


Fig. 6.19 a,b,c Prestazioni linea su mix 1 random (sx) vs sequencing (dx) con varie dimensioni di buffer

Il sistema presenta una forte sensibilità ai buffer. In particolare si vede come con dimensioni ridotte (quindi con forte interdipendenza tra le stazioni) i tempi di bloccaggio diminuiscono fortemente con sequenza ottimizzata nell'ordine del 25% per il buffer 1, il 12% per il buffer 2 e l'11% per il buffer 4, con una forte diminuzione anche dei tempi di bloccaggio per la stazione 4. Di seguito i risultati numerici per il caso di buffer a 2 m

2mrandom

Name	Entries	Exits	%age_Wa	Waiting	WaitingTime
Buffer4	107	107	43,22	1124:07:44:20.0000	
Buffer3	107	107	86,69	1088:16:02:50.0000	
Buffer2	108	108	50,16	1105:00:22:50.0000	
Buffer1	110	110	25,10	1182:12:14:01.5250	
StazPE	106	106	13,34	1071:08:01:40.0000	
StazPD	107	107	47,10	1084:17:02:30.0000	
StazPC	108	108	4,14	1099:56:40.0000	
StazPB	109	109	1,42	1103:25:10.0000	
StazPA	111	111	2,17	11245:00.0000	
Source	112	112			
Drain_mix2random	105	105			

0

2m sequencing

Name	Entries	Exits	%age_Wa	Waiting	WaitingTime
Buffer4	107	107	52,78	1335:06:39:52.3500	
Buffer3	109	109	94,08	1159:09:47:27.8250	
Buffer2	111	111	62,05	1336:04:55:12.9500	
Buffer1	113	113	58,91	1245:21:23:05.3250	
StazPE	107	107	12,32	1081:05:34:00.0000	
StazPD	108	108	63,03	1096:07:15:58.4750	
StazPC	110	110	2,87	1116:53:27.5000	
StazPB	112	112	3,52	1138:26:15.0000	
StazPA	114	114	0,00	1150.0000	
Drain_mix2seq	107	107			
Source	115	115			

2mrandom

Name	%age_WoWorking	WorkingTime	%age_B Blocks	BlockingTime
Buffer4	0,00	111 17:50.0000	56,65	815:15:57:50.0000
Buffer3	0,00	107 17:50.0000	13,19	20 1:07:39:20.0000
Buffer2	0,00	109 18:00.0000	49,72	854:23:19:10.0000
Buffer1	0,00	117 18:20.0000	74,78	1047:11:27:38.4750
StazPE	86,66	1068:15:58:20.0000	0,00	00.0000
StazPD	30,35	1073:00:50:00.0000	22,55	602:06:07:30.0000
StazPC	94,13	1089:09:54:30.0000	1,73	54:08:50.0000
StazPB	93,55	1099:08:30:40.0000	5,03	22 12:04:10.0000
StazPA	90,07	1119:00:10:40.0000	9,61	5023:04:20.0000

2m sequencing

Name	%age_WoWorking	WorkingTime	%age_B Blocks	BlockingTime
Buffer4	0,00	132 1,012269	47,07	764:16:58:10.8000
Buffer3	0,00	114 1,003704	57,63	20 13:49:49.6750
Buffer2	0,00	132 1,021065	37,79	613:18:41:39.5500
Buffer1	0,00	123 1,038426	40,93	624:02:13:22.1750
StazPE	87,68	1078:18:26:00.0000	0,00	00.0000
StazPD	26,45	1082:15:29:20.0000	1,05	45 1:01:14:41.5250
StazPC	95,71	1109:13:41:32.5000	1,42	53:25:00.0000
StazPB	93,60	1129:05:31:32.5000	4,18	16 10:02:12.5000
StazPA	92,11	1149:05:03:32.5000	7,89	31 18:56:27.5000

Si può concludere quindi dicendo che:

- Esiste una forte sensibilità alle dimensioni dei buffer
- La diminuzione delle dimensioni dei buffer peggiora le prestazioni del sistema rendendo maggiore la dipendenza reciproca tra le stazioni
- Il fatto di gestire una sequenza ottimizzata riduce le problematiche che si possono avere migliorando le prestazioni, tanto più quanto più critico è l'elemento buffer, ossia tanto più la capacità è limitata.

Questo dimostra implicitamente la bontà del modello prop

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato dato ampio respiro a tutte le problematiche inerenti all'assemblaggio evidenziando tutti gli aspetti generali e approfondendo poi per alcune tipologie di sistemi le tematiche relative ai fattori di maggior influenza sulle prestazioni e quindi sui costi.

Come chiarito nell'introduzione i mercati moderni richiedono capacità di risposta molto veloce con costi di produzione contenuti. Questo vale in generale per tutte le metodologie di produzione. L'assemblaggio essendo un'attività che si pone tipicamente in fondo al ciclo produttivo di un prodotto porta con se non solo tutte le problematiche relative alle precedenti fasi del processo, ma anche costituisce sempre un'attività con forte potenzialità di valore aggiunto e quindi un fattore strategico di successo rilevante. In questi ultimi decenni, in parallelo con le moderne filosofie di produzione, si sono applicate nella produzione industriale tecniche e metodi sempre più mirati a sistemi di assemblaggio flessibili, capaci cioè di variare in maniera rapida il mix produttivo, ma che allo stesso tempo fossero efficienti in termini di costo, affiancando la ripetitività delle operazioni la capacità di produrre differenti modelli.

Questo lavoro si è concentrato quindi, pur trattando l'assemblaggio nella sua generalità, su linee di tipo mixed model, linee cioè flessibili multi prodotto, cercando di fornire un approccio integrato verso tutti quegli elementi di forte influenza sul sistema, che spesso non vengono considerati negli in maniera globale negli obiettivi, come il layout delle linee, le metodologie di ottenimento dei task time e la costruzione di modelli medi per il bilanciamento, il tipo di funzione obiettivo da utilizzare, le sequenze di introduzione dei modelli, la variabilità della domanda e del mix produttivo. Questo approccio offre dal punto di vista scientifico una visione importante per i confini della ricerca in questo ambito. Come dimostrato dall'approfondimento in letteratura solo da alcuni decenni si è spostato l'interesse sui sistemi flessibili di assemblaggio e a fronte di visuali critiche su poche dimensioni del problema. L'obiettivo della ricerca sarà sempre più quello di inglobare aspetti diversi e tra loro relazionati con un approccio integrato e completo, spendibile così nel mondo industriale.

In particolare, rispetto al layout produttivo è stata fatta un'ampia analisi dello stato dell'arte e degli obiettivi utilizzati rispetto le varie tipologie di layout. E' stato inoltre illustrata una metodologia particolare relativa a sistemi di assemblaggio con layout a tavola rotante per mix di prodotti a bassi volumi specifici. E' stata anche analizzata l'influenza della variabilità del mix produttivo e della domanda dei prodotti sui calcoli dei task time per una linea mixata introducendo una metodologia di valutazione integrata per la valutazione delle funzioni obiettivo e del metodo di ottenimento del task time per il prodotto medio caratteristico. Questo è un elemento importante per la valutazione del metodo di bilanciamento per sistemi flessibili di assemblaggio, in quanto dovendo ridurre il problema ad un sistema a singolo modello, ottenuto a partire da dati statici di domanda, si può incorrere in forti errori, soprattutto in caso di variazioni del mix produttivo e della domanda globale. Tale metodologia permette di testare il miglior metodo di calcolo dei tempi, e quindi in funzione del contesto industriale guidare all'utilizzo della migliore metodologia di bilanciamento. Nel breve termine è importante per sistemi flessibili, gestire anche la schedulazione e quindi la sequenza dei prodotti al variare del mix, in modo da ottenere le migliori prestazioni del sistema. E' stato a tal proposito approfondito il sequencing delle linee di assemblaggio, valutando i diversi approcci presenti in letteratura e i diversi modi di risolvere il problema, anche in funzione delle diverse possibilità offerte dai modelli e dagli strumenti disponibili. E' stata inoltre introdotta una metodologia, supportata da dati sperimentali, di sequenziamento nell'ottica di ottimizzare le prestazioni del sistema e di valutare l'incidenza e l'impatto sui buffer di disaccoppiamento per linee a cadenza non imposta.

BIBLIOGRAFIA

Aase, G.R., Olson, J.R., Schniederjans, M.J., 2004. U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research* 156, 698–711

Aase, G.R., Schniederjans, M.J., Olson, J.R., 2003: U-OPT: An analysis of exact U-shaped line balancing procedures. *International Journal of Production Research* 41, 4185–4210.

Agnētis, A., Ciancimino, A., Lucertini, M., Pizzichella, M., 1995. Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research* 33, 333–350.

Agrawal, P.K., 1985. The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 23, 403–421.

Ahmadi, R.H., Dasu, S., Tang, C.S., 1992. The dynamic line allocation problem. *Management Science* 38, 1341–1353.

Ahmadi, R.H., Wurgaft, H., 1994. Design for synchronized flow manufacturing. *Management Science* 40, 1469–1483.

Ajenblit, D.A., Wainwright, R.L., 1998. Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, AK, pp. 96–101.

Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S., 1983. A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. *International Journal of Production Research* 21, 755–770.

Amen, M., 1997. Ein exaktes Verfahren zur kostenorientierten Fließbandabstimmung. In: Zimmermann, U., et al. (Eds.), *Operations Research Proceedings 1996*. Springer, Berlin, pp. 224–229.

Amen, M., 2000a. An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics* 64, 187–195.

- Amen, M., 2000b. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics* 68, 1–14.
- Amen, M., 2001. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics* 69, 255–264.
- Amen, M., 2006. Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research* 168, 747–770.
- Arcus, A.L., 1966. COMSOAL A computer method of sequencing operations for assembly lines. *The International Journal of Production Research* 4(4)~ 259-277.
- Arcus, A.L., 1966. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 259–277. 26
- Askin, R.G., Zhou, M., 1997. A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research* 35, 3095–3105.
- Atzeni, P. et al., 2006. *Basi di Dati*. McGraw Hill.
- Baker, K.R., 1974. *Introduction to sequencing & scheduling*. John Wiley & Son, Inc.
- Baker, K.R., Powell, S.G., Pyke, D.F., 1990. Buffered and unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 3, 200–223.
- Balakrishnan, A., Vanderbeck, F., 1999. A tactical planning model for mixed-model electronics assembly operations. *Operations Research* 47, 395–409.
- Bard, J.F., 1989. Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research* 27, 1005–1018.
- Bard, J.F., Dar-El, E., Shtub, A., 1992. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research* 30, 35–48.
- Bard, J.F., Shtub A., Joshi S.B., 1994. Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. In *International Journal of Production Research* 32, 2431-2454.
- Bartholdi, J.J., 1993. Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research* 31, 2447–2461.
- Battini D., Faccio M, Persona A, Sgarbossa F. (2007). The Logistic Game. In: *Proceeding. 25th International Conference Of The System Dynamics Society*. July 29- August 2 2007
- Battini D., Faccio M, Persona A, Sgarbossa F. (2007). Linking Ergonomics Evaluation And Assembly System Design Problem In A New Integrated Procedure. In: *Proceeding Icp7. 19th International Conference On Production Research, Icp7*. July 29-August 3 2007.
- Battini D., Faccio M, Persona A, Sgarbossa F. (2008) Optimal Feeding System in an Assembly System, GBID 2008. *Global Business Innovation Conference*
- Battini D., Faccio M, Persona A, Sgarbossa F. , 2007, Design a complex production system: A game about Logistics, *International Journal of Production Planning & Control*, in press (ALLEGATO)
- Battini D., Faccio M., Ferrari E., Persona A., Sgarbossa F., 2006. Design configuration for a mixed-model assembly system in case of low product demand. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-006-0576-5, 189-200. (ALLEGATO)
- Bautista, J., Cano J., 2005. Minimizing work overload in mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 2-15
- Bautista, J., Pereira, J., 2006. Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, to appear.

- Bautista, J., Pereira, J., 2002. Ant algorithms for assembly line balancing. *Lecture Notes in Computer Science* 2463, 65–75.
- Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M., Companys, R., 2000. Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 2404–2409.
- Baybars, I., 1986. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science* 32, 909–932.
- Baykasoglu, A., Özbakir, L., 2006. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-005-0322-4.
- Becker, C., Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *Euro-pean Journal of Operational Research* 168, 694–715.
- Bellman R. Dreyfus S.E., 1962. *Applied dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton.
- Berger, I., Bourjolly, J.-M., Laporte, G., 1992. Branch-and-Bound algorithms for the multi-product assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 58, 215–222.
- Bolat A., 1994. Sequencing jobs on an automobile assembly line. Objective and procedure. *International Journal of Production Research* 32, 1219-1236.
- Bolat A., Savsar M., Al Fawzan, 1994. Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines. *Computer & Operations Research* 21, 487-498.
- Bolat, A., 1997,. Efficient method for sequencing minimum job sets on mixed model assembly lines. *Naval Research Logistics*, 44, 419–437.
- Boucher, T.O., 1987. Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research* 25, 513–524.
- Boyer R., 2007. *Fordismo e postfordismo*
- Boysen N., Flieder M., Scholl A., 2007. The product rate variation problem and its relevance in real world mixed model assembly lines. *Jena Research Papers in Business and Economics*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1-11 .
- Boysen, N., 2005. *Variantenfließfertigung*. Gabler, Wiesbaden.
- Boysen, N., Fliedner, M., 2006. A versatile algorithm for assembly line balancing. Working paper, University of Hamburg, Germany.
- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R.H., Neumann, K., Pesch, E., 1999. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods. *European Journal of Operational Research* 112, 3–41.
- Bukchin, J., Dar-El, E.M., Rubinovitz, J., 1997. Team oriented assembly system design: A new approach. *Inter-national Journal of Production Economics* 51, 47–57.
- Bukchin, J., Dar-El, E.M., Rubinovitz, J., 2002. Mixed-model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers and Industrial Engineering* 41, 405–421.
- Bukchin, J., Masin, M., 2004. Multi-objective design of team oriented assembly systems. *European Journal of Operational Research* 156, 326–352.
- Bukchin, J., Rubinovitz, J., 2003. A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. *IIE Transactions* 35, 73–85.
- Bukchin, J., Tzur, M., 2000. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions* 32, 585–598.

- Bukchin, Y., Meller, R.D., 2005. A space allocation algorithm for assembly line components. *IIE Transactions* 37, 51-61.
- Bukchin, Y., Rabinowitch, I., 2005. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. To appear: *European Journal of Operational Research*.
- Burns, L.D., Daganzo, C.F., 1987. Assembly line job sequencing principles. *International Journal of Production Research* 25, 71-99.
- Buxey, G.M., 1974. Assembly line balancing with multiple stations. *Management Science* 20, 1010-1021.
- Buxey, G.M., Sadjadi D., 1976. Simulation studied aof conveyor paced assembly lines with buffer capacity. *International Journal of Production Research* 14, 607-624.
- Buxey, G.M., Slack, N.D., Wild, R., 1973. Production flow line system design - A review. *AIEE Transactions* 5, 37-48.
- Buzacott J.A., 1990. Abandoning the moving assembly line: models of humans operators and job sequencing. *International of production research* 28, 821-839.
- Buzacott, J.A., 1968. Prediction of the efficiency of production systems without internal storage. *International Journal of Production Research* 6, 173-188. 27
- Buzacott, J.A., 1990. Abandoning the moving assembly line: Models of human operators and job sequencing. *International Journal of Production Research* 28, 821-839.
- Buzacott, J.A., Shanthikumar, J.G., 1993. *Stochastic models of manufacturing systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Capacho, L., Pastor, R., 2004. ASALBP: The alternative subgraphs assembly line balancing problem, Working Paper, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain.
- Carey E.J, Gallwey T.J., Evaluation of human postures with computer aids and virtual workplace designs , 2002, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 40, No.4, pp. 825-843.
- Caridi M., Sianesi A., 1999, Multi-agent system in production planning and control: an application to the scheduling of mixed-model assembly lines, *International Journal of Production Economics* 68, 29-42
- Carnahan, B.J., Norman, B.A., Redfern, M.S., 2001. Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions* 33, 875-887.
- Carraway, R.L., 1989. A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science* 35, 459-471.
- Carter, J.C., Silverman, F.N., 1984. A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management* 4, 145-157.
- Celano G., Costa A, Fichera S., 2004. A comparative analysis of sequencing heuristic for solvine the Toyota goal chasing problem. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 20, 573-581.
- Celano G., Costa A., Fichera S., Perrone G., 2001. Human factor policy testing in the sequencing of manual mixed model assembly lines. *Computer & Operations Research* 21, 39-59
- Celano G., Fichera S., Grasso V., La Commare U., Perrone G., 1991. An evolutionary approac to multi-objective scheduling of mixed model assembly lines. *Computer and Industrial Engineering* 37, 69-73.
- Chakravarty, A.K., 1988. Line balancing with task learning effects. *IIE Transactions* 20, 186-193.
- Chakravarty, A.K., Shtub, A., 1985. Balancing mixed model lines with in-process inventories. *Management Science* 31, 1161-1174.

- Chakravarty, A.K., Shtub, A., 1986. A cost minimization procedure for mixed model production lines with normally distributed task times. *European Journal of Operational Research* 23, 25–36.
- Chakravarty, A.K., Shtub, A., 1986. Dynamic manning of long cycle assembly lines with learning effect. *IIE Transactions* 18, 392-397
- Chase, R.B., 1974. Survey of paced assembly lines, *Industrial Engineering* 6 (2), 14–18.
- Chiang, W.-C., Urban, T.L., 2002. A hybrid heuristic for the stochastic U-line balancing problem, Working Paper, University of Tulsa, Oklahoma, USA.
- Chow W.M., 1987. Buffer capacity analysis for sequential production lines with variable process times. *International Journal of Production Research* 25, 1183-1196.
- Cook S.A., 1971. The complexity of theorem proving procedures. *Proceedings of the 3rd annual ACM symposium on theory of computing*, New York, 151-158.
- Daganzo, C.F., Blumenfeld, D.E., 1994. Assembly system design principles and tradeoffs. *International Journal of Production Research* 32, 669–681.
- Dallery, Y., Gershwin, S.B., 1992. Manufacturing flow line systems: A review of models and analytical results. *Queueing Systems Theory and Applications* 12, 3–94.
- Dar-El, E.M., 1978. Mixed model assembly line sequencing problems. *Omega* 6, 313-323.
- Dar-El, E.M., Cothor R.F., 1975. Assembly line sequencing for model mix. *International Journal of Production Research* 13, 463-477.
- Dar-El, E.M., Rabinovitch, M., 1988. Optimal planning and scheduling of assembly lines. *International Journal of Production Research* 26, 1433–1450.
- Dar-El, E.M., Rubinovitch, Y., 1979. MUST – A multiple solutions technique for balancing single model assembly lines. *Management Science* 25, 1105–1114.
- De Looze M.P., Van Rhijn J.W., Van Deursen J., Tuinzaad G.H. and Reijneveld C.N, 2003, A participatory and integrative approach to improve productivity and ergonomics in assembly, *Int. J. Production Planning and Control*, Vol.14, No.2, pp.174-181.
- Decker M., 1993. *Variantenfließfertigung*. Physica, Heidelberg.
- Decker M., Capacity smoothing and sequencing for mixed model lines. *International Journal of Production Economics* 30-31, 31-42
- Deckro R.F., 1989. Balancing cycle time and work station. *IIE Transactions* 21, 106-111.
- Deckro, R.F, 1989. Balancing cycle time and workstations. *IIE Transactions* 21, 106–111.
- Ding F.Y., Cheng L., 1993. A simple sequencing algorithm for mixed model assembly lines in just-in-time production systems. *Operation Research Letters* 13, 27-36.
- Ding F.Y., Zhu J., Sun H., 2004. Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives. *International Journal of Production Economics* 102, 108-131.
- Dobson, G., Yano, C.A., 1994. Cyclic scheduling to minimize inventory in a batch flow line. *European Journal of Operational Research* 75, 441–461.

- Dolgui, A., Ereemev, A., Kolokolov, A., Sigaev, V., 2002. A genetic algorithm for allocation of buffer storage capacities in production line with unreliable machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 1, 89–104.
- Dolgui, A., Guschinski, N., Levin, G., 1999. On problem of optimal design of transfer lines with parallel and sequential operations. In: Fuertes, J.M. (Ed.), *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Barcelona, Spain, vol. 1, 1999, pp. 329–334.
- Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., 2001a. Decomposition methods to optimize transfer line with parallel and sequential machining. In: Binder, Z. (Ed.), *Management and control of production and logistics*, Proceedings of the 2nd IFAC Conference, Grenoble, France, 2000, vol. 3. Elsevier, Amsterdam, pp. 983–988.
- Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., 2003. Optimal design of automated transfer lines with blocks of parallel operations. In: Camacho, E.F., Basanez, L., De la Puente, J.A. (Eds.), *Proceedings of the 15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain, 2002, Elsevier, Amsterdam (on cd-rom).
- Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., 2006. A special case of transfer lines balancing by graph approach. *European Journal of Operational Research* 168, 732-746.
- Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., Harrath, Y., 2001c. Optimal design of a class of transfer lines with parallel operations. In: Groumpos, P.P., Tzes, A.A. (Eds.), *Manufacturing, modeling, management and control*, A Proceedings volume from the IFAC Symposium, Patras, Greece, 2000, Elsevier, Amsterdam, pp. 36–41.
- Dolgui, A., Ihnatsenka, I., 2004. Branch and bound algorithm for optimal design of transfer lines with multi-spindle stations, Working paper, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, France.
- Domschke, W., Klein, R., Scholl, A., 1996. Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 66, 1465–1490.
- Domschke, W., Scholl, A., Voss S., 1993. *Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte*. Springer. Berlin.
- Drex A., Kimms A., 2001. Sequencing JIT mixed model assembly lines under station load and part usage constraints. *Management Science*, Vol. 47, No. 3, 480-491.
- Drury C.G., Global quality: linking ergonomics and production , 2000, *Int.J.Prod.Res.*, Vol.38, No. 17, 4007- 4018.
- Eklund J.A.E., 1995, Relationships between ergonomics and quality in assembly works , *Applied Ergonomics*, Vol.26, No.1, pp.15-20.
- Engström T, Jonsson D., Johansson B., 1996, Alternatives to line assembly: Some Swedish examples, *International Journal of the Industrial Ergonomics*, vol.17, pp.235-245.
- Erel, E., Gökçen, H., 1999. Shortest route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 116, 194–204. 28
- Erel, E., Sabuncuoglu, I., Aksu, B.A., 2001. Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research* 39, 3003–3015.
- Erel, E., Sabuncuoglu, I., Sederci, H., 2005. Stochastic assembly line balancing using beam search. *International Journal of Production Research* 43, 1411–1426.
- Erel, E., Sarin, S.C., 1998. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control* 9, 414–434.
- Falkenauer, 1998. *Genetic algorithms and grouping problems*, Wiley,
- Falkenauer, E., 2005. Line balancing in the real world. In: *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM 05*, Lumière University of Lyon, France, 2005, (on cd-rom).
- Fischetti M., 1999. *Lezioni di ricerca operativa*. Edizioni Libreria Progetto, Padova.
- Fliedner M., Boysen N., 2007, Solving the car sequencing problem via Branch & Bound. In: *International Journal of Operational Research*, 2-20.Fi., 2-

- Freeman, D.R., Jucker, J.V., 1967. The line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering* 18, 361–364.
- Gamberini, R., Grassi, A., Gamberi, M., Manzini, R., Regattieri, A., 2004. U-shaped assembly lines with stochastic tasks execution times: heuristic procedures for balancing and re-balancing problems. In: *Proceedings of the Business and Industry Symposium, 2004 Advanced Simulation Technologies Conference*, Arlington, Virginia (<http://www.scs.org/scsarchive/getDoc.cfm?id=1719>).
- Geoffrion, A.M., Graves, G.W., 1976. Scheduling parallel production lines with changeover costs: Practical application of a quadratic assignment/LP approach. *Operations Research* 24, 595–610.
- Gershwin, S., 2000. Design and operation of manufacturing systems: The control-point policy. *IIE Transactions* 32, 891–906.
- Ghost S., Gagnon J., 1989, A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly system”, *International Journal of Research* 1989 vol27 NO. 4, 637-670:
- Globerson, S., Tamir, A., 1980. The relationship between job design, human behavior and system response. *International Journal of Production Research* 18, 391–400.
- Gökçen, H., Agpak, K., 2006. A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 171, 577–585.
- Gökçen, H., Agpak, K., Gencer, C., Kizilkaya, E., 2005. A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling* 29, 373–380.
- Gökçen, H., Erel, E., 1997. A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics* 48, 177–185.
- Gökçen, H., Erel, E., 1998. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering* 34, 451–461.
- Goldberg D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley, Reading.
- González B. A. , Adenso-Diaz B., González Torre P., 2003, Ergonomic performance and quality relationship: an empirical evidence case , *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 31, pp.33-40.
- Grabau, M.R., Maurer, R.A., 1998. Assembly line balancing when scarp impacts the bottom line. *Production and Inventory Management Journal* 39, 16–21
- Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G., 1979. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5, 287–326.
- Hall R.W., 1983. *Zero inventories* Dow Jones. Irwin, Homewood.
- Haq, A.N., Jayaprakash, J., Rengarajan, K., 2005. A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-004-2373-3.
- Hautsch, K., John, H., Schürgers, H., 1972. Taktabstimmung bei Fließarbeit mit dem Positionswert-Verfahren. *REFA-Nachrichten* 25, 451–464.
- Helgeson, W.B. and Bimie, D.P., 1961. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *The Journal of Industrial Engineering* XII(6), 394-398.
- Henig, M.I., 1986. Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly-line balancing problems. *Computers and Operations Research* 13, 443–449.
- Hillier, F.S., So, K.C., 1991. The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research* 29, 2043–2055.

- Hillier, F.S., So, K.C., 1993. Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research* 31, 811–822.
- Hillier, F.S., So, K.C., Boling, R.W., 1993. Toward characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *Management Science* 39, 126–133.
- Ho W., Ji P., 2003. PCB assembly line assignment: a genetic algorithm approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 16, No. 6, 682-692
- Hyun C.J., Kim Y., Kim Y.K., 1998. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers Ops. Res.* Vol. 25. No. 7/8, 675-690.
- Ignall E.J., 1965. A review of assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering* 16, 244-254.
- Inman R.R., Leon M., 1994, Scheduling duplicate serial stations in transfer lines, *International Journal of Production Research*, vol.32, n.11, pp.2631-2644.
- Inman, R.R., Bulfin R.L., 1991. Sequencing JIT mixed-model assembly lines. *Management Science* 37, 901-904
- Inman, R.R., Bulfin R.L., 1992. Quick and dirty sequencing for mixed-model multi level JIT system. *International Journal of Production Research* 30, 2011-2018.
- Inman, R.R., Leon, M., 1994. Scheduling duplicate serial stations in transfer lines. *International Journal of Production Research* 32, 2631–2644.
- Johnson, R.V., 1983. A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities. *Management Science* 29, 1309–1324.
- Johnson, R.V., 1991. Balancing assembly lines for teams and work groups. *International Journal of Production Research* 29, 1205–1214.
- Kao, E.P.C., 1976. A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing. *Management Science* 22, 1097–1104.
- Kao, E.P.C., 1979. Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm. *Computers and Operations Research* 6, 79–86. 29
- Karabati, S., Sayin, S., 2003. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research* 149, 417–429.
- Kilbridge, M.D., Wester, L., 1961. The balance delay problem. *Management Science* 8, 69–84.
- Kim Y.K. et al., 2000. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied intelligence* 13, 247-258.
- Kim Y.K. et al., 2000. Two-sided assembly line balancing, a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control* 11, 44-53.
- Kim Y.K., Hyun C.J., Kim Y., 1996. Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach. *Computer Ops. Res.* Vol. 23. No. 12, 1131-1145
- Kim, H., Park, S., 1995. A strong cutting plane algorithm for the robotic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 33, 2311–2323.
- Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., 2000b. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence* 13, 247–258.
- Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., 2006. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research* 168, 838-852.

- Kim, Y.K., Kim, S.J., Kim, J.Y., 2000c. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning & Control* 11, 754–764.
- Kim, Y.K., Kim, Y., Kim, Y.J., 2000a. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control* 11, 44–53.
- Kimms, A., 2000. Minimal investment budgets for flow line configuration. *IIE Transactions* 32, 287–298.
- Klein R., 1994. Abstimmung von fließbandern bei der fertigung con produktvarianten. Diploma Thesis, TH Darmstadt.
- Klein R., Scholl A., 1994. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing a branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*
- Klenke, H., 1977. Ablaufplanung bei Fließfertigung. Gabler, Wiesbaden.
- Korkmaz T., Meral S., 2001. Bicriteria sequencing methods for the mixed model assembly line in just-in-time production systems. *European Journal of Operational Research* 131, 188-207
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., 1973. A cost-oriented approach to stochastic line balancing. *AIIE Transactions* 5, 164–171.
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., 1976. A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *AIIE Transactions* 8, 234–240.
- Kottas, J.F., Lau, H.-S., 1981. A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research* 19, 177–193.
- Kubiak W., Sethi S., 1991. A note on level schedules for mixed model assembly lines just-in-time production systems. *Management science* 37, 121-122.
- Kurashige K., Yoshinari Y., Miyazaki S., Kameyama Y., 1999. Sequencing method for products in consideration of assembly time. *International Journal of Production Economics* 60-61, 565-573
- Lapierre, S.D., Ruiz, A., Soriano, P., 2006. Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research* 168, 826–837.
- Lapierre, S.D., Ruiz, A.B., 2004. Balancing assembly lines: An industrial case study. *Journal of the Operational Research Society* 55, 589–597.
- Lau, H.-S., Shtub, A., 1987. An exploratory study on stopping a paced line when incompletions occur. *IIE Transactions* 19, 463–467.
- Lebefromm, U., 1999. Produktionsmanagement – Einführung mit Beispielen aus SAP R/3, 4th ed. Oldenbourg. München.
- Lee, T.O., Kim, Y., Kim, Y.K., 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers and Industrial Engineering* 40, 273–292.
- Lehman, M., 1969. On criteria for assigning models to assembly lines. *International Journal of Production Research* 7, 269–285.
- Leu Y. et al., 1994. Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic-generated initial populations and multiple evaluation criteria. *Decision Sciences* 25, 581-606.
- Leu, Y.-Y., Matheson, L.A., Rees, L.P., 1991. Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic-generated initial populations and multiple evaluation criteria. *Decision Sciences* 25, 581–606.
- Levitin, G., Rubinovitz, J., Shnits, B., 2006. A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 811–825.

- Link C., 1992. Bandabgleich bei variantenreicher Fließfertigung. Diploma Thesis, Universität Mannheim, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Unternehmensforschung.
- Lyu, J., 1997. A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems. *Journal of Manufacturing Systems* 16. 204–210.
- Macaskill J. L. C., 1972, Production -Line Balances for Mixed-Model Lines, *Management Science*, Vol. 19, No 4, Application Series, Part 1, 423-434.
- Macaskill, J.L.C., 1972. Production-line balances for mixed-model lines. *Management Science* 19, 423–434.
- Malakooti, B., 1991. A multiple criteria decision making approach for the assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 29, 1979–2001.
- Malakooti, B., 1994. Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *International Journal of Production Research* 32, 2159–2178.
- Malakooti, B., Kumar, A., 1996. A knowledge-based system for solving multi-objective assembly line balancing problems. *International Journal of Production Research* 34, 2533–2552.
- Mansouri S. A. et al., 2003. A genetic algorithm for multiple objective dealing with exceptional elements in cellular manufacturing. *Production planning & Control* 14 (5), 437-446.
- Mansouri S. A., 2004. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. *International Journal of Operational Research* 167, 696-716.
- Martin, G.E., 1994. Optimal design of production lines. *International Journal of Production Research* 32, 989–1000.
- Matanachai, S., Yano, C.A., 2001. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions* 33, 29–42.
- Mather, H., 1989. *Competitive manufacturing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- McMullen, P.R., Frazier, G.V., 2000. A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. *IIE Transactions* 32, 679-686.
- McMullen, P.R., Frazier, G.V., 1997. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics* 51, 177–190.
- McMullen, P.R., Frazier, G.V., 1998. Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 36, 2717–2741.
- McMullen, P.R., Tarasewich, P., 2003. Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *IIE Transactions* 35, 605–617. 30
- McMullen, P.R.M., 1999. JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu Search. *Production Planning & Control*, 9:5, 504-510.
- Merengo, C., Nava, F., Pozetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835–2860.
- Meyr, H., 2004. Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum* 26, 447–470.
- Michalewicz Z., 1996. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*, Springer.
- Milas, G.H., 1990. Assembly line balancing...Let's remove the mystery. *Industrial Engineering*, May, 31-36.

- Miltenburg J., 2001, U-shaped productions lines: A review of theory and practice, *International Journal of Production Economics*, vol.70, pp.201-214.
- Miltenburg, J., 1989. Level schedules for mix model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science* 35, 192-207.
- Miltenburg, J., 1998. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research* 109, 1–23.
- Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14, 119–151.
- Miltenburg, J., Sinnamon G., 1989. Scheduling mixed model multi-level just-in-time production systems. *International Journal of Production Research* 27, 1487-1509.
- Miltenburg, J., Sinnamon G., 1992. Algorithmus for scheduling multi-level just-in- time production systems. *IIE Transactions* 24, 121-130.
- Miltenburg, J., Wijngaard, J., 1994. The U-line line balancing problem. *Management Science* 40, 1378–1388.
- Miralles, C., 2005. Solving procedures for the assembly line worker assignment and balancing problem: applica-tion to sheltered work centres for disabled. XI Escuela Latinoamericana de Verano en Investigación de Operaciones, Villa de Leyva, Colombia (http://elavio2005.uniandes.edu.co/ResumenesParticipantes/Lunes/ MirallesCristobal_R.pdf).
- Mitsumori S., Takada K., 1972. Optimum Schedule Control of conveyor line in mixed production. *Electrical Engineering in Japan* 92, 121-129.
- Monden Y, *Toyota Production System*, 1983, Industrial Engineering Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, GA.
- Monden, Y., 1983. *Toyota production system*. Industrial Engineering and Management Press, Norcross.
- Monden, Y., 1998. *Toyota production system – An integrated approach to just-in-time*, 3rd ed. Kluwer, Dordrecht.
- Moodie, C.L., Young, H.H., 1965. A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering* 16, 23–29.
- Ng W.C., Mak K.L., 1994. A branch and bound algorithm for scheduling JIT mixed-model assembly lines. *International Journal of production economics* 33, 169-183.
- Nicosia, G., Pacciarelli, D., Pacifici, A., 2002. Optimally balancing assembly lines with different workstations. *Discrete Applied Mathematics* 118, 99–113.
- Nkasu, M.M., Leung, K.H., 1995. A stochastic approach to assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 33, 975–991.
- Okamura K., Yamashina H., 1979. A heuristic algorithm for the assembly lime model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor. *International Journal of Production Research* 17, 233-247.
- Pack, J., Buck, H., 1992. *Arbeitsgestaltung in der Serienmontage*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag GmbH. Di.isseldoff.
- Papadopoulos, H.T., Heavey, C., 1996. Queuing theory in manufacturing systems analysis and design: A clas-sification of models for production and transfer lines. *European Journal of Operational Research* 92, 1–27.
- Pareschi A. 1994. *Impianti industriali. Criteri di scelta, progettazione e realizzazione*. Società Editrice Esculapio S.r.l., Bologna
- Park, K., Park, S., Kim, W., 1997. A heuristic for an assembly line balancing problem with incompatibility, range, and partial precedence constraints. *Computers and Industrial Engineering* 32, 321–332.

- Parrello D.B., Kabat W.C., Wos L., 1986. Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem. *Journal of automated reasoning* 2, 1-42.
- Pastor, R., Andres, C., Duran, A., Perez, M., 2002. Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. *Journal of the Operational Research Society* 53, 1317–1323.
- Pastor, R., Corominas, A., 2000. Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads. *Ricerca Operativa* 30, 23–45.
- Pike, R., Martin, G.E., 1994. The bowl phenomenon in unpaced lines. *International Journal of Production Research* 32, 483–499.
- Pine, B.J., 1993. *Mass customization: The new frontier in business competition*, Harvard Business School Press, Boston, Mass.
- Pinedo M., 1995. *Scheduling. Theory, algorithms and systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1997a. A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research* 35, 253–280.
- Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1997b. A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines. *IN-FORMS Journal on Computing* 9, 335–350.
- Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1998. Assembly system design: A branch and cut approach. *Management Science* 44, 103–118.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1975. A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research* 13, 183–196.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1981. Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research* 19, 565–576.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1983. Assembly line balancing with processing alternatives: An application. *Management Science* 29, 817–830.
- Ponnambalam, S.G., Aravindan, P., Naidu, G.M., 2000. A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16, 341–352.
- Powell, S.G., 1994. Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines. *International Journal of Production Research* 32, 2201–2217.
- Rachamadugu, R., Talbot, B., 1991. Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research* 29, 619–633.
- Rahimi-Vahed A.R., Mirhorbani S.M., Rabbani M., 2007. A new particle swarm algorithm for a multi objective mixed-model assembly line sequencing problem. *Soft Computer*, 998-1011
- Raouf, A., Tsui, C., 1982. A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers & Industrial Engineering* 6, 131–148.
- Reeve, N.R., Thomas, W.H., 1973. Balancing stochastic assembly lines. *AIIE Transactions* 5, 223–229.
- Rekiek, B., de Lit, P., Delchambre, A., 2002a. Hybrid assembly line design and user's preferences. *International Journal of Production Research* 40, 1095–1111.
- Rekiek, B., de Lit, P., Pellichero, F., L'Eglise, T., Fouda, P., Falkenauer, E., Delchambre, A., 2001. A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design. *Journal of Intelligent Manufacturing* 12, 467–485.
- Rekiek, B., Delchambre, A., 2001. Assembly line balancing and resource planning: What is done and what is still missing. In: *Proceedings of CARS and FOF, Durban, South Africa, 2001*, pp. 86–93. 31

- Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., Bratcu, A., 2002b. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control* 26, 163–174.
- Roberts, S.D., Villa, C.D., 1970. On a multiproduct assembly line-balancing problem. *AIIE Transactions* 2, 361–364.
- Robinson, L.W., McClain, J.O., Thomas, L.J., 1990. The good, the bad and the ugly: Quality on an assembly line. *International Journal of Production Research* 28, 963–980.
- Rosenberg, O., Ziegler, H., 1992. A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research* 36, 477–495.
- Rosenblatt, M.J., Carlson, R.C., 1985. Designing a production line to maximize profit. *IIE Transactions* 17, 117–121.
- Rubinovitz, J., Bukchin, J., 1993. RALB – A heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines. *Annals of the CIRP* 42, 497–500.
- Sabuncuoglu, I., Erel, E., Tanyer, M., 2000. Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing* 11, 295–310.
- Salveson, M.E., 1955. The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6 (3), 18–25.
- Sarin, S.C., Erel, E., 1990. Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 28, 1305–1316.
- Sarin, S.C., Erel, E., Dar-El, E.M., 1999. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega* 27, 525–535.
- Sarker, B. R., & Pan, H. (1998). Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers and Industrial Engineering*, 34(3), 609–628.
- Sarker, B.R., Shanthikumar, J.G., 1983. A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research* 21, 109–133.
- Savsar M., 1998, Effects of scheduling policies on the performance of transfer lines with duplicate stations, *Production Planning & Control*, vol.9, n.7, pp.660-670.
- Sawik, T., 2002. Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research* 143, 115–124.
- Schneeweiß Ch., Söhner V., 1991. *Kapazitätsplanung bei moderner Fließfertigung*. Physica Heidelberg.
- Schofield, N.A., 1979. Assembly line balancing and the application of computer techniques. *Computers & Industrial Engineering* 3, 53-59
- Scholl, A., 1999. *Balancing and sequencing assembly lines*, 2nd ed. Physica, Heidelberg.
- Scholl, A., Becker, C., 2005. A note on an exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics* 97, 343-352.
- Scholl, A., Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research* 168, 666-693.
- Scholl, A., Boysen, N., Fliedner, M., (2006): The sequence-dependent assembly line balancing problem. Working Paper, FSU Jena, Germany.
- Scholl, A., Klein, R., 1999. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 721–736.

- Schonberger R. J., 1982, Japanese Manufacturing Techniques: Nine Lessons in Simplicity, Free Press, New York.
- Schöniger, J., Spingler, J., 1989. Planung der Montageanlage. *Technica* 14, 27–32.
- Shihan B., Jorgen W., Svend E. M., Houshang S., 1997, Study Interactive effect of ergonomics and production engineering on shoulder-neck exposure - A case study of assembly work in China and Sweden, *International Journal of Industrial Ergonomics* 20, 75-85
- Shin, D., Min, H., 1991. Uniform assembly line balancing with stochastic task times in just-in-time manufacturing. *International Journal of Operations & Production Management* 11/8, 23–34.
- Shtub, A., 1984. The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 22, 235–245.
- Shtub, A., Dar-El, E.M., 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research* 27, 175–186.
- Shtub, A., Dar-El, E.M., 1990. An assembly chart oriented assembly line balancing approach. *International Journal of Production Research* 6, 1137–1151.
- Silverman, F.N., Carter, J.C., 1986. A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science* 32, 455–463.
- Simaria S., Vilarinho M., 2004. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. Abstract from <http://www.sciencedirect.com>
- Sniedovich, M., 1981. Analysis of a preference order assembly line problem. *Management Science* 27, 1067–1080.
- Sotskov, Y., Dolgui, A., Portmann, M.-C., 2006. Stability analysis of optimal balance for assembly line with fixed cycle time. *European Journal of Operational Research*.168, 783-797.
- Sparling, D., 1998. Balancing JIT production units: The N U-line balancing problem. *Information Systems and Operational Research* 36, 215–237. 32
- Sparling, D., Miltenburg, J., 1998. The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research* 36, 485–501.
- Sphicas, G.P., Silverman, F.N., 1976. Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing. *AIIE Transactions* 8, 280–282.
- Sriniva N., 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation* 221-248.
- Steffen, R., 1977. *Produktionsplanung bei Fließbandfertigung*. Gabler, Wiesbaden.
- Steiner G., Yeomans J.S., 1994. Optimal level schedules in mixed-model, multi level JIT assembly systems with pegging. *European Journal of Operational Research* 95, 38-52
- Süer, G.A., 1998. Designing parallel assembly lines. *Computers & Industrial Engineering* 35, 467–470.
- Suhail, A., 1983. Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research* 21, 627–640.
- Sumichrast, R.T., Russell, R.S., 1990. Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management* 9, 371–390.
- Sumichrast, R.T., Russell, R.S., Taylor, B.W., 1992. A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system. *International Journal of Production Research* 30, 199–214.

- Suresh, G., Sahu, S., 1994. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research* 32, 1801–1810.
- Suresh, G., Vinod, V.V., Sahu, S., 1996. Genetic algorithm for assembly line balancing. *Production Planning and Control* 7, 38–46.
- Tavakkoli-Moghaddam R., Rahimi-Vahed A.R., 2006. Multi-criteria sequencing problem for a mixed-model assembly line in a JIT production system. *Applied Mathematics and Computations* 181, 1471-1481
- Tempelmeier, H., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research* 41, 149–170.
- Thomopoulos, N.T., 1967. Line balancing. Sequencing for mixed-model assembly. *Management Science* 14, B59-B75.
- Thomopoulos, N.T., 1970. Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science* 16, 593–603.
- Thomopoulos, N.T., 1970. Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science* 16, 593–603.
- Tsai L.H., 1995. Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Management Science* 4, 485-495.
- Tsujimura, Y., Gen, M., Kubota, E., 1995. Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering* 29, 543–547.
- Ugurdag, H.F., Rachamadugu, R., Papachristou, C.A., 1997. Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research* 102, 488–501.
- Ulrich K.T., Eppinger S.D., Filippini R., 2007. *Product design and development*, 157-171.
- Van Lingen P., Van Rhijn G., De Looze M., Vink P., Koningsveld E., Tuinzaad G., Leskinen T., ERGO tool for the integral improvement of ergonomics and process flow in assembly. *Int.J.Prod.Res.*, 2002, Vol.40 , No.15, pp. 3973-3980.
- Ventura J.A., Radhakrishnan S., 2002. Sequencing mixed model assembly lines for a Just-in-time production system. *Production and Planning Control* 13:2, 199-210.
- Vrat P., Virani A., 1976. A cost model for optimal mix of balanced stochastic assembly line and the modular assembly system for a customer oriented production system. *International Journal of Production Research* 14, 445-463.
- Wang F., Wilson R.C., 1986. Comparative analyses of fixed and removable item mixed model assembly lines. *IIE Transactions* 18, 313-317.
- Wester L., Kilbridge M., 1964. The assembly line model mix sequencing problem. *Proceedings of the third International Conference on Operations Research, Oslo 1963, Dunod, Paris*, 247-260.
- Wild R., 1975, On the Selection of Mass Production System, *International Journal of Production Research*, vol.13, n.5, pp.443-461.
- Wilson, J.M., 1986. Formulation of a problem involving assembly lines with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 24, 59–63.
- Xiaobo Z., Liu J., Ohno K., Kotani S., 2005. *Modeling and analysis of a mixed-model assembly line with stochastic operation times*. Wiley InterScience, 682-691.
- Xiaobo Z., Ohno K., 1996. Algorithms for sequencing mixed models on an assembly line in a JIT production system. *Computers Industrial Engineering* Vol. 32, No. 1, 47-56.
- Xiaobo Z., Ohno K., 1998. Properties of a sequencing problem for a mixed model assembly line with conveyor stoppages. *European Journal of Operational Research* 124, 560-570

Xiaobo Z., Zhou Z., Asres A., 1999. A note on Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line. *Computers & Industrial Engineering* 36, 57-65.

Yano, C.A., Bolat, A., 1989. Survey, development, and application of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 2, 172-198.

Yano, C.A., Rachamadugu R., 1991. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. *Management Science* 37, 572-586.

Zäpfel G., 1975. *Ausgewählte fertigungswirtschaftliche Optimierungsprobleme von Fließfertigungssystemen*. Beuth, Berlin.

Zhu J., Ding F.Y., 2000. A transformed two-stage method for reducing the part usage variation and a comparison of the product-level and part-level solutions in sequencing mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research* 127, 203-216.

Ziegler H., 1990. *Produktionssteuerung bei Mehrproduktfließlinien* Manuscript, Universität-GH-Paderborn, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften