

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA**

---

*SCUOLA di DOTTORATO di RICERCA*

**HIGH MECHANICS AND AUTOMOTIVE DESIGN &  
TECHNOLOGY**

*Corso*

**TECNICHE E TECNOLOGIE DEL VEICOLO**

**XXIII Ciclo**

Direttore, Coordinatore: Chia.mo Prof. Ing. Antonio Strozzi

TESI PER IL CONSEGUIMENTO DEL TITOLO DI DOTTORE DI RICERCA

**ANALISI DEI PROBLEMI DI PROGRAMMAZIONE  
DELLA PRODUZIONE DI SISTEMI MANIFATTURIERI E  
SVILUPPO DI MODELLI DI SIMULAZIONE PER IL  
BILANCIAMENTO DI LINEE DI ASSEMBLAGGIO  
MANUALI.**

Candidato: Dott. Ing. Mario Garofalo

Relatore: Chia.mo Prof. Ing. Riccardo Melloni

Correlatore: Ing. Sergio Amedeo Gallo

---

Anno Accademico 2010/2011



*Alla mia famiglia*



## INDICE

Sommario.....	I
Abstract.....	a
Introduzione.....	A
<b>1 IL SISTEMA PRODUTTIVO IN LINEA.....</b>	<b>13</b>
1.1 Il processo produttivo.....	13
1.2 Storia ed evoluzione del problema di bilanciamento delle linee di montaggio.....	15
1.3 La produzione e la componente manuale.....	17
1.4 Il bilanciamento di linee a componente manuale.....	19
1.4.1 Parametri delle linee manuali.....	20
1.4.2 Bilanciamento delle linee manuali.....	22
1.4.3 Il metodo di Kottas – Lau per il bilanciamento.....	25
1.4.4 Differenze fra Bilanciamento linee e Livellamento della produzione della lean Production (JIT).....	32
Bibliografia.....	37
<b>2 LA FILOSOFIA LEAN.....</b>	<b>38</b>
2.1 Il modello Toyota.....	40
2.2 La Lean Production.....	41
2.3 Il lean in linea.....	46
2.3.1 Il concetto di Muda.....	46
2.3.2 Sconfiggere lo spreco.....	48
2.3.3 La metodologia Lean.....	51
2.3.4 La Total Production Maintenance – TPM.....	55
2.3.5 Il metodo 5S.....	59
Bibliografia.....	64
<b>3 LA MISURAZIONE DEI TEMPI.....</b>	<b>65</b>
3.1 La costruzione dei tempi.....	66
3.1.1 Il rilievo cronometrico.....	66
3.1.2 I preventivi di stima.....	69
3.1.3 Determinazione con sistemi a tempi predeterminati.....	69
3.1.4 La maggiorazione dei tempi.....	69
3.2 MTM – Method Time Measurement.....	72
3.2.1 Le origini.....	74
3.2.2 I blocchi di dati.....	75
3.2.3 MTM e Lean.....	79
3.2.4 L’analisi del valore aggiunto in MTM.....	80
Bibliografia.....	83
<b>4 GLI ALGORITMI.....</b>	<b>84</b>
4.1 Introduzione al problema.....	84
4.2 Definizione del problema.....	85
4.3 La modellazione della linea.....	90
4.3.1 Paced – Unpaced.....	90
4.3.2 Tempi di esecuzione dei task deterministici o stocastici.....	91
4.3.3 Single model – Mixed model – Multi model.....	95
4.3.4 U-shaped layout.....	98
4.3.5 Paralleling.....	99

4.3.6	One side – Two side. ....	100
4.3.7	Restrizioni all’assegnamento dei task.....	100
4.3.8	Quali opzioni in caso di ritardo. ....	101
4.4	Le soluzioni: gli algoritmi. ....	102
4.5	Parametri di misura delle performance.....	105
4.6	Classificazione dei problemi. ....	109
4.7	Simulazione ad eventi discreti.....	110
4.8	Alcuni problemi tipici.....	114
4.9	Algoritmo Genetico per un problema tipo GALBP-1. ....	114
4.9.1	L’algoritmo genetico. ....	115
4.9.2	Rappresentazione degli individui. ....	115
4.9.3	Popolazione iniziale.....	117
4.9.4	Funzione di fitness.....	118
4.9.5	Cross-over.....	120
4.9.6	Mutazione. ....	121
4.10	Tabu search e GALBP-1.....	123
4.10.1	Il tabu search (TS). ....	123
4.10.2	I tabu. ....	124
4.10.3	Criterio di aspirazione. ....	127
4.10.4	Tabu size.....	128
4.10.5	Come realizzare un controllo sulle iterazioni peggiorative. ....	129
4.10.6	Come si ottiene la soluzione iniziale. ....	130
4.10.7	Funzione obiettivo. ....	130
4.10.8	Controllo di fattibilità di una soluzione.....	132
4.10.9	Memoria a breve e a lungo termine. ....	133
4.10.10	Simulazione e funzione obiettivo. ....	133
	Bibliografia.....	135
5	LA SIMULAZIONE. ....	140
5.1	I metodi di simulazione. ....	140
5.2	I modelli di simulazione come strumento di supporto decisionale. ....	141
5.2.1	Impieghi della simulazione per obiettivi strategici.....	142
5.3	Analisi dell’output. ....	156
5.3.1	Introduzione e sviluppo. ....	156
	Bibliografia.....	178
6	LA PIATTAFORMA AUTOMOD.....	190
6.1	Sistemi, modelli e simulazione.....	190
6.1.1	Sistemi. ....	190
6.1.2	Modelli. ....	190
6.1.3	Simulazione. ....	192
6.2	Lo strumento di simulazione: Automod.....	199
6.2.1	AutoMod Model editor.....	200
6.2.2	AutoMod Runtime.....	202
6.2.3	Sistema Kinematics. ....	203
6.2.4	AutoView, ACE, AutoStat. ....	204
	Bibliografia.....	206
7	MODELLAZIONE E ANALISI DELLA LINEA.....	207
7.1	L’azienda: Comer Industries S.p.A. ....	207
7.1.1	Operative Unit Fluid Power.....	208

7.1.2	Pompe e loro linea di assemblaggio. ....	209
7.2	Analisi preliminare del sistema produttivo. ....	211
7.2.1	Analisi dei tempi. ....	212
7.2.2	Analisi dei volumi produttivi. ....	215
7.2.3	Analisi dei vincoli. ....	216
7.3	Costruzione del modello a risorse fisse. ....	217
7.3.1	Sistemi Static e Conveyor. ....	217
7.3.2	Sistema principale. ....	218
7.3.3	Sistema Kinematics. ....	222
7.4	Definizione di piani di produzione con bilanciamento a risorse ridotte. ....	224
7.4.1	Definizione delle priorità e scelta dell'intervento migliorativo. ....	225
7.4.2	Scelta dei campioni di tempo e prodotti. ....	226
7.4.3	Criteri di accorpamento delle stazioni. ....	228
7.4.4	Determinazione dei volumi produttivi nel tempo di riferimento. ....	231
7.5	Costruzione del modello a risorse variabili. ....	234
7.5.1	Integrazioni effettuate. ....	234
7.5.2	Modello finale. ....	240
7.6	Simulazione di produzione mensile. ....	242
7.6.1	Definizione dei parametri e dell'analisi AutoStat. ....	243
7.6.2	Piani a 6 risorse. ....	245
7.6.3	Piano a 5 risorse. ....	250
7.6.4	Piano a 4 risorse. ....	251
7.6.5	Piano a 3 risorse. ....	252
7.6.6	Piano a 2 risorse. ....	253
7.6.7	Confronto tra risultati. ....	254
7.7	Analisi dei vincoli. ....	258
7.7.1	Considerazioni sui dati. ....	262
7.8	Individuazione del problema e valutazione miglioramenti e approcci possibili. ....	263
7.8.1	Il bilanciamento MALBP. ....	263
7.8.2	Il metodo COMSOAL. ....	265
7.9	Costruzione del modello su automod. ....	272
7.9.1	Sistema principale per la distribuzione dei task. ....	272
7.9.2	Sistema di simulazione della produzione. ....	279
7.10	Valutazione di ulteriori interventi: la riassegnazione degli operatori. ....	283
7.10.1	Implemento del modello su Automod. ....	284
7.11	I dati ottenuti. ....	289
7.12	Simulazione della produzione. ....	300
Conclusioni e sviluppi futuri. ....		302



## Sommario

L'attività di studio e di ricerca che è trattata nel presente lavoro è nata sulla base del rapporto sviluppatosi con il gruppo Impianti della Facoltà di Ingegneria di Modena, e per le occasioni di osservazione e per le problematiche affrontate nel corso della mia esperienza lavorativa in qualità di responsabile dell'ingegneria di processo, con numerosi compiti a carattere di pianificazione e organizzazione della produzione.

È stato quasi naturale, pertanto, orientarsi allo studio delle problematiche relative alla produzione, ed in particolare ad una questione che influenza molto il costo di produzione, a causa del valore di efficienza, spesso non soddisfacente che si osserva, il bilanciamento delle linee di assemblaggio manuale.

Data la notevole complessità offerta da questo tipo di problema, si sono studiati i vari tipi di modelli presenti in letteratura, classificabili per il tipo di sistema produttivo, per l'obiettivo da conseguire o parametro da ottimizzare, e per la tecnica risolutiva tentata.

A valle di questi studi, si è optato per una soluzione, non necessariamente la migliore dal punto di vista della ricerca dell'ottimo globale, o bellezza della soluzione formale, ma sicuramente più praticabile, flessibile, integrabile, realistica per il vero contesto produttivo, caratterizzato da specificità che molti modelli non considerano, semplificandone la complessità, o ignorando alcuni vincoli o dinamiche reali: tale soluzione è stata quella di sviluppare su una piattaforma software per la simulazione dei processi produttivi, modelli per il bilanciamento e la schedulazione di una linea di assemblaggio manuale, abbastanza riferibile per molti sistemi e prodotti per metodologia, applicabilità e consistenza delle risposte.

Nel loro complesso questi modelli di simulazione si proponevano di affrontare e definire, per step successivi, a partire da contesti derivati da casi reali, strategie, metodologie e per arrivare a soluzioni migliorative rispetto a soluzioni di base praticate precedentemente, e considerate come termine di riferimento.

In particolare, si è provato a definire direttamente nel modello, o meglio, nel codice che il software specifico impiegava, anche gli algoritmi e le euristiche che consentissero di utilizzare la simulazione, non solo come strumento, tipicamente di verifica, ma anche come “scheduler”.

Le caratteristiche attuali dello strumento hanno reso possibile questa idea.

L’articolazione anche temporale del lavoro ha visto per primo l’apprendimento e la valutazione delle tecniche più diffuse in letteratura sia di schedulazione e bilanciamento sia di simulazione.

Successivamente, si è incominciato a realizzare i primi modelli, adatti a bilanciare la linea in condizioni di sottoutilizzazione, per poi arrivare a definire modelli di schedulazione ulteriori in condizioni di carico produttivo ordinario.

Molte sono le linee di evoluzione, sviluppo futuro che si sono individuate, che vanno dalla definizione di nuovi algoritmi di schedulazione, così come all’analisi di sistemi linea, tipi di vincoli, condizioni, e piani produttivi differenti, nell’ottica di costituire un modello di ampia generalità ed adattabilità, obiettivo per la verità, un po’ velleitario se non considerando come opzioni di scelta le differenti linee di approccio a seconda delle caratteristiche specifiche del sistema da trattare.

Anche il livello della validazione e dell’analisi statistica della consistenza del risultato, pur avviato, non può essere qui presentato, in quanto non ancora definitivamente compiuto.

Si sono anche approfondite le tematiche relative alle filosofie più attuali in termini di attivazione del processo produttivo, *Just in Time*, *Lean Production*, ma anche le metodiche di misurazione del contenuto di lavoro e definizione delle modalità esecutive dei processi manuali di montaggio, *Methods and Time Measure* (MTM).

In generale, la molteplicità degli aspetti e problematiche legate al processo produttivo ha avuto occasione di essere approfondito.

L’attività di ricerca è stata sviluppata a partire dalle esperienze di ricerca applicata già affrontate.

La metodologia è articolata su più livelli che sono rispettivamente:

- L'analisi del sistema in oggetto.
- La determinazione di caratteristiche, configurazioni, vincoli, obiettivi, capacità, ricavabili già dall'analisi preliminare, per definire obiettivi, condizioni del modello da sviluppare.
- Lo sviluppo di un modello simulativo basato sulle ipotesi precedenti da verificare e validare quanto meglio possibile rispetto a tipiche attività di confronto e verifica sia su dati reali, sia secondo le classiche modalità descritte in letteratura in caso di assenza di possibili riscontri.
- L'analisi degli output prodotti e prime valutazioni su consistenza e dispersione statistica/errore del modello.
- Lo sviluppo di integrazione o configurazioni distinte.

Le distinte tipologie di sistemi di linea di assemblaggio, fa sì che sia veramente difficile considerare un unico sistema o modello, giacché vincoli, obiettivi, configurazioni, piani produttivi, relazione con mercato sono troppo dissimili.

Tuttavia, i risultati e l'approccio sembrano molto promettenti, lo strumento sembra versatile e consistente anche per un effettivo utilizzo a supporto delle attività degli analisti.

Il percorso è lunghissimo, ma già sono spendibili alcune delle risultanze ricavate, pur nei limiti tipici dei modelli simulativi.

L'integrazione di questi modelli simulativi con le potenzialità di altri metodi e tecniche, potrà definire le possibilità degli uni o degli altri, e proprio nell'approccio multi tecnica che si potrebbe ritrovare il massimo dei vantaggi. Allo stato attuale ciò ancora non si è riusciti a farlo, ma è questa una sfida interessante da raccogliere.

Il risultato finale è quindi stato quello di aver sviluppato un modello simulativo dedicato al bilanciamento che incorpora le caratteristiche di generalità e flessibilità desiderate, e che non ha limiti di integrazione e di raffinamento, potendo in futuro recepire ed integrare anche altri metodi.

Anche la metodologia sviluppata sembra consistente e promettente, avendo come limite maggiore solo quello di non poter esser certi

dell'ottenimento dell'ottimo globale, ma sicuramente su soluzioni migliori rispetto a quelle di partenza.

## Abstract

Le *linee di assemblaggio* rappresentano, oggi come in passato, un sistema consolidato per organizzare una produzione di massa.

Storicamente tale sistema ha subito notevoli mutamenti, basti pensare al modo di concepire la produzione in linea ai tempi di *Henry Ford*, con la necessità di produrre più prodotti possibili ma di un solo modello e quindi l'orientamento all'ottimizzazione dei flussi industriali vincolati a quel singolo prodotto.

Dai tempi di H. Ford le necessità dei mercati si sono evolute in maniera sempre crescente. Oggi la richiesta è sempre più orientata alla varietà dei prodotti, con caratteristiche e specifiche che possono anche variare sensibilmente.

Inoltre, le variazioni dei mercati finanziari portano le aziende a dover affrontare crescenti pressioni a causa della globalizzazione e dei processi di internazionalizzazione. L'opportunità (od obbligo) di localizzare la produzione in contesti emergenti, basti pensare a Cina ed India che hanno oggi il notevole vantaggio economico derivante dal basso costo della manodopera e da mercati interni in forte espansione, obbliga le aziende manifatturiere soprattutto europee e statunitensi a ridurre e razionalizzare i costi di produzione.

Molte imprese hanno, quindi, ritenuto fondamentale trasformare i propri processi seguendo i principi della *Lean Production*, in modo da migliorare la competitività perseguendo una costante ricerca dell'eliminazione e riduzione dello spreco, da sempre uno dei maggiori obiettivi dell'ingegneria industriale.

In quest'ottica anche la costruzione di una linea di assemblaggio rappresenta una possibilità di ottimizzazione in termini di performance, riduzione costi e miglioramento della qualità del prodotto.

La configurazione di una linea prevede innanzitutto la risoluzione di un punto focale: il problema del bilanciamento della linea stessa (*Assembly Line Balancing Problem, ALBP*).

Questo problema consiste nel distribuire il carico totale di lavoro, necessario per completare la produzione richiesta di ciascun prodotto da assemblare, tra le varie postazioni di lavoro lungo la linea stessa.

Il presente lavoro ha quindi l'obiettivo, con l'aiuto dei *metodi di simulazione*, di illustrare quali tecniche e quali metodologie sono applicabili per la risoluzione del problema del bilanciamento di linee di assemblaggio in relazione alle moderne necessità di produzione.

**PAROLE CHIAVE:** Ingegneria, Industriale, Lean Production, Assemblaggio, Metodi.

### Introduzione

La simulazione di processo industriale è la rappresentazione virtuale di sistemi di fatto molto complessi, quali tutte le sottoparti di un sistema produttivo e logistico, ma anche erogatore di servizi immateriali. Tale emulazione consente, a scapito di uno sforzo di analisi e di modellazione, spesso significativamente rilevante, di osservare il comportamento di sistemi reali o concettuali, per gli aspetti che interessano, senza dover agire onerosamente e fisicamente sull'impianto, di effettuare valutazioni e performance tecniche ed economiche, testare e valutare alternative relative alle risorse, agli impianti, ma anche alle forme organizzative, per trovare soluzioni più efficaci riducendo i costi di investimento e di esercizio, limitando i rischi, e tutto questo di poterlo fare dinamicamente rispetto all'evoluzione degli stati del sistema dove sistemi alternativi quali modelli di tipo matematico fisico non sarebbero in grado.

I casi e le applicazioni di successo sono innumerevoli e nessuno dubita della efficacia dello strumento simulativo per migliorare l'efficienza dei sistemi produttivi e logistici, non dimenticando però, che lo scrupolo nella definizione dei modelli, nella definizione e raccolta dei dati, la competenza e il rigore nella preparazione di un modello rimangono sempre più al crescere della disponibilità di potenti applicativi, fattori fondamentali per la spendibilità dei risultati, e che la competenza richiesta è sempre motivo di approfondimento e studio, troppo spesso sottovalutati per l'entusiasmo che può regalare l'evoluzione, l'aumento di potenza e facilitazione dei moderni pacchetti software. Cresce, infatti, all'aumentare delle potenzialità delle piattaforme commerciali, anche la tendenza degli applicanti più esigenti a ricorrere ai "sistemi aperti *open source*" da sviluppare adeguatamente alle proprie esigenze.

I risultati ottenuti mostrano come lo sviluppo di modelli simulativi per l'analisi di sistemi produttivo – logistici sia un fattore strategico per la competitività del sistema industriale.



## **1 IL SISTEMA PRODUTTIVO IN LINEA.**

Nell'ambito della produzione industriale, in modo particolare nel campo dell'automotive, i sistemi di produzione organizzati con manifattura in linea sono largamente utilizzati. Ne deriva la necessità di poter regolarizzare i tempi di produzione bilanciando le diverse postazioni di lavoro, in modo di evitare una disarmonia nelle sequenze di lavorazione (colli di bottiglia, postazioni scariche, ...). Segue, quindi, un'introduzione sul processo produttivo ed un breve cenno sulla storia e l'evoluzione delle linee di assemblaggio indicando alcuni dei maggiori cambiamenti di tale sistema.

### ***1.1 Il processo produttivo.***

Si definisce processo produttivo un insieme di azioni, coordinate tra loro in modo logico, che trasformano entità fisiche in ingresso, che possono essere sia materie prime, sia semilavorati, in beni materiali utili all'uomo, i prodotti finiti.

La produzione necessita di una disponibilità di risorse materiali, energetiche, umane e tecnologiche, nonché di un luogo ad essa preposto, tipicamente un reparto aziendale.

Durante la produzione avviene un processo di creazione di valore aggiunto, ovvero il bene, all'uscita, presenta caratteristiche funzionali inedite rispetto all'ingresso, divenendo così più prezioso, in quanto più adatto a soddisfare un determinato bisogno.

La produzione industriale è il risultato dell'incontro tra lo studio del processo produttivo di un oggetto, che porta alla definizione, con alto grado di dettaglio, di una serie di operazioni elementari e ripetibili necessarie a realizzarlo, e la progettazione e la realizzazione di un sistema fisico che permetta di eseguire quelle stesse operazioni.

Riguardo agli strumenti per la gestione del processo, in fase di pianificazione operativa è fondamentale la compilazione ricorrente di un

piano di produzione, ovvero un documento che riporti l'insieme dei prodotti (carichi) da lavorare in un certo periodo, e la specificazione di tutti i loro parametri necessari alla corretta esecuzione del processo produttivo.

La caratteristica peculiare di un impianto produttivo industriale è la ripetibilità delle azioni, che rende la riuscita del prodotto praticamente indipendente dal luogo e periodo di produzione, ed anche dagli operatori umani impiegati. La ripetibilità è pressoché totale, perlomeno nel range ridotto delle tolleranze ammissibili, nel caso il processo produttivo sia completamente automatizzato, perché le macchine consentono un controllo molto elevato, impossibile ad un essere umano. I tempi di esecuzione di un processo automatizzato possono in pratica essere considerati deterministici, ovvero uguali a se stessi ad ogni ripetizione del processo.

Al contrario, nel caso della manodopera umana, le prestazioni sono fortemente dipendenti dall'operatore, variando da persona a persona vari fattori, tra cui la preparazione, la motivazione, la resistenza agli sforzi prolungati; anche a parità di operatore, però, si possono registrare cali o picchi di rendimento nell'arco di una giornata, di un mese, di una vita lavorativa, subentrando stanchezza, esperienza, motivazione o disaffezione, ecc; i tempi di esecuzione di un'operazione da parte di una persona sono, quindi, da considerarsi fortemente stocastici, ovvero soggetti ad una variazione, descritta da una curva di probabilità o frequenza, tra una ripetizione e l'altra. In compenso, l'uomo ha una capacità di gestire fenomeni complessi e/o nuovi sconosciuti ad una macchina.

Il processo produttivo che più spesso è caratterizzato da una forte presenza di manodopera è il processo di assemblaggio, che, tipicamente, costituisce la fase finale della produzione, principalmente nella manifattura.

Il trend industriale degli ultimi anni, sviluppatosi nella dinamica di relazione con i propri mercati, rivela un progressivo concentrarsi della variabilità tra prodotti di una stessa azienda nei loro componenti visibili e caratterizzanti: ciò che non è percepito dall'utente viene sempre più spesso standardizzato, per ridurre i costi di progettazione, produzione e sviluppo grazie alle economie di scala, mentre aumenta progressivamente la

possibilità di personalizzare le finiture e le funzioni immediatamente percepibili.

Questo nell'ottica di offrire il massimo di personalizzazione nel prodotto, con il massimo di standardizzazione, di modularità, di manutenibilità, nella produzione e nel prodotto.

Da un punto di vista del processo produttivo industriale, questo comporta la necessità di un'elevata flessibilità nelle fasi finali, quelle di assemblaggio, appunto, dove, da codice a codice, può variare anche notevolmente il mix di componenti da montare.

Dovendo scegliere se affidare questa fase ad operatori o a macchine, occorre tener presente che, se da un lato l'uomo è molto più irregolare delle macchine, dall'altro presenta una versatilità che, tra le macchine, solo i robot con notevoli controlli elettronici possono raggiungere.

Questi riescono ad essere utilizzati anche per movimentazioni complesse come quelle eseguibili da un uomo, ma con il vantaggio, come già scritto, della certezza sui tempi, oltre che della possibilità di spostare masse troppo grandi per un uomo. Non sono, però, facili da programmare, e, soprattutto, presentano spesso elevati costi, che riescono ad essere assorbiti solo con volumi produttivi molto grandi. Per questo, ancora oggi molti processi di assemblaggio avvengono, come quello in esame, manualmente, con l'ausilio di semplici apparecchiature ausiliarie.

## ***1.2 Storia ed evoluzione del problema di bilanciamento delle linee di montaggio.***

Ancora oggi le linee di assemblaggio rappresentano una soluzione di vasto utilizzo per la produzione in larga scala di prodotti.

Nel corso dello sviluppo industriale, tali linee hanno sicuramente subito notevoli cambiamenti; dall'organizzazione orientata alla produzione di un singolo prodotto, come poteva essere ai tempi di Henry Ford con la produzione di 15 milioni di esemplari della mitica "Ford T" (definita

simpaticamente “Lizzie” dagli americani), alla necessità di diversificare il più possibile il prodotto per andare incontro alle esigenze del cliente.

Di conseguenza anche i tempi di produzione hanno subito elevate variazioni, dalla concezione rigida dei tempi produttivi, alla flessibilità oggi richiesta.

La progettazione, o la riconfigurazione di una linea di produzione, comporta inevitabilmente la risoluzione del primo fra tutti problemi che si presentano: il bilanciamento (*ALBP, assembly line balancing problem*).

Questo problema consiste nel distribuire il carico totale di lavoro, necessario per completare la produzione richiesta di ciascun prodotto da assemblare, tra le varie postazioni di lavoro lungo la linea.

La ricerca sul problema di bilanciamento delle linee si è concentrata principalmente sul problema semplice di bilanciamento (*SALBP, simple assembly line balancing problem*), che prevede una serie di assunzioni, spesso piuttosto restrittive e semplificative.

Queste, spesso, rendono impossibile l'utilizzo degli algoritmi messi a punto per risolvere questo tipo di problema, quando si affrontano dei casi reali.

Per citarne alcune, si ricorda che il SALBP prevede dei task time (ovvero il tempo destinato per un singolo task) deterministici e l'assenza di vincoli di assegnazione all'infuori dei vincoli stabiliti dal diagramma delle precedenze.

Recentemente, si è molto lavorato per descrivere e risolvere problemi più generalizzati e realistici, ovvero il *GALBP (generalized assembly line balancing problem)*. Molte sono le possibilità che si hanno per adattare un algoritmo risolutivo al problema reale che si vuole affrontare.

Tra le più importanti si citano: la possibilità di avere postazioni parallele che svolgano gli stessi task con cadenza produttiva doppia (*paralleling*), differenti layout dalla semplice linea come le linee a forma di U, per avere un inizio ed una fine linea molto vicini tra loro, (*U-shaped*) o quelle in cui è possibile svolgere task diversi operando sui due lati della linea (*two sided*), possibilità di produrre differenti modelli (*mixed model*) o aleatorietà dei tempi di esecuzione dei task.

Per la risoluzione di questo tipo di problemi sono stati proposti una grande quantità di algoritmi. Per la maggior parte si tratta di algoritmi euristici (ovvero con un approccio più orientato all'empirico e che si conforma alle circostanze richieste), come algoritmi genetici, *simulated annealing* ed altri.

Questo fatto è dovuto principalmente alla grande difficoltà di risolvere questo tipo di problemi con algoritmi esatti, data la vastità dello spazio di soluzioni (a differenza di quanto avviene invece per il SALPB dove gli algoritmi esatti, tipo branch and bound, sono molto studiati).

### **1.3 La produzione e la componente manuale.**

Negli ultimi anni abbiamo vissuto un notevole incremento dell'automazione all'interno dei sistemi produttivi, soprattutto nel nostro paese; ciò deriva sicuramente da una serie di vantaggi che tali sistemi offrono: dalla maggiore capacità produttiva (si pensi ad impianti che lavorano sulle 24 ore) ad un elevato standard qualitativo, dalla possibilità di evitare problematiche sociali (scioperi, straordinari, ...) all'opportunità di monitorare più facilmente i dati di produzione (come misure, tolleranze, unità prodotte, ...).

Tuttavia ancora oggi sono moltissime le aziende dotate di sistemi di produzione a componente manuale; i motivi di tale scelta si possono esemplificare in 2 ragioni principali:

1. L'automazione costa. Nonostante la massificazione di prodotti specifici, creare dei centri di lavoro con alta componente automatica comporta un notevole investimento, se ci poniamo nella realtà italiana, ove la maggior parte delle imprese è a carattere medio – piccolo, ci rendiamo conto come sia ancora forte la necessità di produrre manualmente.
2. Soprattutto nei processi di assemblaggio, vi sono componenti con particolari caratteristiche che necessitano di un approccio di tipo

manuale; è il caso, questo, di prodotti molto complessi, per i quali le operazioni di montaggio che dovrebbe sostenere una macchina automatica porterebbero ad elevate difficoltà nella programmazione e nella gestione di quest'ultime (personalmente ho riscontrato queste difficoltà nel campo della produzione oleodinamica). Inoltre, molto spesso si tende a diversificare i prodotti da assemblare ed a ridurre il più possibile i lotti di produzione (si tende al lotto unitario – dalla filosofia JIT, di cui parleremo in seguito), il che porta inevitabilmente ad eccessivi tempi di setup per cambiare le attrezzature necessarie per un determinato codice verso un altro.

Molto spesso, invece, si tende ad agevolare i montaggi affiancando all'operatore delle attrezzature in grado di supportare autonomamente la produzione. In questo caso si pensi a sistemi di controllo delle coppie di serraggio, con la possibilità di scegliere velocemente il tipo di utensile ed il valore di coppia da utilizzare; in altre occasioni si facilita l'operatore nella distribuzione dei liquidi o di tutti quei prodotti chimici (colle, polveri, ...) che devono essere impiegati con l'uso di particolari dosatori in grado di essere programmati preventivamente con i giusti valori di dosaggio.

Nella maggior parte dei casi si tende a facilitare l'assemblaggio prestando attenzione alla parte legata ai trasporti, ovvero allo spostamento dei prodotti/componenti tra una postazione all'altra della stessa linea o, per necessità tecnologiche, in siti differenti; per determinati prodotti tale scelta è spesso obbligata dalle dimensioni e dal peso di questi, in altri, invece, si predilige l'azzeramento dei tempi di trasporto e immagazzinamento.

La realtà produttiva oggetto della mia analisi, a causa della complessità e dall'alta variabilità delle famiglie di prodotto, utilizza proprio un sistema produttivo a componente manuale con l'ausilio di attrezzature dedicate alla facilitazione di alcune operazioni di assemblaggio. Come accennato in precedenza risulta, quindi, necessario bilanciare i contenuti di lavoro delle diverse postazioni della linea, oggetto del prossimo paragrafo.

### **1.4 Il bilanciamento di linee a componente manuale.**

Trovandosi di fronte all'esigenza di produrre un determinato oggetto, che necessita a tal fine di un numero e di una sequenza noti di operazioni (*tasks*) da svolgere, sorge la necessità di individuare, tra i tanti possibili, il più rapido ed efficace modo di organizzazione del processo e delle risorse. Spesso, in ambito industriale, si organizza la produzione, con particolare riferimento al processo di montaggio, necessario se l'oggetto è costituito da più parti elementari, lungo linee di assemblaggio.

Una *linea di assemblaggio* è un sistema produttivo composto fondamentalmente da:

- *Postazioni (stazioni) fisse*, disposte in modo sequenziale, a cui sono assegnate sia risorse produttive, quali operatori o robot, sia determinate operazioni di montaggio che le risorse devono compiere sul prodotto; questo, nell'attraversare le postazioni, va dunque completandosi, e guadagnando in valore aggiunto.
- *Sistemi di movimentazione*, quali veicoli o nastri, che trasportano i semilavorati da una stazione all'altra.

Lo scopo del layout in linea è la minimizzazione dei tempi di spostamento di persone ed oggetti, a scapito, però, della flessibilità e dei costi fissi: si trova più frequentemente, pertanto, nelle produzioni di larga scala.

La realizzazione di un prodotto richiede il completamento dei tasks necessari, che devono essere ordinati secondo precedenze vincolanti di natura tecnologica, rappresentati nel *diagramma delle precedenze* di Figura 1.2.

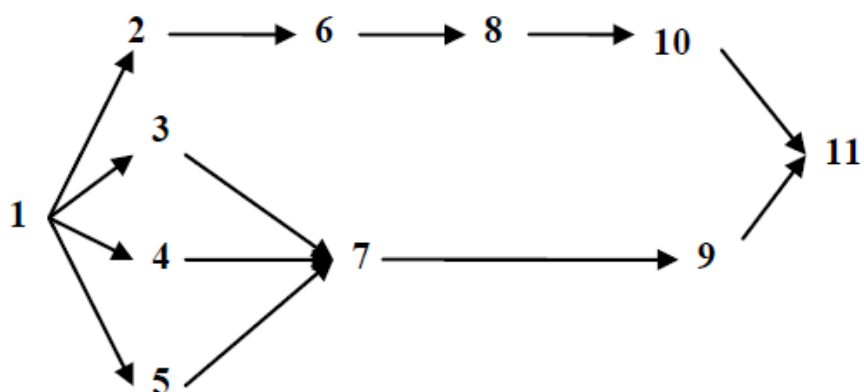


Figura 1.2 – Esempio di diagramma tecnologico delle precedenze.

In Figura 1.2, i numeri rappresentano le operazioni che costituiscono l'assemblaggio, le frecce i rapporti logici di necessità. Ad esempio, le fasi 3, 4, 5 possono esser svolte solo dopo la numero 1, e la 7 non può iniziare se prima non le si sono completate. La fase 2, la 6 e così via costituiscono invece un processo parallelo. Comunque si distribuiscano gli 11 tasks, l'assemblaggio dovrà iniziare con il task 1 e terminare con l'11.

### 1.4.1 Parametri delle linee manuali.

Se l'assemblaggio è disposto in linea e deve essere eseguito da persone (risorse umane), come da qui in avanti si darà per scontato, un certo bene impiega, per attraversare l'intera linea, al minimo un determinato tempo, detto *lead time teorico*,  $L_0$ , che è la somma dei tempi necessari all'esecuzione di tutte le operazioni di assemblaggio.

Nota la quantità di beni da produrre in un certo periodo temporale, se il tempo a disposizione, al fine di soddisfare la richiesta, per produrne uno, è inferiore a  $L_0$ , si divide la linea in più postazioni, che richiedono sì più operatori e strumenti (maggiori investimenti in risorse, umane e non), ma permettono di lavorare contemporaneamente più beni sulla stessa linea.

Se questa è suddivisa in  $n$  stazioni, il caso ideale prevede che ogni postazione possa completare il proprio compito al massimo nel tempo  $L_0/n$ ,

che è il tempo teorico intercorrente tra l'uscita dalla linea, cioè il completamento, di due prodotti consecutivi; esso, detto *tempo ciclo* o *tack time*,  $T$ , è determinato dalla cadenza  $q = 1/T$ , la frequenza di completamento dei prodotti, uno dei parametri di progetto fondamentale.

Occorre che la sommatoria dei tempi di esecuzione dei tasks assegnati ad una stazione, il tempo di postazione, *station time*, coincida con il tempo ciclo.

Sfortunatamente, per la diversità di durata delle operazioni da svolgere, amplificata nel caso si tratti di una linea a forte componente manuale, non si riesce in genere nella pratica a raggiungere la perfetta uguaglianza tra *station times* e *tack time*.

Alcune stazioni dovranno quindi svolgere una sequenza di tasks che mediamente richiede più tempo della sequenza di tasks di altre stazioni, dovendo comunque il *lead time* (effettivo) di attraversamento,  $L$ , essere maggiore o uguale a quello teorico: le prime si troveranno perciò ad essere sovraccaricate, costituendo dei colli di bottiglia del processo; le altre, sottocaricate, esauriranno in anticipo il loro compito ed il prodotto dovrà attendere.

Il tempo di uscita effettivo del prodotto dalla linea,  $T_u$ , è in pratica corrispondente al maggiore tra le *station times*, quindi maggiore del *tack time*, il che decrementa la cadenza.

Se si definisce il coefficiente di utilizzazione di una risorsa,  $U$ , come il rapporto tra il tempo in cui effettivamente essa lavora e quello in cui è disponibile a farlo, segue che  $U$  sarebbe unitario per tutte nel caso ideale, diminuendo, nella realtà, per le risorse assegnate alle stazioni sottocaricate.

I parametri fondamentali delle linee di assemblaggio manuali sono, quindi, i seguenti:

- *Lead time di attraversamento*:  $L$  [min/pezzo] Tempo tra l'entrata e l'uscita del prodotto dalla linea;

- *Lead time teorico:*  $L_0$  [min/pezzo] Somma di tutti i tempi delle singole operazioni;  $L_0 \leq L$
- *Numero di postazioni:*  $n$ ;
- *Cadenza:*  $q$  [pezzi/min] Capacità produttiva teorica della linea;
- *Tempo ciclo o Tack time:*  $T = 1/q = L_0/n$  [min/pezzo] Tempo a disposizione dell'operatore per completare tutte le operazioni assegnate alla sua stazione;
- *Tempo di uscita:*  $T_u$  [min/pezzo] Tempo impiegato a completare un prodotto dalla stazione più lenta e tempo tra il completamento di due prodotti consecutivi;
- *Cadenza effettiva:*  $q^* = 1/T_u$  [pezzi/min];  $q^* < q$
- *Coefficiente di utilizzazione di una risorsa:*  $U = \text{tempo di attività} / \text{tempo di disponibilità}$ .

#### **1.4.2 Bilanciamento delle linee manuali.**

Ogni volta che si progetta ex novo o si riconfigura una linea di assemblaggio, occorre quindi tener presente l'importante problema del bilanciamento della linea stessa. Esso consiste nell'intervenire sulla distribuzione delle risorse e dei tasks tra le varie postazioni di lavoro lungo la linea, o sulla sequenza di beni mandati in produzione, in modo che il tempo di uscita di ciascun prodotto sia il più vicino possibile all'ideale, cioè al tack time.

Esistono quindi tre possibili strade da seguire per la realizzazione di un bilanciamento, che si differenziano per il parametro su cui si agisce.

Si distinguono così i criteri di bilanciamento in:

- Bilanciamento sui contenuti di lavoro (bilanciamento in senso classico);
- Bilanciamento sul numero di risorse;

➤ Bilanciamento sulla schedulazione.

Nel bilanciamento sui contenuti di lavoro, noti i tempi di esecuzione dei tasks ed il takt time, fissato il numero di postazioni, e noti i vincoli sia di precedenza tecnologica, sia di layout di linea, si assegna ad ogni codice di prodotto la distribuzione delle operazioni alle postazioni, compatibilmente con i vincoli, in modo da minimizzare il tempo d'uscita.

Nel bilanciamento sul numero di risorse, fissate le operazioni da eseguire in ogni postazione, se la linea è ad assemblaggio manuale si può variare il numero di operatori da assegnare alle postazioni rispetto al classico uno per stazione; ciò può avvenire in rialzo, così da avere, se i vincoli di processo lo consentono, più operatori in parallelo sulle stazioni più caricate ed abbassarne lo station time a livello del takt time, oppure, ma solo se la linea può lavorare non a pieno regime, in ribasso, così da assegnare allo stesso uomo stazioni i cui tempi, sommati, si avvicinino al takt time se si uniscono le più veloci, altrimenti a multipli del takt time.

Variando al ribasso il numero di operatori, ovviamente non si riesce a diminuire il tempo d'uscita, per cui il confronto con il caso originale non va incentrato sulle quantità prodotte in un certo tempo, ma, a parità di prodotti, sull'efficienza di produzione, misurata dai coefficienti di utilizzazione delle risorse.

Un modello di questo tipo è stato sviluppato, fra l'altro, nel presente lavoro, come si vedrà nel capitolo finale.

Nel bilanciamento sulla schedulazione, fissato il numero di operatori ed il contenuto di lavoro di ciascuna stazione, si studia il piano di produzione e si creano lotti di prodotti da mandare in linea consecutivamente in modo che, per ogni postazione, la somma degli station times per quella postazione all'interno di un lotto si avvicini al takt time moltiplicato per il numero di prodotti di cui quel lotto è costituito.

Si può decidere di far lavorare alcuni operatori in un primo momento in parallelo su una postazione per tutto un lotto, poi su quella successiva (per un lotto costituito da  $l$  prodotti, l'operatore addetto alla stazione  $j$  va a

coadiuvare l'operatore addetto alla stazione  $j-1$ , finché non sono stati eseguiti tutti i tasks di postazione  $j-1$  per gli  $l$  prodotti; poi l'operatore  $j$  ed il  $j-1$  si spostano a lavorare insieme gli  $l$  prodotti in postazione  $j$ , li mandano tutti alla postazione  $j+1$ , e ricominciano il ciclo). Questo comporta la necessità di *buffers* interoperazionali, ovvero piccole zone polmone di disaccoppiamento tra le postazioni per accumulare i semilavorati in uscita da una, prima che vadano alla successiva.

Per quanto riguarda la ricerca in tale ambito, essa è spesso approdata a soluzioni del problema che, in seguito ad ipotesi restrittive e semplificative, conducono troppo lontano dalla realtà: in particolare, l'ipotesi di sistema deterministico, cioè con tempi di esecuzione delle operazioni fissati ed invariabili, è insufficiente per una corretta descrizione dei sistemi reali, che presentano una variabilità stocastica dei tempi nella ripetizione di vari cicli di lavoro.

Recentemente, è stato svolto molto lavoro per descrivere e risolvere problemi più generalizzati e realistici, (*generalized assembly line balancing problem, GALBP*).

Sono numerose le complicazioni da introdurre nello sviluppo di efficaci algoritmi per la modellazione di sistemi reali, tra cui appunto l'aleatorietà dei tempi necessari ai tasks. Un approccio euristico a riguardo è quello noto come metodo di Kottas – Lau, di cui scriveremo nel prossimo Paragrafo. Il metodo di Kottas – Lau tratta l'assegnazione alle stazioni delle operazioni da svolgere, e si applica, quindi, ai bilanciamenti sui contenuti di lavoro.

Il mercato altamente competitivo ed orientato alle nicchie fa sì che i produttori cerchino di attrarre e soddisfare i consumatori offrendo prodotti sempre più diversificati e personalizzati. Differenti opzioni significano che differenti parti devono essere montate sul modello base. A causa dei grandi costi di costruzione e gestione di una linea di assemblaggio, le aziende producono un modello con differenti opzioni sulla stessa linea. Il problema di bilanciamento della linea cresce in complessità e diventa un *mixed model assembly line balancing problem*.

### **1.4.3 Il metodo di Kottas – Lau per il bilanciamento.**

Si è visto nel paragrafo 1.4.1 come la capacità produttiva di una linea di assemblaggio manuale sia limitata superiormente dalla stazione più lenta, e le stazioni meno caricate presentino tempi di inattività; si cerca pertanto, nel rispetto dei vincoli tecnologici, di assegnare i tasks alle stazioni in modo da garantire la cadenza prefissata al minimo tempo e costo.

Se un operatore non riesce a completare le azioni assegnategli nel tempo di ciclo, è possibile o dilatare il valore del tempo ciclo ritardando tutta la linea, oppure in molti casi in cui obbligatoriamente si deve rispettare la cadenza, il completamento può avvenire fuori linea, con costi aggiuntivi.

Per il secondo caso si vuole un metodo che tenga conto di ciò, implicitamente considerando la variabilità stocastica dei tempi, ed il rischio accettato di incorrere, pertanto, nello sfioramento del tack time .

Il metodo di Kottas – Lau si applica per il bilanciamento di una linea di assemblaggio manuale a prodotto singolo e tempi stocastici. Esso si basa sul fatto che, al diminuire del numero di operatori, cala il costo unitario del prodotto, ma aumenta il carico di lavoro per operatore, e con esso, a tempo ciclo fissato, la probabilità che egli non riesca a rispettare i tempi, e si generino quindi costi di mancato completamento, Figura 1.3. Si suppone che ad ogni operatore corrisponda una stazione.

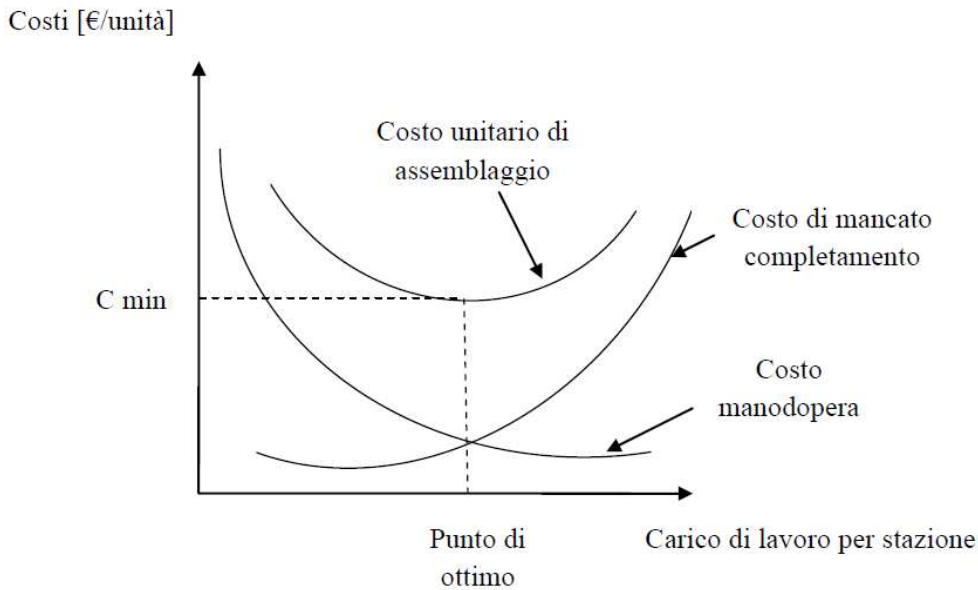


Figura 1.3 – Andamento dei costi al variare del carico di lavoro per stazione.

Occorrono alcune ipotesi semplificative:

- Il tempo ciclo e i vincoli di precedenza tra un'operazione e l'altra costituiscono gli unici vincoli per l'assegnazione dei compiti.
- Ciascun operatore è retribuito nella stessa misura, indipendentemente dalla mansione.
- Un'operazione può essere iniziata solo se tutte le operazioni con vincoli di precedenza sono state completate.
- Il tempo di completamento di ogni operazione è considerato aleatorio e caratterizzato da una distribuzione normale di probabilità di cui si possono calcolare il valor medio  $M_K$  e la deviazione standard  $\sigma_K$ ; la durata di ciascuna operazione è indipendente da quelle della altre operazioni e dall'ordine con cui esse sono eseguite.
- Se un'operazione è incompleta, continua a viaggiare in linea e vengono eseguiti tutti i successivi task comunque completabili; le operazioni incomplete verranno poi completate fuori linea; il costo  $I'_k$  di completamento fuori linea della K-sima operazione non dipende dalla percentuale in cui è stata precedentemente completata in linea.

Si devono stabilire o misurare i seguenti parametri:

- *Tempo ciclo della linea (tack time):*  $T = 1/q$  [min];
- *Costo orario del lavoro:*  $C$  [€/h];
- *Valor medio e deviazione standard della durata della k-sima operazione:*  $M_K, \sigma_K$ ;
- *Costo totale di mancato completamento, dovuto all'operazione K-sima, della k-sima stessa e di tutte le successive che necessitano di essa:*  $I_k = \sum_{k=1}^n I'_k$  ;
- *Numero operazioni immediatamente successive alla generica operazione:*  $v$ ;
- *Costo manodopera per l'esecuzione dell'operazione k-sima:*  $L_K = M_K C/60$ .

Il metodo si basa sulla definizione di:

- *Operazioni desiderabili;*
- *Operazioni sicure;*
- *Operazioni critiche.*

Al fine di definire tali tipologie, vengono svolte le seguenti considerazioni.

Se la durata delle operazioni è una variabile aleatoria con distribuzione normale, con  $p(t)$  funzione densità di probabilità, si definiscono la funzione di distribuzione  $F(t)$  e la funzione  $P(t)$ :

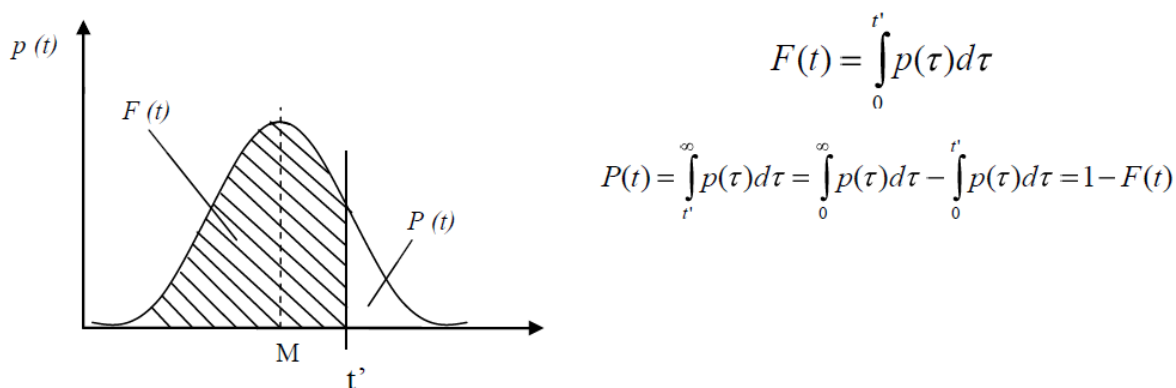


Figura 1.4 – Funzioni di probabilità.

Dove:

$F(t)$  = Probabilità che l'operazione abbia durata  $\tau < t'$ , cioè che sia ultimata nel tempo previsto

$P(t)$  = Probabilità che l'operazione abbia durata  $\tau > t'$ , cioè che al tempo  $t'$  non sia ancora ultimata

Per centrare la campana sull'origine, si definisce la variabile normalizzata  $z = (t - M)/\sigma$ ;  $F(z)$  assume valori tabulati.

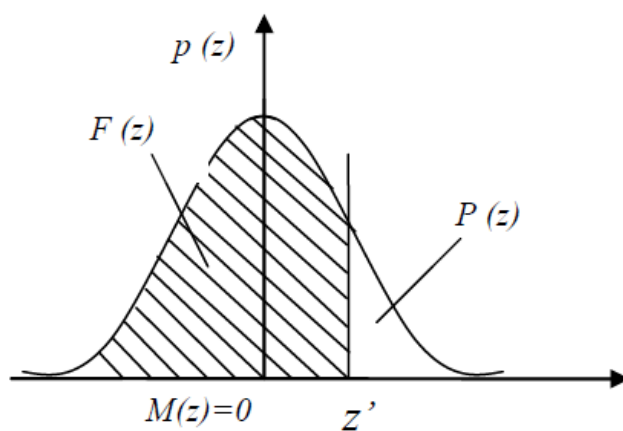


Figura 1.5 – Funzioni di probabilità normalizzate.

Se alla stazione sono assegnate operazioni con vincoli di precedenza, occorre considerare l'aleatorietà di tutte le operazioni precedenti, dato che la K-sima operazione non può essere completata se non lo sono state quelle che la precedono nel diagramma delle precedenze.

Si introduce così la variabile normalizzata

$$z_K = \frac{T - \sum_j M_j}{\sqrt{\sum_j \sigma_j^2}}$$

essendo  $j$  la generica operazione assegnata alla stazione considerata ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

La condizione di desiderabilità marginale della  $K$ -sima operazione è la seguente:

se  $L_K \geq P_K I_K$ , è *marginale desiderabile* assegnare l'operazione  $K$  alla stazione già aperta.

Si definiscono:

- *Probabilità che tutte le operazioni assegnate alla stazione, compresa la  $K$ -sima, siano ultimate entro il tempo ciclo  $T$ :  $F(z_K) = F_K$ ;*
- *Probabilità di mancato completamento della  $K$ -sima operazione entro il tempo ciclo  $T$ :  $P(z_K) = P_K = 1 - F(z_K)$ .*

Sviluppando la condizione di desiderabilità marginale, si ottiene:

$$F_k \geq 1 - \frac{L_K}{I_K}.$$

Quindi,

$$F(z_K^*) = 1 - \frac{L_K}{I_K},$$

dove  $z_K^*$  è il valore di soglia per la desiderabilità dell'operazione, e si ricava da tabella.

Si perviene, infine, alla condizione di desiderabilità della  $K$ -sima operazione nell'assegnazione alla stazione in esame:

se  $z_K \geq z_K^*$ , è *desiderabile* assegnare l'operazione  $K$  alla stazione già aperta.

In conclusione, un'operazione disponibile all'assegnazione è:

- *Desiderabile* se  $z_K \geq z_K^*$ .
- *Sicura* se  $z_K \geq z_{K=2,575}^*$  ( $F_K \geq 0,995$ ).
- *Critica* se non desiderabile anche quando assegnata ad una stazione vuota.

L'assegnazione di un'operazione ad una stazione, nuova o già aperta viene eseguita secondo i criteri espressi dal diagramma di flusso rappresentato in Figura 1.6.

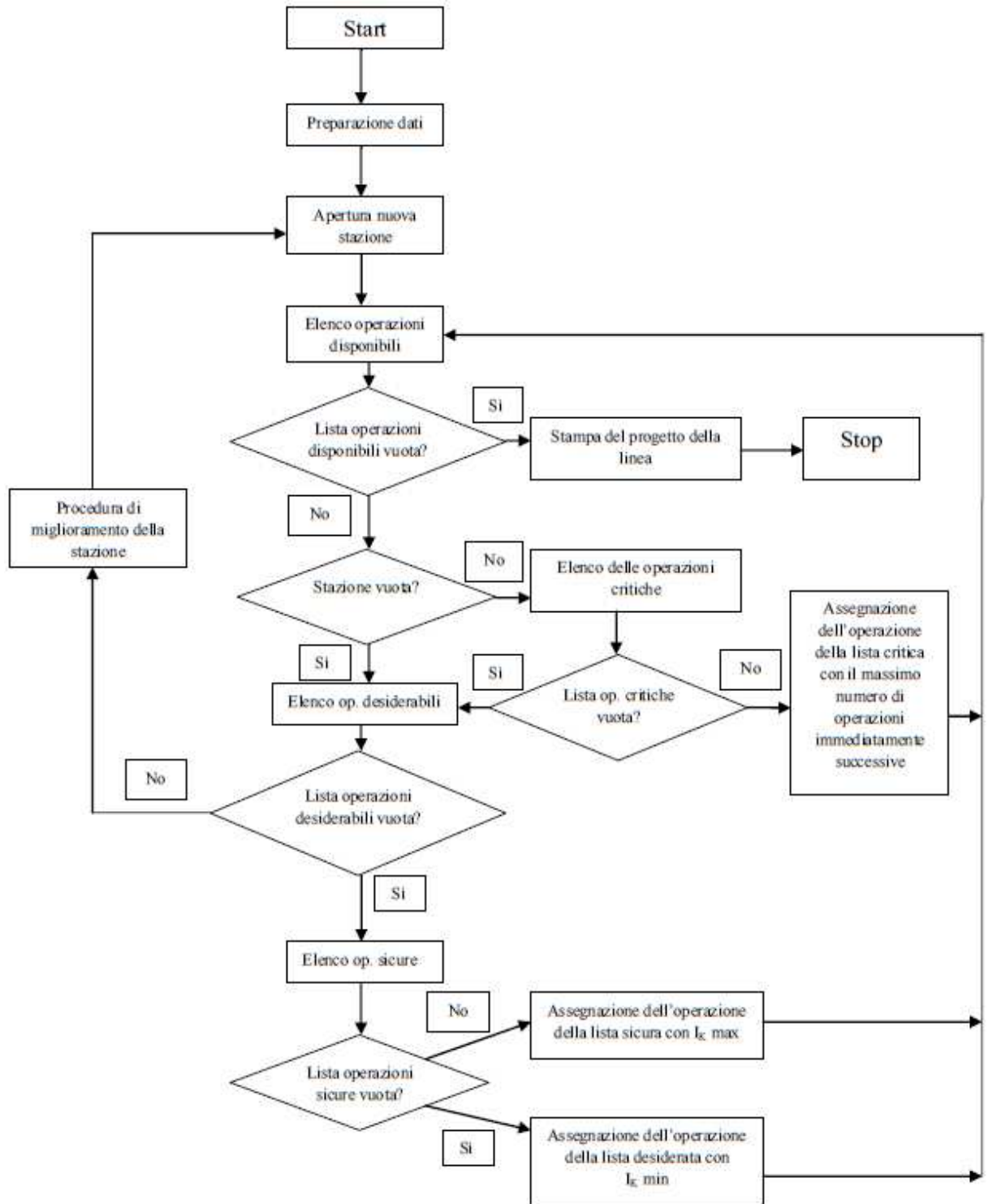


Figura 1.6 – Diagramma di flusso per l'assegnazione delle operazioni alle stazioni.

Vista l'importanza degli algoritmi nella creazione di modelli di bilanciamento per le linee di assemblaggio, verrà dedicato un capitolo specifico per approfondire tali trattazioni.

#### **1.4.4 Differenze fra Bilanciamento linee e Livellamento della produzione della lean Production (JIT).**

Può essere opportuno a questo punto, e visto che si tratterà anche della filosofia produttiva detta *lean production*, focalizzare qualche differenza che esiste fra attività che altrimenti potrebbero, a primo affronto, sembrare analoghe.

Nella metodica della *lean production*, tipica di alcune produzioni manifatturiere assimilabili a quella di assemblaggio autovetture, o assemblati elettronici quali TV, PC, tipicamente eseguiti su linee di assemblaggio manuale assistito, tipicamente si effettua un'attività che è il livellamento della produzione.

Il livellamento della produzione è una fondamentale condizione per produrre con sistema *kanban* e per ridurre al minimo l'inattività per quanto concerne manodopera, macchinario e materiale in lavorazione, ed è una delle condizioni fondamentali del sistema di produzione *JIT*.

Il *livellamento della produzione* consente di adeguare la produzione alle variazioni della domanda. Se la produzione è livellata, una linea di produzione non dovrà più produrre solo un tipo di prodotto unico in grandi lotti: al contrario, una linea dovrà produrre ogni giorno molte varietà di prodotti, in funzione della varietà di domanda del cliente. In tal modo la produzione è sempre aggiornata e le scorte sono ridotte.

Gli adattamenti sono effettuati sia su base mensile, sia su base giornaliera. La prima fase consiste nell'adattamento alle variazioni di domanda mensile nel corso dell'anno (adattamento mensile), mentre la seconda consiste nell'adattamento alle variazioni giornaliere nel corso del mese (adattamento giornaliero).

L'adattamento mensile si ottiene tramite il programma di produzione mensile dal programma di produzione principale (*master production*

*schedule*) che determina il livello medio di produzione di ciascun reparto nello stabilimento. Il programma di produzione principale si basa su una previsione di domanda nel breve periodo (tre mesi) corretta da aggiustamenti su base mensile.

Tipo dei prodotti finiti e rispettiva quantità vengono definiti con pochi (due) mesi di anticipo mentre il programma delle altre caratteristiche di dettaglio viene definito con un mese di anticipo rispetto al mese di produzione. Tali informazioni sono condivise con le aziende fornitrici nello stesso momento. In base a tale programma si definisce la distribuzione della produzione giornaliera.

La produzione livellata interessa due campi: la produzione media giornaliera totale di un prodotto e la quantità media di ciascuna variante del prodotto all'interno del totale generale.

L'adattamento giornaliero, fase successiva, è reso possibile con l'assegnazione del programma di produzione giornaliero, ed a questo punto emerge il ruolo del sistema kanban, che realizza l'assegnazione del programma giornaliero e la trazione (anteriore) del ritmo produttivo se sono definite le sequenze di lavorazione. Nel caso della linea di montaggio di modelli misti questa programmazione rende possibili prelievi livellati sia presso i reparti di lavorazione sia presso i suoi fornitori.

In questi sistemi la produzione, infatti, risulta attivata dalla domanda a valle del processo tramite la propagazione di segnali costituiti da cartellini Kanban, che circolano fra le varie fasi in cui è suddiviso il processo, tipicamente in linea, e che indicano alle fasi più a monte cosa deve essere prodotto e fatto avanzare, per rispondere alla domanda.

Se una fase a valle preleva i pezzi in modo fluttuante in relazione alla domanda - per ciò che concerne quantità e tempo - la fase a monte deve essere capace di provvedere per capacità, materiale da utilizzare, macchinario e manodopera in modo da soddisfare le punte massime delle variazioni di domanda. In tale modalità, se esistono molte fasi di lavoro in successione, l'amplificazione della quantità stoccata di materiali utilizzabili per ogni codice trattato e la determinazione della capacità richiesta a

ciascuna fase può amplificarsi man mano che si risale verso monte. Per prevenire grandi escursioni di questo genere sulle linee di produzione, ed anche nei riguardi dei fornitori esterni, si tenta di minimizzare la fluttuazione della produzione sulla linea di montaggio finale. Ciò vuol dire che una linea di montaggio convoglierà in sequenza ciascun prodotto distinto nel lotto minimo possibile, mirando ad attuare il lotto ideale di "una unità" per quanto riguarda produzione e trasporto.

In sintesi, il livellamento della produzione minimizza le variazioni nelle quantità prelevate di ogni item necessario come componente per ogni tipologia di articolo da produrre presso ciascuna fase di sub assemblaggio, permettendo così a tale fase di produrre ad una cadenza o quantità oraria prefissata o costante.

Riferiamoci ad un *esempio*.

In una linea di produzione si devono produrre 10.000 vetture tipo NMW in un mese lavorativo di 20 giorni con un turno giornaliero di 8 ore. Le 10.000 NMW sono composte da 5.000 berline, 2.500 coupé e 2.500 familiari. Se si dividono queste cifre per i 20 giorni lavorativi, si ottiene la produzione giornaliera di 250 berline, 125 coupé e 125 familiari: questo è il livellamento della produzione per quanto riguarda il numero medio di vetture di ciascun modello da produrre al giorno.

Ancora, in maniera equivalente, nel turno di 8 ore di attività pari a 480 minuti, si devono produrre tutte le 500 vetture. Risulta, pertanto, un tempo ciclo unitario, tempo medio per produrre una vettura di qualsiasi modello, di 0,96 minuti (480/500), ovvero circa 57,5 secondi.

La definizione di un mix appropriato, cioè della sequenza di produzione, si può definire confrontando il tempo ciclo reale per produrre ognuna delle vetture del mix, con il tempo massimo concesso per produrre un certo modello. Per esempio, il tempo massimo per produrre una NMW, "modello berlina", si determina dividendo la durata del turno (480 minuti primi) per il numero di queste da produrre durante il turno (250), ricavando il tempo

massimo di 1 primo e 55 secondi: ciò significa che ogni primo e 55 secondi (115 s = 2 \* 57,5 s) DEVE essere prodotta almeno una berlina.

Tale slot di tempo è doppia rispetto al valore di cadenza massima per la produzione di una singola vettura generica, di 57,5 secondi, e quindi consegue che una qualsiasi altra vettura può essere prodotta non oltre che fra il momento in cui una berlina viene ultimata ed il momento in cui un'altra berlina deve essere iniziata.

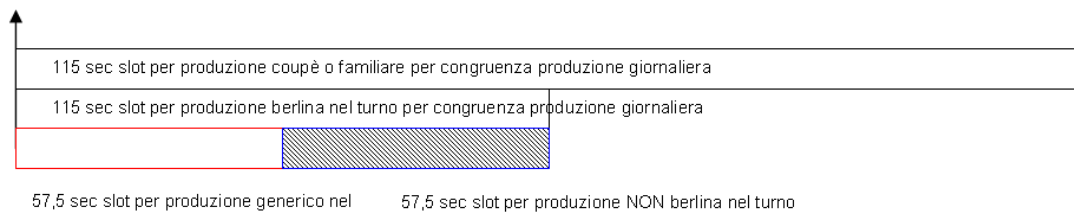


Figura 1.7 – Raffigurazione temporale della cadenza di produzione.

Di conseguenza la sequenza base ripetibile, o modulo produttivo, della linea è: una berlina, un altro modello, una berlina, un altro modello e così via.

Il tempo massimo per produrre una coupè o una familiare è di 3 primi e 50 secondi ( $480/125 = 230,4$ ). Confrontando questo valore con il tempo ciclo di 57,5 secondi si nota subito che 3 vetture di qualsiasi modello possono essere prodotte tra due familiari o tra due coupè. Se una familiare segue la prima berlina sulla linea, allora la sequenza della stessa linea sarà: una berlina, una familiare, una berlina, una coupè, una berlina, una familiare, una berlina, una coupè, e così via.

È questo un esempio di livellamento della produzione per quanto riguarda la varietà dei prodotti.

In realtà, questo tipo di possibilità è riservato ai casi per i quali, anche se il mix produttivo può risultare anche molto spinto, il tipo di prodotto abbia un'elevata tipicità, ed un elevato valore aggiunto, con ausilio di macchinari ed attrezzature ausiliarie molto flessibili e universali.

Solo in tale caso la tipicità del processo di assemblaggio, la stabilità della produzione, effettuata su previsione corretta da ordine, i vantaggi complessivi, rispetto alle ridotte saturazioni degli operatori possono avere un

senso. In tutti gli altri casi in cui il valore del bene, la variabilità del tipo di assemblaggio richiesto, siano differenti, le tecniche di bilanciamento sono meglio applicabili.

Tra i vantaggi del livellamento c'è quello che il sistema si adatta senza strappi alla variazione di domanda, modificando gradualmente solo la cadenza (numero) dei lotti senza alterare la dimensione del lotto stesso, cioè replica il modulo più volte ed in tempo fase più breve, tra l'altro sollecitato a questo dalla circolazione dei kanban.

È fondamentale per l'implementazione del livellamento la riduzione del lead time, per avere tempi ciclo per tipo di item minori dello slot tempo disponibile per il modulo. Tale obiettivo si realizza eliminando o minimizzando i tempi di attrezzamento (accenneremo nel prossimo capitolo alla tecnica SMED, dedicata, appunto alla riduzione dei tempi di riattrezzaggio) il che, a sua volta, consentirà la riduzione della dimensione dei lotti.

La produzione mixed-model non va confusa con la produzione multi-model, associata a linee che, pur essendo capaci di produrre diversi modelli, possono richiedere operazioni di setup particolarmente dispendiose.

Nel capitolo successivo introdurremo i concetti basilari della lean production, filosofia di approcciarsi al metodo che caratterizza tale lavoro ed in generale la moderna organizzazione dei flussi produttivi.

## Bibliografia

R.B. CHASE, F.R. JACOBS, N.J. AQUILANO, A. GRANDO, A. SIANESI, 2005. *“Operations Management nella produzione e nei servizi”*. McGraw-Hill.

E.J. HAY, 1987. *“Just in Time”*. Gruppo editoriale Jackson, Milano.

A. MARTINI, 2007. *“Algoritmi per il problema generalizzato di bilanciamento delle linee di assemblaggio”*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia.

J.F. KOTTAS, H.S. LAU, 1981. *“A stochastic line balancing procedure”*. International Journal of Production Research, 19, 177-193.

A. PARESCHI, 2007. *“Impianti industriali”*. Progetto Leonardo, Bologna.

R. GAMBERINI, A. GRASSI, B. RIMINI, 2006. *“A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem”*. International Journal of Production Economics, 102, 226-243.

## 2 LA FILOSOFIA LEAN.

Negli ultimi decenni, più che in passato, le richieste del mercato sono diventate mutevoli e facilmente influenzabili da diversi fattori. Le crisi finanziarie, i cambiamenti negli scenari socio-politici, l'ingresso nei mercati di nuovi Paesi, hanno portato la necessità di variare il modo di pensare e di strutturare la produzione. Oggi il prezzo di vendita non è più controllabile dalle aziende perché è nel mercato che si stabilisce il valore delle merci. Tale fattore ha, in molti casi, colto impreparate le aziende con conseguenze immaginabili.

Un rimedio per mantenere i profitti consiste nel ridurre i costi, quindi eliminare gli sprechi. La soluzione si chiama *Lean Production*, il cui obiettivo è incrementare l'efficienza produttiva, la qualità dei prodotti e la capacità di risposta dell'azienda, accorciando i *lead time*, ovvero il tempo di attraversamento necessario per soddisfare le necessità del cliente e, quindi, riducendo i costi.

Il termine "*lean*", che significa snello, esprime il concetto in base al quale i metodi produttivi devono ridurre al minimo le risorse impiegate. Il cardine del pensiero snello, infatti, è rappresentato dalla continua ricerca ed eliminazione degli sprechi, allo scopo di produrre di più con un minore consumo di risorse.

La *Lean Manufacturing* nasce presso l'azienda giapponese *Toyota Motor Company* dopo che nel 1950 Eiji Toyoda intraprese un pellegrinaggio di tre mesi a Detroit, allo stabilimento di Rouge di Ford, caratterizzato dalla più grande ed efficiente struttura produttiva del mondo (produzione di massa: 7000 auto/giorno).

Di ritorno da Detroit, Toyoda comprese che le idee convenzionali osservate in Ford sarebbero state inattuabili nella sua azienda: in trenta anni la Toyota aveva fabbricato 2685 automobili, contro le 7000 al giorno della Ford. Eiji Toyoda e Taichi Ohno conclusero che in Giappone la produzione di massa non avrebbe mai funzionato perché:

- Il mercato interno era molto limitato ma la gamma di veicoli era molto elevata.
- I lavoratori non volevano essere considerati come un costo variabile o pezzi intercambiabili.
- L'economia giapponese devastata dalla guerra soffriva per la mancanza di capitali e non poteva acquistare tecnologie occidentali.
- L'estero traboccava di colossi automobilistici ansiosi di entrare in Giappone.

Andando contro le indicazioni del ministero giapponese la Toyota, la Nissan e le altre fabbriche automobilistiche decisero di produrre gamme complete di automobili con una varietà di modelli diversi. Ohno voleva produrre automobili di massa, utilizzando un limitato numero di presse per produrre l'intero veicolo. Sperimentò la tecnica dei cambi rapidi passando da un giorno a 3 minuti di set up.

Sperimentò che il costo unitario dello stampaggio di piccoli lotti era inferiore a quello relative a grandi partite:

- Produrre quantitativi ridotti eliminava le spese d'immobilizzo degli immensi stock di pezzi finiti.
- La fabbricazione di pochi pezzi rivelava istantaneamente gli errori di stampaggio prima che fosse assemblata l'auto.

Inizieremo, quindi, questo capitolo descrivendo i principi che al tempo hanno portato Toyota ai vertici della produzione mondiale, sia in termini di quantità e qualità sia come filosofia di intendere la produzione stessa, partendo dal concetto base di produrre ciò che serve e solo quando serve realmente: *Just in Time*.

## **2.1 Il modello Toyota.**

Con il termine JIT, ovvero *Just In Time*, si intende una tecnica di gestione industriale che consiste nel produrre e consegnare il prodotto richiesto nella quantità, nel luogo e nel momento richiesto, in un'unica espressione "fare un'attività solo quando serve".

Nell'ottica della produzione legata a logiche di mercato, tutto ciò si traduce nel produrre ciò che il cliente richiede nelle quantità a lui necessarie, consegnare nei tempi previsti e, sempre più fondamentale, assicurare un livello qualitativo soddisfacente.

Si inverte, quindi, il vecchio metodo di produrre prodotti finiti per poi stoccarli a magazzino, in attesa della vendita, tipico del sistema *push* (ovvero la produzione spinge verso il magazzino e quindi verso il cliente), alla logica *pull*, ovvero produrre ciò che sarà venduto a breve o addirittura che è stato già venduto; tale logica, come vedremo in seguito, rappresenta uno dei principi fondamentali della lean production.

Il JIT divenne rapidamente uno dei "prodotti" più conosciuti ed esportati della filosofia produttiva giapponese, e consentì tutta una serie di miglioramenti e di razionalizzazioni che produssero effetti assolutamente inaspettati nella produzione meccanica in generale.

Si pensi che applicando il principio del *just in time* si riuscirono a realizzare economie sostanziali, producendo autovetture praticamente su ordinazione, diminuendo i tempi di consegna, evitando così il notevole rischio, ed il costo connesso, di una produzione in linea con le stime di assorbimento del mercato. La stima sui tassi di assorbimento del mercato comportava appunto degli elevati indici di aleatorietà, oltre che i considerevoli costi di stoccaggio e custodia dei prodotti finiti.

Questa filosofia innovativa aprì la strada ad ulteriori sviluppi, come la TQM, ovvero la *Total Quality Management*, in pratica la gestione totale della qualità nell'ottica del coinvolgimento di tutti i livelli aziendali; la TPM, ovvero la *Total Production Maintenance*.

Questa concezione del sistema produttivo, definito anche *Toyotismo*, ispirò la creazione di una visione ancora più mirata verso l'eliminazione degli sprechi: la *Lean Production*.

## **2.2 La Lean Production.**

Il termine *Lean Production*, coniato dagli studiosi James P. Womack e Daniel T. Jones nel loro libro "*La macchina che ha cambiato il mondo*" (e poi nel seguito "*Lean Thinking*"), in cui i due hanno per primi analizzato in dettaglio e confrontato le performance del sistema di produzione dei principali produttori mondiali di automobili con la giapponese *Toyota*, rivelando le ragioni della netta superiorità di quest'ultima rispetto a tutti i concorrenti.

La *Lean production* è dunque una generalizzazione e divulgazione in occidente del sistema di produzione Toyota (o Toyota Production System - TPS), di cui accennavamo nel paragrafo precedente, che ha superato i limiti della *produzione di massa* (sviluppato da *Henry Ford* e *Alfred Sloan*) applicata allora (ed ancora oggi) dalla quasi totalità delle aziende occidentali.

La possibilità di limitare gli sprechi sino alla loro eliminazione è perseguibile basandosi sui principi fondamentali del *lean*.

Secondo la metodologia Lean, l'eliminazione sistematica degli sprechi è possibile attraverso il perseguimento di 5 principi che costituiscono l'ossatura a cui fare riferimento nell'azione di ripensamento dei processi aziendali.

Tali principi possono definirsi come segue (*Jim Womack*, 1996):

1. **Definire cosa rappresenta un valore per il cliente:** il punto di partenza della caccia allo spreco è l'identificazione di ciò che vale, e che produce valore. Il valore, però, va definito a partire dal cliente e ha significato solo se è espresso in termini di prodotti in grado di soddisfare le sue esigenze, ad un dato prezzo e in un determinato momento.

2. **Identificazione del flusso di valore:** Il flusso di valore per un dato prodotto consiste nell'intera serie di attività necessarie per trasformare le materie prime in prodotto finito.

L'analisi del flusso di valore rende sempre evidente grandi quantità di spreco attraverso la classificazione delle attività in tre categorie:

- Attività che creano valore (tutte quelle il cui costo può essere trasferito al cliente);
- Attività che non creano valore ma necessarie (non sono eliminabili con gli attuali sistemi di sviluppo prodotto, gestione ordini e produzione);
- Attività che non creano valore e non necessarie (possono quindi essere eliminate da subito);

La costruzione di un "flusso lean" richiede un'analisi approfondita delle attività e l'eliminazione di tutte quelle inutili.

3. **Far scorrere il flusso:** Definito con precisione il valore (primo principio), identificato il flusso di valore per un dato prodotto o famiglia di prodotti ed averlo ricostruito eliminando le attività inutili attraverso la mappatura dei flussi (secondo principio); bisogna fare sì che le restanti attività creatrici di valore formino un flusso (terzo principio). Il pensiero snello rovescia il tradizionale modo di ragionare attraverso "lotti", "funzioni" e "uffici". Infatti i compiti possono quasi sempre essere eseguiti in modo più efficace se il prodotto viene lavorato ininterrottamente dalla materia prima al prodotto finito. Il flusso continuo in produzione si raggiunge soprattutto attraverso interventi radicali, che permettono di trasformare in breve tempo le attività produttive necessarie per fabbricare un prodotto da un sistema a lotti e code spingendosi verso un flusso continuo.

4. **Attivare una gestione "pull":** quando l'azienda ha definito il valore (per il cliente), ha identificato il flusso di valore, ha eliminato gli

ostacoli e quindi gli sprechi per fare sì che il flusso scorra senza interruzioni, allora è giunto il momento di permettere ai clienti di tirare il processo (cioè il flusso di valore). In definitiva i clienti "tirano il valore dall'impresa". Questo vuol dire acquisire la capacità di progettare, programmare e realizzare solo quello che il cliente vuole nel momento in cui lo vuole. In questo modo si riducono gli stock e, di conseguenza, i capitali immobilizzati.

5. **Perseguire la perfezione:** Questo ultimo principio può sembrare presuntuoso e va quindi interpretato nel senso di miglioramento continuo (KAIZEN). Infatti se si sono applicati correttamente i primi quattro principi si creano sinergie impensabili che mettono in moto un processo continuo di riduzione dei tempi, degli spazi, dei costi. L'applicazione dei principi lean deve essere sistematica e continua per giungere a continui miglioramenti. In questo senso il quinto principio deve essere da sprone per l'incessante applicazione dei principi lean e rappresentare ogni volta non un punto di arrivo ma un nuovo punto di partenza. Una volta finito si deve ricominciare per fare emergere nuovi sprechi ed eliminarli.

Secondo quanto definito possiamo, quindi riassumere schematicamente i concetti base per conoscere la metodologia per il riconoscimento e la riduzione/eliminazione degli sprechi.



Figura 2.1 – I principi fondamentali della Lean.

Il processo produttivo, quindi, è trattato in modo globale al fine di ridurre al massimo la complessità della produzione puntando sulla sua flessibilità, coinvolgendo fin dall'inizio tutte le funzioni aziendali, in questo modo possiamo individuare alcuni settori (Figura 2.2):

- *Progettazione*: il prodotto è studiato considerando i problemi inerenti la sua produzione (*DFX*) evitando la sua riprogettazione cioè gli sprechi dovuti al non essere riusciti a "fare bene fin dalla prima volta".
- *Produzione*: seguire gli insegnamenti del JIT.
- *Valorizzazione*: perseguire la qualità totale (TQM, ciclo di *Deming*).



Figura 2.2 – Le funzioni aziendali della produzione snella.

Credo sia opportuno sottolineare alcuni aspetti basilari del lean.

In primo luogo, la partecipazione all'attività produttiva intesa in maniera trasversale. Non si può pensare di progettare e bilanciare una nuova linea di prodotto senza essersi confrontati con la realtà della produzione. L'esperienza e la conoscenza diretta degli operatori maturata giornalmente sulla postazione di lavoro deve essere valorizzata e costituire un valido supporto nelle scelte strategiche.

Considerare i notevoli guadagni che si possono ottenere, in termini di efficienza produttiva, dal concorrere di tanti piccoli miglioramenti. Concetto, questo, in contrapposizione con una certa mentalità occidentale che vede nei grandi "balzi tecnologici" gli unici artefici del miglioramento; in effetti, bisogna considerare che tutti gli aspetti che possono portare benefici, dalla semplice pulizia del posto di lavoro, sia che si tratti di una macchina che di un banco (concetto alla base della TPM), sia dell'utilizzo di semplici meccanismi di *poka-yoke*, ovvero accorgimenti tecnici, spesso di basso costo, in grado di evitare erronee lavorazioni dovute, ad esempio, a distrazioni da parte dell'operatore (quali maschere per evitare errati staffaggi dei componenti, pulsantiere di fine corsa, ...).

Infine è necessario attivare un rapporto di unione e piena collaborazione (potremmo definirla come *partnership*) sia all'interno delle imprese che fra gli operatori della filiera industriale. Parlare di *partnership* fra gli uffici della stessa azienda sembra un concetto scontato, in realtà ci si trova spesso a dover fare i conti con problemi comunicativi tra i vari reparti e tra le varie funzioni aziendali. Solo le aziende che riescono ad essere estremamente armoniche e con forte coesione possono aspirare al quel miglioramento continuo di cui la realtà industriale oggi necessita.

Nel prossimo paragrafo accenneremo a quello che può significare il lean in una linea di assemblaggio.

### **2.3 Il lean in linea.**

Una linea lean è un flusso (*flow*), una “corrente” di produzione che una volta attivata deve viaggiare senza intoppi alla cadenza prestabilita. Tuttavia i processi produttivi nascondono innumerevoli insidie: dalle problematiche legate alla capacità produttiva richiesta, alle attrezzature, alle difficoltà di montaggio di determinati componenti.

Pensare di costruire una linea secondo i principi della lean production significa, non tanto confrontarsi con altre realtà aziendali che potrebbero rappresentare l'eccellenza (*benchmarking*), ma ci deve confrontare (ed io aggiungerei “umilmente”) con la perfezione.

Bisogna precisare che questa perfezione deve essere intesa come un asintoto che, pur essendo per definizione irraggiungibile, deve svolgere un ruolo di riferimento costante.

Come abbiamo definito nei paragrafi precedenti, il miglioramento può essere dato da grandi innovazioni (quello che i giapponesi chiamano *kaikaku*), ma soprattutto nei piccoli miglioramenti continui (*Kaizen*, *workshop*).

Per ragionare in termini di lean in linea di produzione è necessario approfondire il concetto, già accennato in precedenza, di *muda*.

#### **2.3.1 Il concetto di Muda**

Il *muda* è lo spreco, ovvero qualsiasi attività umana che assorbe risorse ma che non crea valore. Taiichi Ohno, che è stato sicuramente uno dei più feroci nemici del *muda*, ne ha classificati i primi sette:

1. *Difetti*, ovvero prodotti non conformi che necessitano di interventi aggiuntivi (riparazioni, rettifiche, ...).
2. *Sovraproduzione* di beni non necessari.
3. *Magazzini* di prodotti che rimangono in attesa di essere spediti o di ulteriori lavorazioni.

4. *Lavorazioni* non necessarie.
5. *Spostamenti* non necessari, soprattutto di persone.
6. *Trasporti*, di beni, non necessari.
7. *Attese*, quelle di operatori che aspettano il completamento dei cicli lavorativi delle macchine o che si concludano attività a monte.

A queste sette Womack e Jones ne hanno aggiunto un ottavo:

8. La *progettazione* di beni e servizi che non soddisfano i bisogni dei clienti.

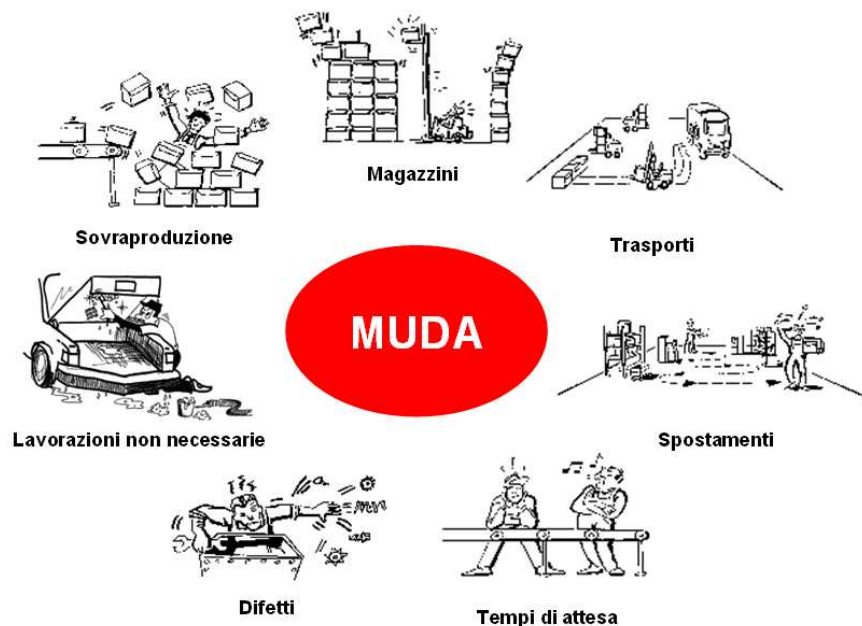


Figura 2.3 – Rappresentazione grafica dei 7 tipi di muda secondo la classificazione di Ohno.

L'analisi degli sprechi dettata da questi otto capisaldi, porta a distinguere due fondamentali tipologie di muda:

1. **Muda di tipo 1:** in questo caso ci riferisce ad azioni necessarie per il completamento del prodotto, ma che non danno direttamente valore aggiunto; un esempio classico possono essere i collaudi. In effetti, se si riuscisse ad avere una catena produttiva perfetta, non avremmo bisogno di effettuare un collaudo funzionale per accertarci della bontà del prodotto. Tuttavia non è possibile eliminare i collaudi, si interviene

nel cercare di diminuirne l'impatto in termine di tempi e di costi cercando di controllare e migliorare il processo produttivo a monte. Quindi i muda di tipo 1 sono quelle attività che si possono ridurre ma che non possono immediatamente essere eliminate.

2. **Muda di tipo 2:** è un tipo di spreco eliminabile da subito. Nelle realtà aziendali ci si imbatte molto spesso in questo tipo di spreco, che risulta essere del tutto inutile. Basti pensare a lavorazioni meccaniche che necessitano in maniera cronica di rettifiche, oppure ad assemblaggi di componenti difettosi, al ripetersi di determinati errori nei montaggi, un cattivo bilanciamento dei task che comporta dei colli di bottiglia in linea; tutto ciò, non solo non costituiscono valore aggiunto, ma risulta nocivo sotto tutti i punti di vista: performance, costi, qualità, ... .

Il muda di tipo 2 è definito forse il principale nemico dell'applicazione della filosofia lean in una linea di montaggio, nel paragrafo successivo daremo un breve cenno sulle metodologie da utilizzare per poterlo sconfiggere o quanto meno ridurre.

### **2.3.2 Sconfiggere lo spreco.**

Lo spreco, infatti, è qualsiasi cosa diversa dal quantitativo minimo di attrezzature, materiali, parti e addetti che sono assolutamente essenziali alla produzione. Il sistema di produzione Toyota ha sviluppato 7 strategie di eliminazione dello spreco:

1. **Network di fabbriche focalizzate.** Toyota ha 12 stabilimenti situati dentro e presso Toyota City e altre aree del distretto di Aichi. Rispetto ad ampie strutture industriali, verticalmente integrate, i giapponesi prediligono i piccoli impianti specializzati.
2. **Group Technology.** La lavorazione per celle di produzione permettono di:

- Eliminare i tempi di movimentazione e attesa tra due operazioni.
  - Ridurre le scorte.
  - Ridurre il numero di addetti necessari (gli operatori dovranno essere polivalenti e maggiormente preparati).
3. **Qualità totale.** Realizzare il prodotto correttamente fin da subito e, in caso di problemi, bloccare immediatamente il processo o la catena di montaggio. Gli operatori sono responsabili della qualità dell'output del loro processo e sono anche addetti alla manutenzione (TQM e TPM).
4. **Just In Time.** Già trattato nei paragrafi precedenti, lo elenchiamo tra i punti fondamentali nella "lotta allo spreco". In breve: produrre quanto necessario, quando necessario e nulla di più (il resto è considerato spreco). La dimensione ideale del lotto è "uno" per minimizzare tempi di transito e quantità da trasferire (i fornitori consegnano anche più volte al giorno). Così facendo il livello delle scorte si riduce, manifestando le non conformità qualitative.
5. **Heijunka.** Livellamento dei carichi di stabilimento. Rappresenta la "regolarizzazione" dei flussi di produzione per attenuare le onde d'urto normalmente scatenate dalle variazioni di programmazione. Una variazione in una fase di assemblaggio finale si ripercuote a monte lungo la *supply chain* in modo amplificato. Per neutralizzare il problema si eseguono aggiustamenti di piano minimali, definendone uno mensile con ritmo produttivo congelato. Toyota produce ogni giorno lo stesso mix produttivo in piccole quantità, in modo da avere tutta la gamma di prodotti per fronteggiare le variazioni di domanda. La velocità delle macchine o della linea è regolata per produrre la sola quantità giornaliera pianificata.
6. **Kanban.** E' un termine giapponese che letteralmente significa "cartellino". Per il controllo di produzione: in un sistema *kanban* i processi a monte producono solo i pezzi sufficienti per rimpiazzare quelli che i processi

successivi hanno richiesto. Gli operatori, in ogni processo vanno al processo precedente per prelevare le parti di cui necessitano; ciò viene fatto nel tempo e nelle quantità giuste implementando così il vero pull system. In pratica il kanban, indicante la tipologia del materiale usato per una lavorazione, è apposto su un contenitore che una volta vuotato viene rifornito. Il flusso, in tempo reale, dell'approvvigionamento, evita, quindi, gli stock di magazzino ed i costi derivanti.

7. **SMED.** Letteralmente vuol dire “Single Minute Exchange of Die”, ovvero “cambio stampo in un solo digit”. La grande innovazione di tali metodologie risiede nella possibilità di ridurre fortemente i tempi impiegati per effettuare un’operazione di set-up con un singolo digit ossia un lasso di tempo inferiore a dieci minuti. Nasce nell’industria dell’auto, ma poi diventa applicabile in tutti i settori industriali. Le prime forme dell’approccio sono state ideate e introdotte dall’ingegnere giapponese *Shigeo Shingo*. Il suo merito è quello di aver segnato una svolta su come affrontare i problemi del cambio pezzo e del setup delle macchine e degli impianti per contenere i tempi di attrezzaggio e mantenere flussi livellati.

L’attività operativa per l’attuazione della metodologia SMED prevede i seguenti 6 step.

1. Scelta del setup da analizzare.
2. Rilevare e rappresentare l’attività.
3. Analizzare e migliorare l’attività.
4. Simulare la nuova attività.
5. Definire lo standard.
6. Monitorare.

### 2.3.3 La metodologia Lean.

Nei paragrafi precedenti si è trattato largamente il concetto di spreco e la necessità sempre crescente di ridurlo al minimo. Sono stati esposti anche diversi strumenti per ottimizzare i tempi ed i processi di produzione (tipo SMED, kanban, ...), vediamo in questo paragrafo di fornire una panoramica maggiormente completa delle metodologie tipiche della Lean Production.

- *Visual Management*: letteralmente “la gestione a vista”, ovvero l’uso di colori, tabelle, lavagne, maxi schermi, per avere una visione chiara, veloce e completa dei processi, dello stato di avanzamento della produzione, ma anche delle attrezzature, dei sistemi di controllo e delle altre informazioni necessarie a comprendere rapidamente l’obiettivo da raggiungere.
- *Value Stream Mapping (VSM)*: focalizzata sul concetto del valore, si tratta di una rappresentazione grafica tramite simboli standard del processo, mettendo in evidenza sia il flusso delle informazioni che quello dei materiali. In questo modo risulta più facile individuare i punti critici, ovvero i consumi di risorse che tali processi generano.
- *Poka Yoke*: già accennata in precedenza, letteralmente significa “a prova di errore”. Si tratta di attrezzature, strumenti, procedure in grado di evitare il generare di errori da parte degli operatori meno accorti. L’utilizzo di tali sistemi sta sempre più prendendo piede nelle nostre realtà industriali, il perché è veloce da comprendere: soprattutto in produzione, l’introduzione di un’attrezzatura in grado di individuare oggettivamente un possibile errore comporta, a fronte chiaramente della spesa iniziale per acquisirne la tecnologia, un notevole risparmio in termini di rilavorazioni dei prodotti difettosi o peggio se tale difetto arriva sino al cliente finale (rientri di materiali, richiami, danni all’immagine aziendale,...). Si possono fare diversi esempi,

personalmente mi è capitato più volte, durante la mia attività lavorativa, di trovarmi di fronte ad errori nell'assemblaggio di un particolare componente per svariati motivi: dalla somiglianza con un altro codice alla mancanza di attrezzature idonee od alla distrazione degli operatori. In molti casi abbiamo risolto il problema introducendo una maschera particolare che "costringeva" l'operatore a **NON** montare in maniera erranea, accompagnata da un'istruzione operativa come monito per l'utilizzo dell'attrezzatura (VSM).

- *Target Costing*: metodologia per individuare, già dalla fase di progettazione di un nuovo prodotto, una chiara e univoca strategia di produzione, che tenga conto di tutto il ciclo di vita del prodotto sviluppato con l'obiettivo di ridurre i costi e migliorarne la qualità. Basti pensare alla standardizzazione dei componenti di un prodotto. La riduzione di questi comporta notevoli vantaggi economici, sia per l'acquisto di quantità maggiori dello stesso particolare che per la gestione stessa di essi (magazzini, logica di accumulo, flussi gestionali, ...).
- *Problem Solving*: in altre parole, le attività atte a "risolvere un problema". Fra le metodologie usate nel problem solving vi sono: l'analisi di Pareto, la ruota di Deming (PDCA – Plan do Check Act), il metodo dei "5 perché", il diagramma di causa-effetto, di sicura importanza ma che non tratterò in questo lavoro per evitare di dilungarmi eccessivamente.
- *FMEA*: Failure Mode Effect Analysis, un metodo particolarmente strutturato per l'analisi dei modi di guasto/criticità del prodotto. La FMEA può essere di progetto (DFMEA – Design FMEA), dove vengono preventivamente evidenziate tutte le possibilità di guasto/difetto dovute ad un'errata o non ottimale progettazione, oppure di processo

(PFMEA – Process FMEA), in questo caso si analizzano le criticità in fase di produzione del prodotto con l'obiettivo di ridurre gli scarti.

- **6-SIGMA**: si tratta della progettazione e dell'attuazione di un sistema di gestione della qualità che si basa sul controllo dello scarto quadratico medio, (indicata con la lettera greca Sigma) il cui obiettivo è quello di portare la qualità stessa del prodotto/processo un livello ottimale, obiettivo raggiungibile solo attraverso un miglioramento continuo (*continuous improvement*). Il metodo 6-sigma significa raggiungere un tale controllo del processo da avere soltanto 3, 4 parti difettose per milione, il che porta a limiti molto restrittivi sulla variabilità del processo produttivo. È possibile migliorare intervenendo sia sul processo (DMAIC) che sulla progettazione (DMADV). In Figure 2.4 e 2.5 si possono vedere rispettivamente i flussi analitici delle 2 metodologie e gli obiettivi con gli strumenti in uso del DMAIC.

## DMAIC

### PROCESSO DI MIGLIORAMENTO SEI SIGMA



## DMADV

### PROCESSO DI PROGETTAZIONE SEI SIGMA



Figura 2.4 – Flussi 6-sigma: DMAIC e DMADV.

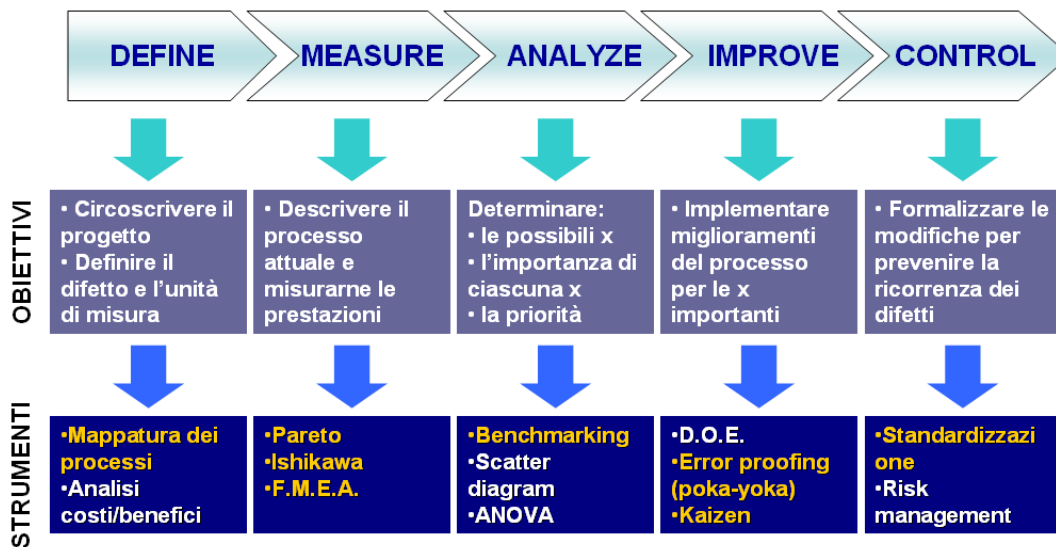


Figura 2.5 – Struttura, obiettivi e strumenti del DMAIC.

Trattandosi di una metodologia basata sull'analisi statistica dei dati, ritengo valga la pena sottolineare l'importanza dell'acquisizione di questi e della loro gestione. Può accadere di trovarsi di fronte ad aziende prive di una struttura di raccolta dati o paradossalmente ad altre con una mole di dati impressionante ma dei quali non si sa cosa farne. In realtà anche la raccolta dati va progettata e razionalizzata preventivamente in quanto anch'essa rappresenta un costo, in alcuni casi rilevante.

In generale è da preferire acquisire i dati in "tempo mascherato", ovvero senza l'intervento diretto di un operatore ma in contemporanea con un'altra attività. È questo il caso, ad esempio, dei collaudi tramite dispositivi automatici dei prodotti; in questi casi il software di governo della macchina è in grado di registrare i dati che si ritengono opportuni "nel mentre del collaudo". Quando questo non è possibile, per motivi tecnologici od economici, ma si ritiene comunque necessario creare un database di informazioni, si deve ricorrere alla registrazione manuale; bisogna fare in modo di strutturare delle schede, tabelle od altro in modo da ridurre al minimo l'impegno della risorsa nella compilazione, guidandola nella rilevazione del dato: in altre parole bisogna eliminare "la fantasia letteraria dello scrivente". In Figura 2.6

un esempio di scheda di rilievo difettosità in fase di collaudo e riparazione.

SCHEDA COLLAUDO PRODOTTO NON CONFORME							
<b>COLLAUDO</b>	Operatore:		Data:		M	N	P
Codice materiale			N. ordine		N. prodotto		
<b>Difettosità</b>	Non raggiunge la portata			Banco di collaudo			
	Prodotto bloccato			Note del collaudatore:			
	Problema al N. di giri						
	Errore di montaggio						
	Perdita/trasudamento olio						
	Problemi alla VALVOLA di MASSIMA						
	Problemi all'alimentazione						
	Difficoltà nel tarare lo "zero pompa"						
	Problemi alla VALVOLA di SCAMBIO						
	Problemi alla VALVOLA AUTOMOTIVE						
Problemi alla VALVOLA di TAGLIO PRESSIONE							
Nessuno dei precedenti (specificare nel campo note)							
<b>RIPARAZIONE</b>	Operatore:		Data:		M	N	P
Cod. particolare difettoso			Mat. part. dif.				
Difetto rilevato:							
Note del riparatore:							
<b>COLLAUDO</b>	Operatore:		Data:		Esito	ok	non ok
Banco di collaudo			Note:				

Figura 2.6 – Esempio di raccolta dati manuale: scheda collaudo non conforme.

Esistono altri 2 strumenti tipici dell'applicazione Lean: la TPM, precedentemente accennata, e la 5S. Durante la mia esperienza lavorativa ho avuto modo di confrontarmi ed apprezzare spesso la bontà ed i benefici di queste; per tale motivo dedicherò gli ultimi 2 paragrafi, conclusivi di questo capitolo, a queste 2 metodologie.

### 2.3.4 La Total Production Maintenance – TPM.

*“La TPM è la manutenzione produttiva realizzata da tutti gli addetti attraverso piccoli gruppi di attività che ha lo scopo di azzerare guasti e difetti”.*

Iniziamo tale paragrafo con una citazione di quello che è considerato il "padre" del TPM, il giapponese *Seiichi Nakajima*. Dapprima direttore tecnico in Toyota e quindi, fino alla fine degli anni ottanta, consulente presso JMA e JIPM. Nakajima s'interessò sin dagli anni cinquanta alle metodologie legate alla manutenzione preventiva attuate negli Stati Uniti. Quando alcuni americani si recarono in Giappone per insegnare alcune basi di riferimento

nella gestione operativa degli impianti, egli funse in prima persona da interprete per i colleghi e continuò a lavorare su quanto appreso arricchendolo di osservazioni e collegamenti.

Dopo questo breve profilo del fondatore della TPM, vediamo nel dettaglio quali sono le attività e gli obiettivi di tale metodologia.

La *Total Production Maintenance* è un sistema produttivo che mira al raggiungimento della massima efficienza aziendale. Inizialmente nasce per garantirla nei singoli impianti, focalizzando l'attenzione sulle attività degli operatori, dei manutentori e dei tecnici di processo. In seguito l'attenzione si sposta sulla strutturazione delle attività che riguardano la qualità, lo sviluppo del personale, l'industrializzazione ma anche le problematiche legate alla sicurezza e l'ambiente del posto di lavoro.

In realtà la TPM non è solo, come erroneamente si potrebbe pensare, una metodologia per migliorare, come detto, l'efficienza degli impianti industriali; l'ottenimento di un'alta efficienza deve essere perseguita da parte di ogni ente aziendale. Per fare questo è necessario seguire dei "percorsi" metodologici, detti pilastri, che guidano in maniera strutturata e sistematica le diverse attività.

Lo studio dei flussi produttivi e la sua analisi, ha portato a classificare "sei cause fondamentali della perdita di produzione", divise per tipologia di inefficienza:

➤ **Perdite di tempo:**

1. Guasto per rottura.
2. Attività di riattrezzaggio.

➤ **Perdite di velocità:**

3. Microfermate.
4. Riduzioni della velocità produttiva rispetto a quella programmata.

➤ **Difetti:**

5. Difetti dovuti alle fasi di avviamento dell'impianto.

6. Scarti di lavorazione per mancanza della necessaria qualità in uscita dal processo.

Ognuna di queste cause deve essere identificata e corretta tramite un approccio sistematico; come accennato prima la TPM individua 5 pilastri fondamentali:

1. Eliminazione delle cause fondamentali della perdita di produzione.
2. Creazione di un programma di manutenzione autonoma da parte degli operatori.
3. Preparazione di piani di manutenzione programmata ed ispettiva per i manutentori.
4. Aumento della competenza specifica degli addetti alla manutenzione.
5. Strutturazione di un programma di gestione degli impianti.

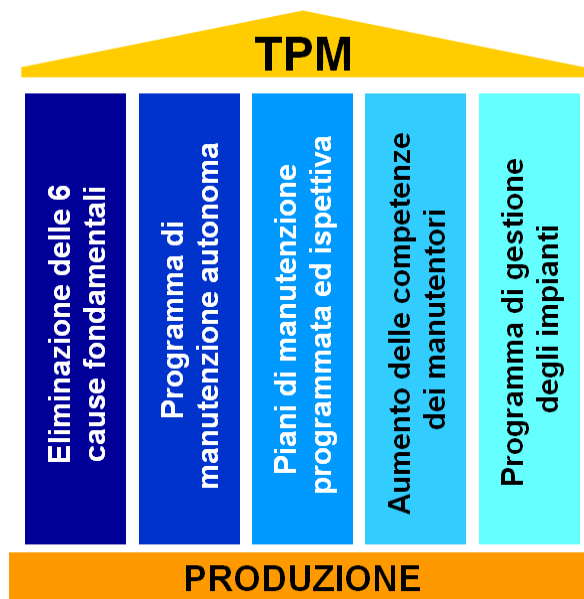


Figura 2.7 – Rappresentazione grafica dei “5 pilastri” della TPM.

A completamento di tale paragrafo si propone un esempio pratico di creazione di un piano programmato di manutenzione autonoma effettuata dagli operatori in linea di assemblaggio.

Individuata la criticità di una macchina di collaudo, né sono state verificate le caratteristiche principali, assieme al costruttore abbiamo

elencato i particolari critici ed i componenti da monitorare. Quindi, una volta addestrati gli operatori, è stata creata una check list dove sono indicati (Figura 2.8):

- Una breve descrizione della macchina e la sua destinazione d'uso.
- Le verifiche dei componenti e delle caratteristiche da effettuare corredate da foto in modo da agevolarne l'ispezione.
- Le attività da effettuare (tipologia di controllo/ispezione).
- In caso di anomalia gli enti formati a cui rivolgersi per la sua risoluzione.
- La cadenza del controllo (in questo caso una volta al mese).
- Una parte dedicata alla "siglatura" del controllo (data, firma, ok/non ok).

SCHEDA TPM ATTREZZATURE - Prova aria - Macchina		L710	Mnt. & Coll.					
			Data 24/11/2008					
			Firma Garofalo					
			Verifica ogni mese					
<b>Prova aria - Macchina</b> Descrizione attrezzatura Macchina per la misurazione delle perdite di aria dovute a problemi di tenuta dei prodotti sottoposti a tale collaudo.								
		1M						
<b>Verifica</b>	<b>Attività</b>	<b>Esecutore</b>						
Verificare con cadenza stabilita:								
1. Controllare che i parametri di collaudo impostati nella macchina (foto), suddivisi nelle tabelle dedicate, siano uguali a quelle indicate in istruzione allegata in ultimo foglio a tale scheda.	Ri - programmazione	Produzione - TMA						
2. Verificare il buono stato dei raccordi tra tubi aria e macchina ed il grado di intasamento dei filtri presenti (foto).	Eventuale sostituzione.	Produzione - Manutenzione						
3. Verificare il buono stato di tutti i collegamenti, sia elettrici che di aria compressa, presenti in macchina (foto).	Eventuale sostituzione.	Produzione - Manutenzione - TMA						
4. Controllare lo stato generale dell'attrezzatura, comprensiva di panel-pc e pistola bar-code per l'inserimento dei dati ed il richiamo delle tabelle in automatico, verificando eventuali anomalie date da urti accidentali, problemi strutturali od altro, assicurandosi, inoltre, che questa non arrechi danni agli operatori.		Produzione - Manutenzione - TMA						
<b>CONTROLLI</b>								
FIRMA	ANNO	MESE	DATA DI CONFERMA			STATO		NOTE
			GG	MM	AA	ok	NON OK	
	2009	Gennaio						
	2009	Febbraio						

Figura 2.8 – Esempio di check list per manutenzione autonoma.

### 2.3.5 Il metodo 5S.

Il termine *Metodo 5S* si riferisce alle iniziali della pronuncia occidentalizzata delle cinque parole giapponesi che sintetizzano i cinque *passi* fondamentali caratterizzanti della metodologia:

1. **Seiri** - *separare*: separa ciò che ti serve da ciò che non è funzionale all'attività e quindi crea disturbo e disordine, quindi spreco di tempo o di risorse.
2. **Seiton** - *riordinare*: metti a posto tutto quello che è utile, ovvero il vecchio motto "ogni cosa al suo posto e un posto per ogni cosa".
3. **Seiso** - *pulire*: tieni tale ordine costante e pulisci, un ambiente pulito ed ordinato è un ambiente che "non nasconde" le inefficienze.
4. **Seiketsu** - *sistematizzare* o *standardizzare*: definisci delle metodologie ripetitive e canonizzate da utilizzare per continuare queste attività di razionalizzazione delle risorse e degli spazi lavorativi.
5. **Shitsuke** - *diffondere* o *sostenere*: fai che questo modo di pensare ed agire sia conservato nel tempo e si diffonda in tutte le attività aziendali.

In altre parole la 5S è una metodologia che aiuta l'azienda a raggiungere livelli di eccellenza attraverso il miglioramento del posto di lavoro, nel senso di ordine, pulizia e organizzazione. Anche questo strumento va inteso nell'ottica globale del miglioramento continuo, uno dei cardini della Lean Production. In Figura 2.9 una tabella riassuntiva di tale filosofia dove vengono elencati anche gli interventi da effettuare per ognuna delle "S".

<b>FILOSOFIA</b>			<b>INTERVENTI</b>
<b>1 S</b>	<i>Seiri</i>	<b>Selezionare ed eliminare</b>	Separazione di quello che è necessario da quello che è superfluo. Si opera eseguendo una pulizia generale dell'area di lavoro, classificazione razionale degli oggetti (utensili, attrezzi, materiali) necessari.
<b>2 S</b>	<i>Seiton</i>	<b>Mettere in ordine utensili, strumenti e materiali</b>	Definizione della sistemazione degli utensili e delle attrezzature, con eventuale costruzione di particolari necessari alla loro sistemazione e codifica di questi. Obiettivo: ridurre al minimo il numero di oggetti da tenere senza provocare arresti o rallentamenti alla produzione.
<b>3 S</b>	<i>Seiso</i>	<b>Pulire</b>	Distinzione in 3 punti: 1. Pulizia generale e ricerca delle fonti di sporcizia. 2. Pulizia del posto di lavoro e di tutte le attrezzature. 3. Prevenzione mediante pulizia e controllo di macchine, attrezzature ed utensili.
<b>4 S</b>	<i>Seiketsu</i>	<b>Definizione dello standard</b>	Definizione e formalizzazione delle procedure standard delle attività, come: attività di pulizia, sostituzione filtri (regolamentati tramite kanban), istruzioni operative.
<b>5 S</b>	<i>Shitsuke</i>	<b>Disciplina, mantenimento e miglioramento dello standard</b>	Organizzazione dell'attività da intraprendere per il mantenimento duraturo dello standard raggiunto (audit periodici).

Figura 2.9 – Schema riassuntivo della metodologia 5S vista per step di applicazione.

Risulta evidente come i primi 3 step (selezionare, ordinare e pulire) siano “facilmente” attuabili, maggiormente complesso è il discorso del mantenimento. Per questo motivo bisogna coinvolgere le persone rendendo ben chiari i vantaggi di tale “stile di lavoro”.

I benefici evidenti possono essere riassunti in 3 punti chiave:

1. Migliorare le performance del processo.
2. Aumentare la sicurezza.
3. Migliorare l'ergonomia del posto di lavoro.

I campi di applicazioni riguardano praticamente tutti i reparti aziendali compresi quelli “non di produzione”; basti pensare agli uffici, spesso trascurati in termini di ordine e pulizia, sommersi da documenti e cartelle varie. Lavorare in un ambiente ben ordinato e pulito, oltre che migliorare la condizione di vita del lavoratore (passiamo sul luogo di lavoro metà della nostra giornata), aiuta a migliorarne l'efficienza e permette di evidenziare più velocemente eventuali anomalie.

Il miglioramento, sia puntuale, ovvero su una ben definita area (banco di lavoro, magazzino, ...), sia globale, può essere attuato solo con la partecipazione di tutti.

È essenziale che siano gli operatori stessi a partecipare alla 5S, poiché proprio chi giornalmente “vive” il posto di lavoro può dare le giuste indicazioni sul posizionamento di attrezzature, sistemazione di scaffali, utensili od altro; inoltre sono proprio i lavoratori tenuti a mantenere nel tempo l’ordine e l’organizzazione raggiunta.

Concludiamo tale paragrafo elencando alcuni punti di ottimizzazione ottenibili con questa metodologia:

- Un processo sotto controllo è il punto di partenza per mirare al miglioramento continuo.
- La pulizia permette di controllare meglio il processo e quindi garantire una maggiore qualità del prodotto.
- Quando tutto è in ordine, un oggetto in disordine risulta immediatamente visibile ed evidenzia un’anomalia, un problema che va risolto.
- La buona organizzazione permette di evitare sprechi in termini di ricerca di attrezzature, componenti, prodotti, quindi né migliora drasticamente l’efficienza.
- Un ambiente di lavoro sporco e disordinato può provocare incidenti e/o infortuni.
- Rendere ben visibili gli oggetti porta ad una loro veloce identificazione (posizioni di stoccaggio, utensili, ma anche prodotti o particolari difettosi).
- Ordinare una postazione di lavoro significa renderla efficiente garantendo di tutto il necessario il giusto quantitativo, la sovrabbondanza ha un costo e non permette di vedere facilmente se, invece, manca qualcosa.
- L’organizzazione delle aree porta ad una loro razionalizzazione e quindi, molto spesso, a creare spazio disponibile per altre attività.



Figura 2.10 – Esempio di intervento 5S.

In Figura 2.10 un esempio di postazione di lavoro prima e dopo un intervento 5S che abbiamo effettuato in reparto collaudo; in evidenza la sistemazione e l'identificazione dei componenti ed attrezzature necessarie e l'eliminazione di quelle non necessarie.

Quello che ho ritenuto evidenziare in tale capitolo è la necessità, ormai imprescindibile, di pensare all'organizzazione industriale in ottica Lean, citandone i principi, le metodologie, gli strumenti per la sua applicazione. Tale filosofia è stato un punto di riferimento di tale lavoro ed in generale lo è della mia attività lavorativa grazie alla quale si possono ottenere benefici immediati e sostanziosi.

*La Lean Production è un modo di intendere il lavoro nella sua totalità,  
partendo dal dettaglio per migliorarlo globalmente.*

Nel prossimo capitolo affronteremo le metodologie per lo studio e la rilevazione dei tempi di produzione. La cronotecnica, l'analisi con MTM, quindi i macro e micro movimenti e l'identificazione del valore aggiunto nei vari step del processo produttivo. Metodologie, queste, che hanno rappresentato una buona parte della raccolta dati necessaria per lo sviluppo di questo lavoro.

## Bibliografia

- E.J. HAY, 1987. *“Just in Time”*. Gruppo editoriale Jackson, Milano.
- A. PARESCHI, 2007. *“Impianti industriali”*. Progetto Leonardo, Bologna.
- A. PARESCHI, E. FERRARI, A. PERSONA, A. REGATTIERI, 2002. *“Logistica integrata e flessibile”*. Progetto Leonardo, Bologna.
- D. J. WOMACK, 1996. *“Lean thinking - come creare valore e bandire gli sprechi.”*.
- H. B. MAYNARD, 1944. *“Guide to methods improvement”*. McGraw-Hill Book Company.
- J. S. MIKE ROTHER, 2003. *“Learning to see, value stream mapping to add value and eliminate muda”*.
- J. P. WOMACK, D. T. JONES, D. ROOS, 1991. *“The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production”*. HarperBusiness.
- J. P. WOMACK, D.T. JONES, 1996. *“Lean Thinking”*. Guerrini e Associati.
- FADINI – “Dispense dal corso: il Six Sigma, fra rilevazione tecnica, elaborazione statistica e nuova cultura d'impresa: un metodo innovativo per le imprese del Reggiano” – CIS, Reggio Emilia.

### 3 LA MISURAZIONE DEI TEMPI.

Il tempo di produzione è alla base per la strutturazione e la programmazione del sistema industriale. La gestione dei tempi e la sua analisi permette di dimensionare il flusso produttivo in termini programmazione della produzione, flussi di materiali, scorte di magazzino, anticipi ed anche tecnologie, attrezzature, logiche interfunzionali e soprattutto costi. Il tempo di ogni singola operazione necessita quindi una sua attenta misurazione;

Si definisce il tempo di operazione come *il tempo impiegato computato tra l'istante in cui il pezzo da lavorare viene prelevato e quello in cui, terminata l'operazione e deposto il pezzo, l'operatore si accinge a prelevarne un altro*, ed è composto da tre parti:

- Tempo impiegato per l'azione manuale di prelevamento e posizionamento del pezzo;
- Tempo impiegato per l'esecuzione delle lavorazioni previste nell'operazione;
- Tempo impiegato per togliere dal suo posizionamento il pezzo lavorato e depositarlo.

L'analisi e l'organizzazione del lavoro è ad appannaggio dell'*Industrial Engineering*, ovvero quel campo dell'ingegneria atta ad ottimizzare i processi industriali utilizzando le tecniche che permettono di strutturare, standardizzare e organizzare il lavoro (nelle aziende più o meno modernamente organizzate la sua nomenclatura può variare in: *Ufficio Tempi e Metodi*, *Ufficio Tecnico di Produzione*, *Process Engineering*, *Manufacturing Engineering*, che differiscono in parte tra loro a seconda delle competenze e delle skill richieste).

Uno dei grandi problemi in questo campo è la capacità ed affidabilità della specificazione e misurazione dei metodi. Un contributo significativo fu dato dal *Dr. Harold B. Maynard* negli anni trenta quando una parte dell'ingegneria

industriale si specializzò nello studio dei metodi, l'Ingegneria dei Metodi (Methods Engineering):

*“Ingegneria dei Metodi è la tecnica che sottopone ogni operazione di un dato lavoro a un’attenta analisi al fine di eliminare i movimenti non necessari e di identificare il metodo migliore e più veloce per realizzare quelli necessari.”*

(Maynard, 1944).

Definiamo, quindi, i due concetti fondamentali alla base di questi studi: il metodo ed il tempo:

- Il *metodo* è un modo di procedere razionale per raggiungere determinati risultati. Lo studio del metodo consiste nell’analizzare le differenti metodologie utilizzate e utilizzabili per svolgere un’attività al fine di individuare la migliore.
- Il *tempo* è la dimensione nella quale si concepisce e si misura il trascorrere degli eventi.

Per lo studio e l’analisi dei tempi si ricorre alle seguenti 3 metodologie: rilievo cronometrico (cronotecnica), preventivi di stima, determinazione con sistemi a tempi predeterminati. A queste metodologie verrà dedicato il prossimo paragrafo.

### **3.1 La costruzione dei tempi.**

In questo paragrafo verificheremo le tecniche di misurazione dei tempi, le maggiorazioni da considerare ed i fattori che li influenzano, al fine di “costruire” correttamente un tempo di produzione.

#### **3.1.1 Il rilievo cronometrico.**

Il *rilievo cronometrico* è realizzato osservando l’operazione da tempificare direttamente nella postazione di lavoro.

Il metodo consiste, quindi, nel rilevare più volte il tempo necessario per l'esecuzione di un'attività. Il rilievo è fatto dall'*analista tempi e metodi* che si avvale di strumenti quali: il foglio di rilievo tempi, il cronometro oppure una videocamera, dove oltre alla visualizzazione delle operazioni indirettamente cronometra il tempo delle stesse.

Misurando più volte il tempo necessario per lo svolgimento della stessa attività si nota che il suo valore cambia da operatore a operatore e addirittura cambia con lo stesso operatore, quando ripete più volte la stessa attività.

Da queste considerazioni nasce il concetto di *efficienza*, ovvero: *l'abilità, la prontezza, la sicurezza con cui l'operatore esegue i movimenti o più in generale svolge le attività che gli vengono assegnate.*

Tenendo, quindi, conto dell'efficienza possiamo dire che il tempo necessario a compiere una determinata attività "*t*" è tanto più piccolo quanto maggiore è l'efficienza "*E*" con cui viene svolta. La seguente formula né traduce analiticamente il concetto:

$$t * E = costante .$$

Valutare l'efficienza è un compito dell'analista dei tempi che deve conoscere, per l'attività in considerazione, tutti i movimenti necessari per eseguirla senza incertezze e senza la minima perdita di tempo, ovvero per eseguirla con un'efficienza massima "*E<sub>MAX</sub>*".

Avendo in mente l'efficienza massima si può esprimere l'efficienza con cui l'operatore svolge un'attività. Durante l'attività lavorativa normale e continuativa, l'operatore deve svolgere le sue attività con un'efficienza normale "*E<sub>N</sub>*".

Dalla formula prima enunciata,  $t * E = costante$ , possiamo scrivere indicando con "*t<sub>N</sub>*" il tempo per svolgere un'attività con efficienza *E<sub>N</sub>*:

$$t_N * E_N = t_{MIN} * E_{MAX} .$$

Infatti, quando l'efficienza è massima il tempo per eseguirla è minimo.

Grazie a studi specifici effettuati in medicina del lavoro si è convenuto di assumere come efficienza normale i tre quarti dell'efficienza massima:

$$E_N = \frac{3}{4} E_{MAX} .$$

Per scegliere i valori da assegnare ad  $E_N$  ed  $E_{MAX}$  si sceglie una scala arbitraria, solitamente (e durante la mia personale attività lavorativa) si assegnano tali valori:

$$E_N = 100$$

$$E_{MAX} = 133$$

In tal modo si rispetta il rapporto prima scritto, infatti:

$$\frac{E_N}{E_{MAX}} = \frac{100}{133} = \frac{3}{4}$$

Da questo rapporto deriva l'espressione "*rilevare i tempi a 133*" spesso utilizzata negli ambienti produttivi.

Quindi, dalla relazione  $t_N * E_N = t_{MIN} * E_{MAX}$  si può calcolare il *tempo normale*:

$$t_N = \frac{E_{MAX}}{E_N} \cdot t_{MIN} = \frac{4}{3} \cdot t_{MIN}$$

Da questo si deduce che per potere determinare il tempo normale occorre conoscere l'efficienza con cui è svolta un'attività. In questo modo l'analista dei tempi, per ogni tempo rilevato " $t_R$ ", assegna anche l'efficienza " $E_R$ " con cui è stata svolta l'attività.

Una volta noto il tempo  $t_R$  e definita l'efficienza  $E_R$ , valendo sempre la costante  $t * E$ , si può scrivere:

$$t_R * E_R = t_N * E_N ,$$

da cui, infine è possibile ricavare l'espressione per il calcolo del *tempo normale* per svolgere quell'attività, ovvero:

$$\text{per } E_N = 100 \quad t_N = \frac{E_R}{E_N} \cdot t_R = \frac{E_R}{100} \cdot t_R .$$

### **3.1.2 I preventivi di stima.**

I preventivi di stima sono un sistema approssimativo di valutazione dei tempi di lavoro che viene utilizzato solitamente quando non si ha la possibilità di valutare l'operazione direttamente ma se ne conoscono solo gli elementi fondamentali, oppure si hanno i dati di processi analoghi. In altri termini, si riportano dei tempi precedentemente calcolati da tabelle inerenti ad una serie di azioni (macromovimenti).

### **3.1.3 Determinazione con sistemi a tempi predeterminati.**

Secondo la teoria che ha portato alla formulazione dei tempi predeterminati, tutte le operazioni elementari sono scomponibili in micromovimenti, ai quali vengono assegnati dei tempi standard con i quali si può ricostituire il tempo per qualsiasi operazione anche relativamente complessa.

Il sistema a tempi predeterminati più conosciuto è il sistema *MTM* che assegna a ciascun movimento elementare un tempo standard predeterminato, stabilito in base alla natura del movimento ed alle condizioni in cui esso viene eseguito.






Vista la complessità ed il crescente utilizzo di questo metodo, in questo capitolo, verrà dedicato un paragrafo per meglio definirne le peculiarità.

### **3.1.4 La maggiorazione dei tempi.**

Ai tempi misurati per svolgere determinate attività, le cui tecniche sono appena state descritte, è necessario aggiungere delle maggiorazioni, in particolare:

- La *Maggiorazione per affaticamento*, che tiene conto del tipo e della condizione della mansione lavorativa (*Fattore di Riposo* o FR);
- La *Maggiorazione fisiologica*, che tiene conto delle necessità fisiologiche (*Fattore Fisiologico* o FF).

Nella Figura 3.1 viene riportata la tabella solitamente in uso per la determinazione di queste maggiorazioni.

TABELLA DELLE MAGGIORAZIONI PER FATTORI DI RIPOSO					
POSIZIONE BASE	ATTEGGIAMENTO DEL TRONCO E DEGLI ARTI	Resistenza opposta del mezzo meccanico o dal peso (Kg)			
		0-L?2	2-M?10	10-P?20	20-PP
FATTORI DI RIPOSO IN %					
1  SEDUTO	a) Tronco ed arti in atteggiamento normale, con tronco quasi fermo.	1	2 - 3	--	--
	b) Tronco od arti in atteggiamento disagiata con tronco quasi fermo.	3	4 - 6	--	--
2  IN PIEDI	a) Tronco ed arti in atteggiamento normale, con tronco quasi fermo.	3	4 - 5	6 - 8	9 - 13
	b) Tronco ed arti in atteggiamento normale con tronco quasi fermo.	5	6 - 8	9 - 11	12 - 16
	c) Tronco od arti in atteggiamento disagiata, con tronco quasi fermo.	7	8 - 10	11 - 14	15 - 19
	d) Tronco od arti in atteggiamento disagiata con tronco in movimento.	9	10 - 12	13 - 16	17 - 21
3  IN GINOCCHIO	a) Tronco ed arti in atteggiamento normale, con tronco quasi fermo.	4	5 - 6	7 - 9	--
	b) Tronco od arti in atteggiamento disagiata con tronco quasi fermo.	8	9 - 11	12 - 15	--
4  CORICATO	a) Tronco ed arti in atteggiamento normale, con tronco quasi fermo.	6	7 - 9	--	--
	b) Tronco od arti in atteggiamento disagiata con tronco quasi fermo.	10	11 - 14	--	--
5  IN MARCIA	a) In piano con o senza carico.	6	7 - 10	11 - 15	16 - 20
	b) In salita e in discesa con o senza carico.	9	10 - 13	14 - 18	19 - 23
	c) Tirando o spingendo carrelli in piano.	7	8 - 11	12 - 16	17 - 21

NB: I fattori di riposo (FR) sopraindicati non sono comprensivi della maggiorazione per fatiche fisiologico (FF).  
Il fattore fisiologico (FF) è definito complessivamente per tutti gli addetti pari al 4,5 %

Figura 3.1 – Tabella delle maggiorazioni.

I fattori di cui tiene conto sono fondamentalmente di tre tipi:

1. Posizioni di base (codici da “1” a “5”).
2. Atteggiamento del tronco e degli arti (codici da “a” a “d”).
3. Resistenza opposta dal mezzo meccanico e dal peso (codici “L”, “M”, “P” e “PP”).

Oltre queste maggiorazioni bisogna tener conto anche del tempo speso per il mantenimento dell’ordine e della pulizia del posto di lavoro (di solito circa 5 minuti), concetto alla base della metodologia TPM di cui si è scritto nel capitolo precedente. In alcuni casi, nelle realtà produttive, si preferisce assegnare un tempo fisso, solitamente a fine turno per svolgere tali attività.

Nella mia personale esperienza ho valutato come un valore medio corretto circa 15 minuti, questo permette di effettuare regolarmente i controlli e le verifiche necessarie (vanno escluse particolari situazioni in cui i macchinari sono talmente complessi da necessitare di un lasso di tempo maggiore).

Infine è necessario considerare la mancata saturazione legata a quella determinata operazione di lavoro nella postazione assegnata. In molti casi questa è legata all’impossibilità di saturare, ovvero coprire il tempo disponibile, con le attività da eseguire.

Ad esempio: si possono incontrare vincoli tecnologici per i quali una determinata attrezzatura (magari anche costosa) è posizionata in una stabilita stazione della linea per cui il contenuto di lavoro legato ad essa non può essere spostato o frazionato in altre; se la sequenza delle attività prevede altri “blocchi” di operazioni non tecnicamente divisibili che impiegano dei tempi superiori alla differenza tra il takt time e l’operazione base, inevitabilmente si crea una condizione di mancata saturazione della postazione.

In Figura 3.2 lo schema riassuntivo per la costruzione dei tempi che tiene conto dei fattori fin qui espressi.

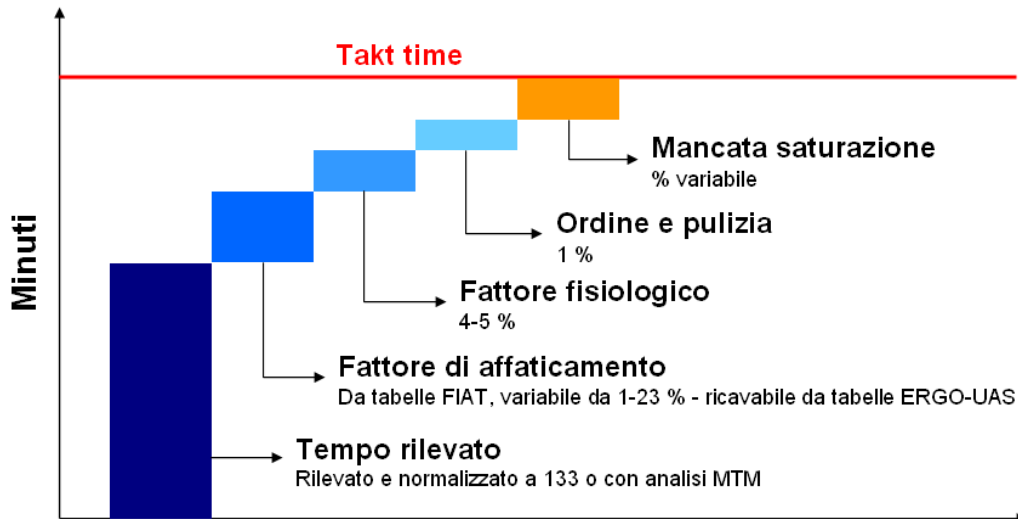


Figura 3.2 – La costruzione dei tempi di produzione.

L'obiettivo dell'ingegneria industriale è, quindi, quello di migliorare la saturazione ed in accordo con la filosofia Lean, concentrarsi sul *valore aggiunto*, eliminando le attività non necessarie e riducendo quelle che lo sono ma non danno valore al prodotto.

Il concetto di valore aggiunto, già definito nel capitolo dedicato alla filosofia Lean, diventa un elemento cruciale poiché rappresenta quelle attività che effettivamente trasformano il prodotto e per le quali il cliente è "disposto a pagare".

Si tornerà su questo concetto nel prossimo paragrafo, che verrà dedicato alla misurazione dei tempi mediante MTM.

### **3.2 MTM – Method Time Measurement.**

MTM è l'acronimo di Methods-Time Measurement: "Misurazione del tempo in funzione del Metodo". L'idea di base del sistema MTM è che il tempo richiesto per svolgere un compito specifico dipende dal metodo scelto per eseguire l'attività.

In altre parole, permette di determinare la durata delle attività eseguite dall'operatore senza fare alcun rilievo dei tempi.

Come visto nel paragrafo precedente, l'MTM rientra nella categoria dei cosiddetti sistemi a tempi predeterminati (PTS, *Predetermined Time System*). Lo svolgimento di una qualsiasi attività è riconducibile ad una sequenza di movimenti elementari (*micromovimenti*) che sono sempre gli stessi, ma diversamente combinati danno luogo a infinite soluzioni.

L'obiettivo consiste nel definire i tempi ed il ritmo standard di una prestazione lavorativa. Il sistema MTM vanta la più ampia distribuzione mondiale come strumento di sviluppo ingegneristico industriale e di gestione razionale del tempo, configurandosi quindi come uno standard uniforme utilizzabile dalle aziende per descrivere e quantificare i processi di lavoro manuale.

Vediamo quindi quali sono i vantaggi di questo metodo:

- I tempi rilevati dalle tabelle, per lo svolgimento delle varie azioni, non dipendono dall'operatore, ma scaturiscono da calcoli statistici su dati rilevati per diversi operatori. Rappresentano, quindi, i tempi più probabili per le esecuzioni delle varie azioni.
- Il fatto di dovere scomporre l'attività in movimenti elementari permette di individuare quelli poco convenienti o improduttivi. Come conseguenza è possibile migliorare le attrezzature e il posto di lavoro in modo da rendere più semplice e rapidi i movimenti: aiuta pertanto a trovare il metodo di lavorazione più conveniente.

In sostanza l'approccio scientifico del MTM conduce quasi automaticamente all'eliminazione dello spreco e al miglioramento per quanto riguarda: postazioni di lavoro, layout, macchinari e attrezzature ed ergonomia.

Nella letteratura, i maggiori svantaggi che vengono citati a proposito del sistema MTM sono (Chary, 2009) :

- La complessità di applicazione del metodo comporta utilizzo di personale qualificato e costi elevati, sia in termini puramente economici che di tempo impiegato. Inoltre l'analisi e la lettura dei

codici da parte del lavoratore non addestrato risulta sicuramente difficoltosa.

- Le maggiorazioni dovute a condizioni di lavoro particolari potrebbero non essere tenute sufficientemente in considerazione.
- Non possono essere misurati lavori caratterizzati da un grado di controllo estremamente alto.
- L'analisi dettagliata richiede, come detto, un tempo elevato e quindi non risulta conveniente investire in tal senso nel caso di processi poco ripetitivi.

### **3.2.1 Le origini.**

Il sistema MTM fu sviluppato negli USA intorno agli anni '40 come un sistema di predeterminazione dei tempi di esecuzione del lavoro. L'impulso essenziale per lo sviluppo dell'MTM venne, circa vent'anni prima, da Fred W. Taylor ed in particolare da Frank B. Gilbreth.

Gilbreth intuì che il tempo di svolgimento di un processo controllato da una persona (attività manuale) a parità di pratica (abilità), qualifica (capacità) e con lo stesso sforzo (affaticamento), dipende esclusivamente dal metodo utilizzato per completare l'attività. Gli studi successivi hanno ampliato questa visione "meccanica" che ignora molte altre influenze, come ad esempio: la motivazione dell'operatore, fattori ambientali o le caratteristiche dell'oggetto su cui lavorare. In ogni caso è sostanzialmente corretto affermare che il metodo utilizzato è un fattore determinante.

Filmando numerose sequenze di movimento, Gilbreth determinò che i movimenti umani possono essere ridotti a 17 elementi di movimento, che chiamò *therbligs*. Questi 17 movimenti furono i precursori dei Movimenti di Base del MTM:

1. Search.	7. Position.	14. Unavoidable
2. Find.	8. Assemble.	Delay.
3. Select.	9. Use.	15. Avoidable
4. Grasp.	10. Disassemble.	Delay.
5. Transport	11. Inspect.	16. Plan.
Loaded.	12. Pre-position.	17. Rest.
6. Transport	13. Release Load.	
Empty.		

Dettagliati i movimenti delle mani in *therbligs*, i tempi di attesa, gli spostamenti non necessari delle mani e le distanze di trasporto sono automaticamente poste in evidenza per consentire la rapida individuazione dei miglioramenti.

Negli anni '20, lo studio dei movimenti di Gilbreth portò a “*regole di economia di movimento*”. Queste regole sono ancora usate come aiuto nella definizione delle sequenze di movimento più efficienti possibili sia da un punto di vista dell'energia sia del tempo.

Nonostante tali studi effettuati in origine sui movimenti rappresentarono un grande passo in avanti nella gestione scientifica, non poterono essere considerati completi, perché non assegnavano tempi ai movimenti. La necessità di avere un metodo di analisi completo, incluso l'impatto di movimenti individuali sul metodo, portarono appunto allo sviluppo dei sistemi a tempi predeterminati (PTS). I PTS rappresentano quindi il sodalizio tra lo “studio del movimento di Gilbreth” e “lo studio dei tempi di Taylor” che fornisce la capacità di assegnare i tempi di esecuzione alla sequenza di movimento analizzata.

Da questo connubio risulta una reale valutazione quantitativa del sistema di lavoro che permette l'ottimizzazione completa del metodo.

### **3.2.2 I blocchi di dati.**

MTM è una famiglia di metodi adatti a differenti livelli di analisi e per differenti tipologie di cicli lavorativi. Tutti i sistemi MTM si basano sulle tabelle

originarie, la differenza tra il metodo MTM-1 e gli altri consiste nella tendenza a raggruppare i movimenti elementari in azioni più complesse.

Nel caso del MTM-UAS, ad esempio, invece delle azioni elementari (raggiungere, afferrare, muovere, ruotare, posizionare, rilasciare) viene considerato un solo “movimento” (prendere e posizionare).

Con MTM è possibile (Associazione MTM Italia, 1998):

- Progettare un metodo di lavoro prima della sua realizzazione.
- Ottenere un tempo base obiettivo che si dovrebbe impiegare, sulla base di un rendimento standard riconosciuto internazionalmente.
- Identificare i movimenti elementari, necessari per valutazioni e analisi di natura ergonomica.

Il sistema MTM-1 costituisce la base per lo sviluppo di sistemi di blocchi di dati assemblati a livelli più alti. Attraverso l’aggregazione dei blocchi di base del MTM-1 infatti sono stati sviluppati sistemi adatti a diversi tipi di processi (produzione di massa, produzione a lotti e produzione di un pezzo unico e piccola produzione a lotti variabile).

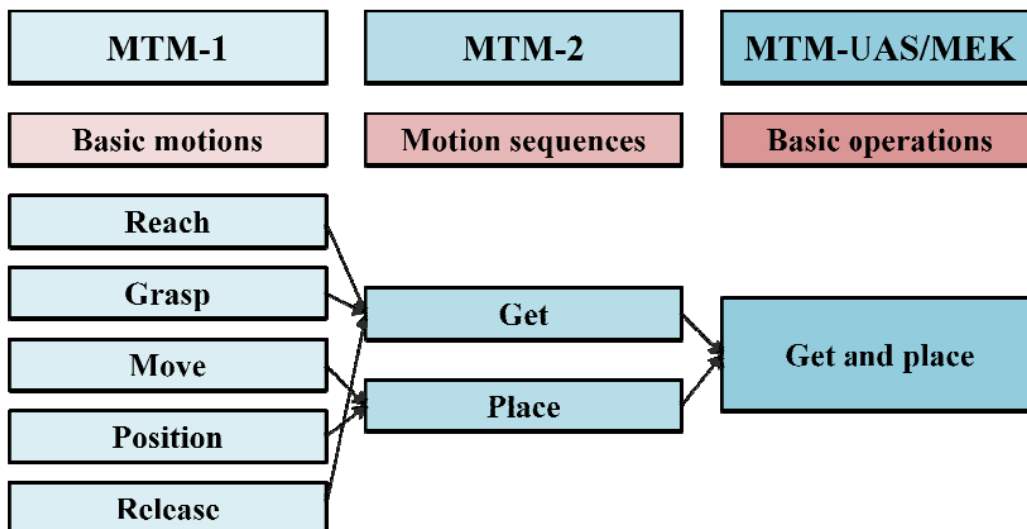


Figura 3.3 – Combinazione dei blocchi di dati nel MTM.

Il sistema MTM-1 (MTM Base) fu sviluppato per la produzione su larga scala. Successivamente, le diverse condizioni del mercato determinarono la necessità di nuovi metodi per strutturare, disegnare, pianificare e controllare i processi di lavorazione, che tenessero in considerazione maggiori esigenze di rapidità e pianificazione.

Le nuove esigenze erano essenzialmente le seguenti (Associazione MTM Italia, 1998):

- Minore quantità di pezzi prodotti (lotti).
- Brevità del ciclo di vita del prodotto (rapidità della manutenzione dei dati).
- Aumento della complessità del prodotto (modularità dei dati).
- Aumento della diversità delle varianti (supporto software e strutturazione database).

Data la positiva esperienza conseguita con l'applicazione del MTM su larga scala per la produzione di massa, l'obiettivo è stato quello di rendere MTM economicamente applicabile anche alla produzione a lotti. Per questo motivo fu sviluppato un sistema che rispondesse a queste nuove esigenze: UAS, ovvero *Universal Analysis System* (Associazione MTM Italia, 1998).

MTM-MEK è invece il metodo applicabile nei processi caratterizzati da produzione su commessa o piccola produzione a lotti.

In Figura 3.4 una panoramica generale delle diverse tecniche MTM in relazione ai contesti di analisi (da [www.mtmitalia.com](http://www.mtmitalia.com)).

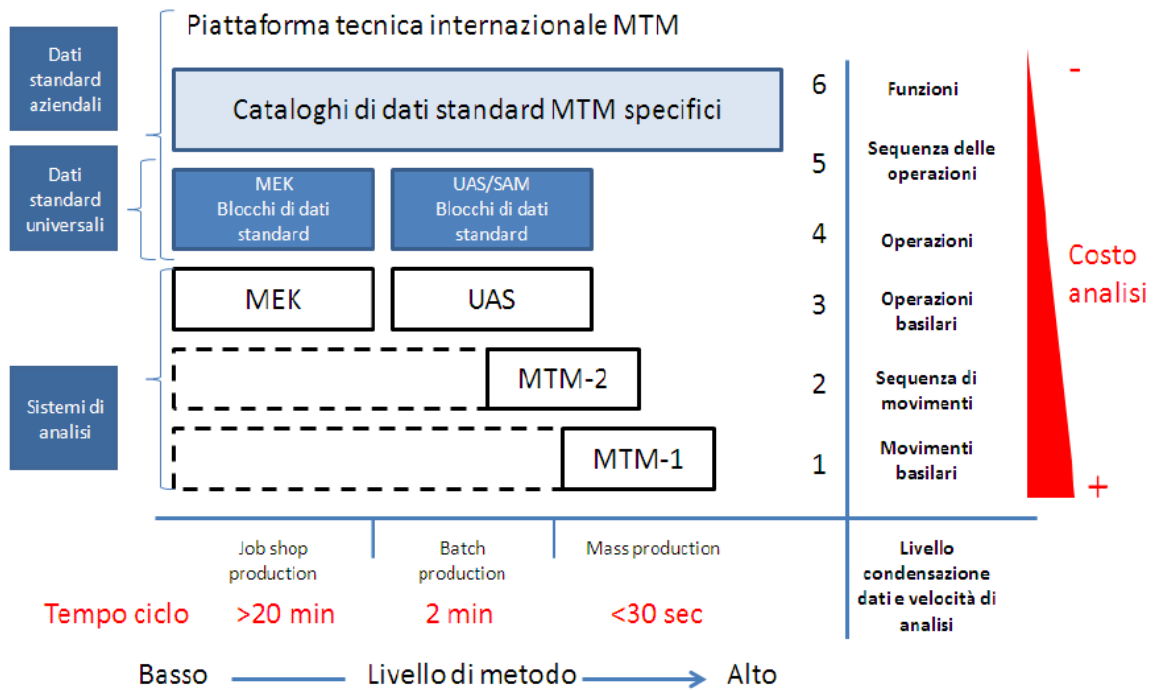


Figura 3.4 – Classificazione delle diverse tecniche MTM.

La freccia in orizzontale indica il *livello di metodo*. Questo esprime la misura della variazione nei metodi dell'operatore individuale nello svolgimento dell'attività lavorativa. Il livello di metodo è alto nel caso della produzione di massa.

In verticale lo schema riporta i successivi livelli di aggregazione dai blocchi di base utilizzati nel MTM-1 sino alla generazione di blocchi di dati adatti a contesti produttivi diversi, in cui grazie alla riduzione dei tempi di analisi il costo che ne consegue è man mano decrescente.

In particolare al I livello sono assegnati i movimenti elementari del MTM-1. Al II livello sono assegnati tutti i sistemi di dati MTM che presentano un raggruppamento di diversi movimenti elementari in combinazioni di movimenti. A questo appartengono i dati base MTM-2. Al III livello, vengono assegnati quei sistemi di dati MTM che presentano dei cicli di movimenti chiusi. A questo appartengono i sistemi d'analisi UAS e MEK. Ogni sistema MTM, quindi, è stato sviluppato e progettato per uno specifico campo di applicazione.

In Figura 3.5 un esempio di foglio di calcolo per la determinazione dei tempi in MTM-UAS.

		FOGLIO ANALISI				ANALISTA: Mario Garofalo	VA	VA	VALORE AGGIUNTO			
		MTM-UAS				STABILIMENTO: Nnt	NVA	NVAC	COMPLEMENTARI			
		Elimina Riga	Guida	Data: 25/01/2012	REPARTO: Isola 3 - Cartucce			NVAM	MOV. CORPO			
		Aggiungi Riga	?	Aggiorna Dati Pivot e Grafici	CODICE: YUCN			NVAQ	QUALITA'			
				TIPO: Assemblaggio e Collaudo	IBMI Pz: 1			NVAP	PASSIVITA'			
TEF6 Nnt						Totale	701	25	0,4	0,42		
Cod Fase	Descr. fase	Descrizione operazione	CODICE	TMU	Q	F	Somma TMU	secondi	minuti	min a pezzo	TIPO MOVIM	secondi di PT
F010	ASSEMBLAGGIO SEDE+SPILLO	PASSO PER POSIZIONE 2 (FRONTE CONIATRICE)	KA	25			25	0,90	0,01	0,01	NVAM	
F010	ASSEMBLAGGIO SEDE+SPILLO	A SEDE VERSO OPERATORE (MANO SX)	AD2	45			45	1,82	0,03	0,03	VA	
F010	ASSEMBLAGGIO SEDE+SPILLO	A SPILLO SU SEDE (MANO DX)	AE2	55			55	1,98	0,03	0,03	VA	
F020	CONIATURA	SEDE + SPILLO A CONIATURA	PB1	20			20	0,72	0,01	0,01	NVAC	
F020	CONIATURA	ATTIVAZIONE LEVA CON RALLENTAMENTO PER PRECISIONE	BB1	30			30	1,08	0,02	0,02	VA	
F030	ASSEMBLAGGIO MOLLA+TAPPO	PASSO PER POSIZIONE 1 (FRONTE MORSA PER SERRAGGIO)	KA	25			25	0,90	0,01	0,01	NVAM	
F030	ASSEMBLAGGIO MOLLA+TAPPO	A MOLLA SU SEDE+SPILLO CONIATO (IN MASCHERATO SEDE+SPILLO CONIATO A CAMPO DI VISIONE)	AE2	55			55	1,98	0,03	0,03	VA	
F030	ASSEMBLAGGIO MOLLA+TAPPO	A TAPPO SU CARTUCCIA	AF2	85			85	2,34	0,04	0,04	VA	
F030	ASSEMBLAGGIO MOLLA+TAPPO	PRIMO MOVIMENTO	ZA1	5			5	0,18	0,00	0,00	VA	
F030	ASSEMBLAGGIO MOLLA+TAPPO	N. 1 MOVIMENTO SUPPLEMENTARE PER GARANTIRE IL CORRETTO IMBOCCO	ZB1	10			10	0,36	0,01	0,01	VA	

Figura 3.5 – Esempio di “foglio analisi” in MTM-UAS.

Nel prossimo paragrafo vedremo come l'applicazione delle tecniche MTM possano agevolare la ricerca dell'ottimizzazione dei processi in ottica Lean.

### 3.2.3 MTM e Lean.

L'impiego di MTM all'interno dell'approccio Lean si è rivelato uno strumento ottimale per la riduzione degli sprechi. Le filosofie MTM e lean possono essere utilizzate per analizzare tutti i processi produttivi in un'azienda offrendo i seguenti contributi:

*La Lean* mira a creare, attraverso *l'intero flusso di valore*, la massima efficienza possibile sincronizzando il flusso:

- Grazie alla riduzione degli sprechi di tempo e risorse umane.
- Grazie all'ottimizzazione dei cicli produttivi e alla riduzione dei tempi di consegna per soddisfare le esigenze dei clienti.

*MTM* mira a evitare gli sprechi lungo l'intera catena del valore aggiunto pianificando il *metodo*:

- Grazie all'applicazione di metodi e strumenti appropriati.

- Grazie alla standardizzazione della produzione basata su un concetto di dati compatibili.
- Fornendo standard temporali, basati su una prestazione di riferimento standardizzata.

Sebbene entrambe le metodologie mirino a migliorare l'efficienza, esse differiscono però nell'approccio all'identificazione degli sprechi: la lean manufacturing è tesa ad un'*ottimizzazione globale del flusso*, MTM invece si propone di conseguire un'*ottimizzazione locale delle attività*.

Come si può vedere in Figura 3.6 (dati forniti dall'Associazione MTM Italia) l'applicazione congiunta delle due tecniche permette di "aggredire" maggiormente gli spazi di perfezionamento.

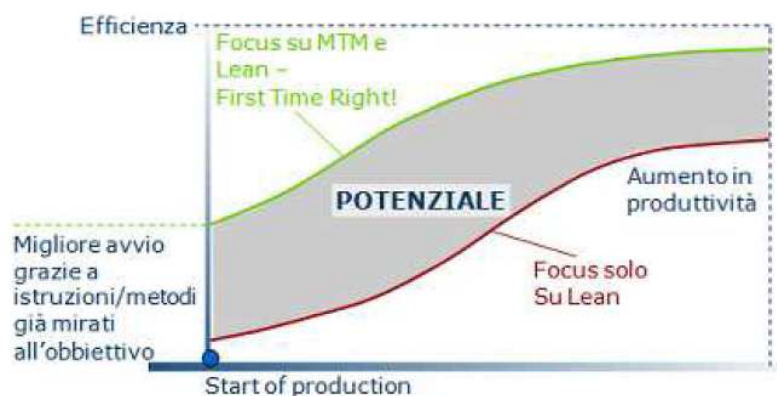


Figura 3.6 – Potenziale di miglioramento grazie all'utilizzo delle tecniche MTM e Lean.

### 3.2.4 L'analisi del valore aggiunto in MTM.

Abbiamo già descritto come sia importante in tutte le attività aziendali e quindi anche nel dettaglio delle operazioni elementari di produzione, individuare il valore aggiunto che queste danno al prodotto.

Dopo aver condotto l'analisi MTM è necessario, quindi, valutare ogni attività in termini di valore che questa aggiunge al prodotto finito.

Il *Basic work content*, cioè il contenuto di lavoro, sarà costituito dalla somma delle *attività a valore*, cioè quelle che contribuiscono direttamente alla trasformazione fisica del prodotto tramite una lavorazione meccanica o

l'aggiunta di un componente e da quelle non a valore. Di queste si possono effettuare delle opportune distinzioni.

In Figura 3.7 riportiamo uno schema che distingue e spiega le differenze tra le diverse attività con l'attribuzione di diversi colori identificativi.

ATTIVITA' A VALORE		SIGINIFICATO	ESEMPIO
<b>VA</b>	VALORE AGGIUNTO	Contribuiscono direttamente alla trasformazione fisica del prodotto tramite una lavorazione meccanica o l'aggiunta di un componente.	Avvitare un dado, assemblare un particolare.
ATTIVITA' NON A VALORE		SIGINIFICATO	ESEMPIO
<b>NVAC</b>	NON A VALORE COMPLEMENTARI	Le attività strumentali atte a realizzare la trasformazione del prodotto, ma non direttamente responsabili della sua evoluzione verso lo stato finale, possono essere definite complementari.	Movimenti per afferrare una chiave, un martello od un utensile in generale.
<b>NVAM</b>	NON A VALORE DI MOVIMENTAZIONE	Le attività che comportano movimenti del corpo, come passi, piegamenti e rotazioni del busto.	Camminare per andare a prendere una attrezzatura.
<b>NVAQ</b>	NON A VALORE QUALITATIVE	Le attività necessarie all'operatore a svolgere controlli qualitativi.	Verificare il corretto assemblaggio di un particolare, ma anche controllare lo stato dei componenti.
<b>NVAP</b>	NON A VALORE PASSIVE	Le fasi di lavoro durante le quali l'operatore è costretto a rimanere inattivo.	In attesa di una lavorazione automatica.

Figura 3.7 – Le tipologie di valore aggiunto e non utilizzate in MTM.

Risulta ormai chiaro come l'obiettivo sia quello di accrescere il "quantitativo" di VA presente nel foglio dati e di "tagliare" i NVA. Tuttavia non sempre è possibile eliminare le attività a non valore aggiunto. In particolare quelle non a valore *complementari* (NVAC) si può, anzi si deve cercare di ridurle, ma togliere l'azione del prendere l'utensile, anche se non direttamente riconosciuta dal cliente, rimane impossibile se poi si vuole utilizzarlo. In questo caso si può intervenire nell'organizzazione della postazione di lavoro avvicinando le attrezzature e/o migliorando la loro fruibilità.

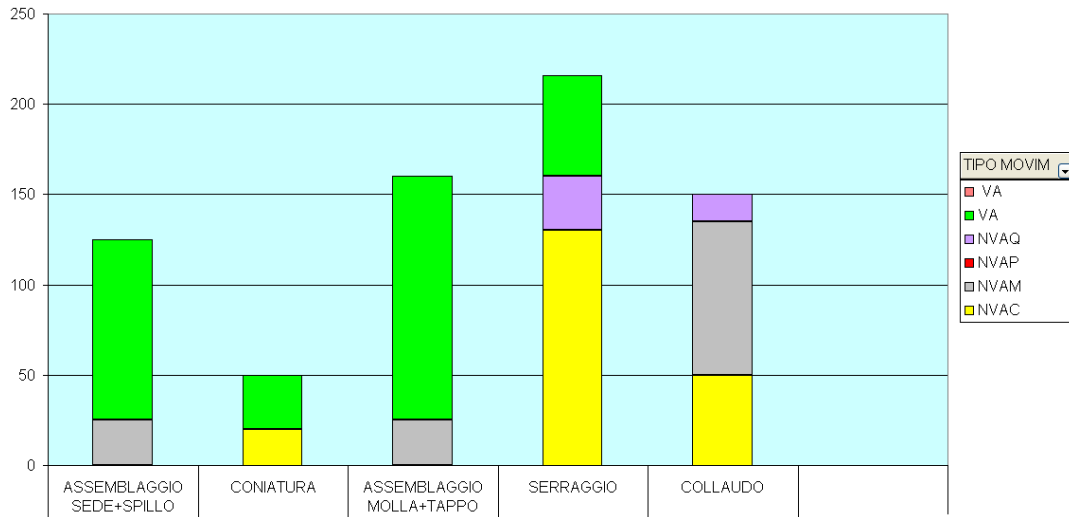


Figura 3.8 – Esempio di grafico VA ed NVA per una serie di fasi produttive.

Una volta determinati i tempi di produzione, analizzati con le tecniche prima descritte, si è creato quel database necessario per valutare come organizzare una linea di assemblaggio ottimizzando il contenuto di lavoro tra le diverse postazioni, ovvero: bilanciandola. Nel prossimo capitolo affronteremo la trattazione degli algoritmi esistenti per la risoluzione di tale problema.

## **Bibliografia**

Associazione MTM Italia, 2011. “*MTM - Logistics, Manuale corso di applicatore.*”. Malnate (Varese).

Associazione MTM Italia, 2011. “*MTM Methods Time Measurement, Manuale di applicatore MTM-1.*”. Malnate (Varese).

Associazione MTM Italia, 1998. “*UAS Universal Analyzing System, Manuale di applicatore UAS.*”. Malnate (Varese).

M.-J. W. Chien-Fu Kuo, 2009. “*Motion generation from MTM semantics. Computers in industry*”, 339-348.

D. V. Goubergen, 2007. “*Using Time Studies for Quantifying Waste and Improvement Opportunities in Work Methods.*”. Industrial Engineering Research Conference. Ghent Belgium.

Istituto C. Pesenti. “*Tempi e metodi.*”

J. Womack, 1996. “*Lean thinking - come creare valore e bandire gli sprechi.*”.

M. J. P. Kuhlant, 2008. “*Hybrid Optimization of added value with value stream mapping and methods-time measurement.*”. Journal of Machine Engineering.

## 4 GLI ALGORITMI

### 4.1 *Introduzione al problema.*

Nel campo dell'ingegneria intendiamo parlare di *processo di produzione industriale*, o *processo produttivo*, come una serie di fasi che trasformano un componente grezzo od un semilavorato in un prodotto finito, attraverso una serie di lavorazioni che possono comportare l'utilizzo di attrezzature specifiche, trattamenti termici o chimici.

In generale, per avere una classificazione di riferimento, tra i processi produttivi, ne distinguiamo tre tipologie:

- 1 Monolinea: in questo caso l'output di ogni operazione passa nella sua interezza attraverso l'operazione successiva (fonderie, cementifici, ...).
- 2 Analitici: quando da una o poche materie prime si ottengono molti prodotti diversificati in uscita come output (petrolchimici, mobilifici, ...).
- 3 Sintetici: tipici dei processi di assemblaggio, nei processi sintetici sia le materie prime che i vari componenti in input convergono verso l'output previsto.

Saranno proprio i processi sintetici, ed in particolare le linee di assemblaggio, oggetto di questo studio, con attenzione particolare su assemblaggi con forte componente manuale, dovuta spesso alla necessità di poter effettuare numerose operazioni diversificate fra loro, tipiche di un sistema di produzione molto variegato e "customizzato" verso le esigenze del cliente finale, come quello dell'*automotive*.

Nella mia attività quotidiana di *process engineer* mi trovo spesso a dover fare i conti con problematiche dovute alla difficoltà di tradurre in prodotto finito ciò che viene progettato, dovendo gestire le innumerevoli variabili che influenzano una linea di assemblaggio, dalla necessità di attrezzature specifiche all'attenzione verso la cadenza produttiva, dalle specifiche del prodotto da rispettare al bilanciamento delle varie fasi.

In conclusione, all'interno di un processo produttivo intervengono diversi fattori: il prodotto, la varietà delle famiglie, la tipologia di attrezzature, la componente manuale, ecc., sarà compito dell'ingegnere di processo organizzare un flusso produttivo omogeneo, bilanciato, prestando attenzione sia alla capacità produttiva richiesta che al sempre importante aspetto qualitativo.

In questa breve trattazione, quindi, introdurremo e definiremo il problema del bilanciamento delle linee di assemblaggio, partendo dalla definizione del problema sino alla verifica di ciò che in letteratura troviamo per la risoluzione di questo, dai sistemi per la configurazione della linea (*U-shaped, paralleling, ...*), sino ad una disamina degli algoritmi per la risoluzione dei problemi di bilanciamento.

#### **4.2 Definizione del problema.**

In generale, una linea di assemblaggio è formata da un certo numero di postazioni di lavoro la cui interconnessione è assicurata da nastri trasportatori, binari od altri sistemi di movimentazione, dedicati e limitatamente flessibili, anche se spesso, capaci di trasportare generiche UTE pallettizzate. L'assemblaggio di un prodotto è suddiviso in diverse lavorazioni (*task*) da assegnare alle varie postazioni.

Il completamento di un determinato task è un'attività che richiede una certa quantità di tempo (*task time*). L'esecuzione dei task nella sequenza prestabilita dal diagramma tecnologico (identica per tutti gli item da realizzare sulla linea), porta alla realizzazione del prodotto. Il risultato finale dell'ordine in cui sono eseguiti i compiti deve essere compatibile con i vincoli di precedenza di carattere tecnologico, ad esempio la necessità di assemblare un certo componente prima di un altro, ma anche con i vincoli derivanti dalle eventuali differenti abilità degli operatori, oppure la collocazione in una determinata stazione di una attrezzatura speciale.

I vincoli di precedenza tecnologica sono rappresentati schematicamente da un diagramma (diagramma tecnologico o delle precedenze, Figura 4.1).

Questo contiene un nodo per ogni task, dei pesi per ogni nodo (i task time) e frecce che rappresentano i vincoli di precedenza.

Nell'esempio in Figura 4.1 si può vedere un diagramma delle precedenze relativo ad un problema con 14 task e task time compresi tra 2 e 9 unità di tempo. I vincoli di precedenza, ad esempio per il task 11 esprimono il fatto che il suo svolgimento richiede il completamento dei task 8, 9 e 10 (predecessori diretti) e comunque di tutti i task da 1 a 7 (predecessori indiretti). D'altra parte il task 11 deve essere completato prima di avviare l'esecuzione dei task 12 e 13 (successori diretti) e 14 (successore indiretto).

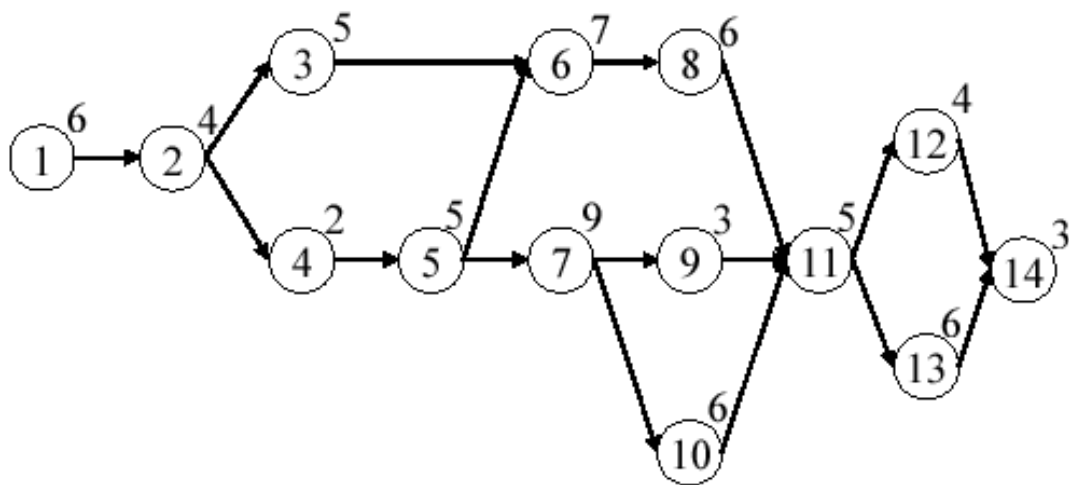


Figura 4.1: Esempio di diagramma tecnologico.

Il diagramma delle precedenze può avere anche forma tabellare o matriciale, utile soprattutto per la programmazione.

Invece, i vincoli dovuti a necessità di assegnazione di definiti task a specifiche stazioni sono rappresentati in matrici dei vincoli.

L'obiettivo risolto all'interno del problema del bilanciamento di una linea di assemblaggio (*Assembly Line Balancing Problem, ALBP*) consiste nell'assegnare tutti i task necessari alla realizzazione di un prodotto alle postazioni di lavoro, senza violare i vincoli tecnologici di precedenza, di assegnazione, ma di realizzare tale obiettivo ottimizzando una o più funzioni legate al costo di progetto della linea o ad altri fattori.

L'insieme di task assegnati ad una postazione di lavoro definisce il carico della postazione (*station load*), così come la sommatoria dei tempi di esecuzione di questi task definisce il tempo di postazione schedulato (*station time*). La cadenza produttiva, obbligata dal rispetto del valore di pianificazione della produzione di periodo, e condizionata dalla capacità produttiva offerta di ogni sottosistema produttivo, è uno dei parametri di progetti fondamentali, poiché definisce la quantità di tempo disponibile, detto tempo di ciclo (*cycle time Ct*), ad ogni postazione per completare i compiti ad essa assegnati.

Se è possibile sottostare alle seguenti ipotesi semplificative, veramente difficili da ritrovare nella realtà, si ricade nel problema di bilanciamento della linea di assemblaggio semplice (*SALBP*):

1. Dato un certo processo produttivo, produrre in massa prodotti omogenei.
2. Tempo ciclo costante.
3. Task time di tipo deterministico, utilizzando, quindi, una rilevazione dei tempi acquisita dalla reale produzione.
4. L'assenza di ulteriori vincoli di assegnazione al di fuori di quelli espressi dal diagramma tecnologico.
5. Layout costituito da un'unica linea di montaggio costituita da postazioni di lavoro.
6. Tutte le postazioni di lavoro sono attrezzate allo stesso modo.

Definite tali ipotesi si cerca di massimizzare la *funzione obiettivo*, ovvero LE (Line Efficiency) definita come:

$$LE = \frac{t_{sum}}{p * C_t} ,$$

dove:

- $p$  è il numero delle postazioni di lavoro;
- $C_t$  è il tempo ciclo;

- $t_{sum}$  è la sommatoria di tutti i tempi dei task, la cui espressione è:

$$t_{sum} = \sum_{k=1}^n t_k'$$

Una delle classificazioni che è possibile definire in questo tipo di problema è fatta in base all'obiettivo principale del bilanciamento (SHOLL 2003).

Avremo un problema di:

- Tipo F (SALBP-F): se sia il tempo di ciclo,  $C_t$ , che il numero di postazioni sono dati. In questo caso ci si prefigge solo di stabilire esiste una soluzione possibile al problema.
- Tipo 1 (SALPB-1): se, dato il tempo di ciclo, si deve minimizzare il tempo di inattività degli operatori nella linea di assemblaggio.
- Tipo 2 (SALPB-2): se, dato un numero determinato di operatori, si deve minimizzare il tempo di ciclo.
- Tipo E (SALPB-E): se si deve minimizzare sia il tempo di ciclo che il numero di postazioni di lavoro.

Si può dimostrare che l'obiettivo di un problema SALPB-1 è equivalente a cercare di minimizzare il numero di operatori necessari nella linea (CHIANG 1998). Si definisce pertanto il seguente lemma:

LEMMA 1: Allo scopo di minimizzare il tempo totale di inattività di tutte le stazioni di lavoro è necessario minimizzare il numero di stazioni.

Per fare in modo che più task possibili vengano assegnati ad un'unica stazione di lavoro si può usare una funzione obiettivo non lineare definita come:

$$F = \max \sum_{i=1}^p (t_i)^2 ,$$

dove:

- $p$  è il numero delle stazioni di lavoro;

- $t_i$  è il tempo di esecuzione dei task assegnati alla postazione i-esima.

Risulta, quindi, possibile definire un ulteriore lemma, utile in molti algoritmi, per velocizzare il processo di ricerca:

LEMMA 2: La funzione obiettivo può essere massimizzata spostando i task da stazioni con minor tempo totale a stazioni con maggior tempo totale.

Il SALBP-1 è un problema iniziale di primo livello, pertanto classico, di ottimizzazione che è stato studiato approfonditamente già negli ultimi cinquanta anni, e per il quale esistono svariati algoritmi di risoluzione, divisi in due grandi categorie: procedure esatte da una parte (*branch and bound*) ed euristiche dall'altra (per lo più *tabù - search* e *algoritmi genetici*). Per una panoramica completa degli studi pubblicati su questo argomento si rimanda a (SCHOLL 2003).

Tuttavia ogni effettivo caso reale presenta delle caratteristiche particolari affatto trascurabili nella ricerca della soluzione ottimale. Quindi sono state sviluppate differenti tecniche risolutive che danno la possibilità di tener conto di particolari situazioni e di diverse opzioni di modellazione, per risolvere casi più complessi.

Tutti i problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio che si diversificano dalla definizione di SALBP ricadono nella categoria dei problemi di bilanciamento generalizzati (*generalized assembly line balancing problem*, GALBP).

Tutte le potenziali soluzioni ricavate con i vari metodi, queste vengono valutate e comparate tramite il valore assunto da parametri che quantificano l'efficienza del bilanciamento effettuato e le prestazioni del particolare layout.

Di seguito verranno descritte alcune opzioni di modellazione, per algoritmi sviluppati nel tempo ed i parametri più comunemente utilizzati per la misura delle prestazioni.

### 4.3 La modellazione della linea.

Incorporando possibili opzioni di modellazione di linee di assemblaggio è possibile rendere più flessibile l'algoritmo che si vuole applicare ed andare nella direzione di modellare e tentare di trovare soluzione ai casi reali.

Di seguito si riportano alcune delle principali opzioni.

#### 4.3.1 Paced – Unpaced.

Nel caso di *paced assembly line* il tempo di lavorazione per ogni postazione è limitato dal tempo di ciclo  $C_t$ , che deve risultare come la slot temporale entro cui realizzare un nuovo prodotto.

Se poi si parla di linee sincronizzate, l'avanzamento del flusso è "incatenato" stazione per stazione.

Dal momento in cui i task sono lavorazioni indivisibili, in assenza di possibilità di *paralleling*, di cui si parlerà in seguito,  $ct$  non può essere più piccolo del più grande dei tempi di task, ovvero:

$$ct \leq t'_{max}$$

dove  $t'_{max}$  viene considerato come:

$$t'_{max} = \max \{t'_k, k = 1, \dots, n\}$$

Per questa restrizione del tempo di ciclo, le *paced assembly line* hanno un tasso di produzione (*throughput*) fisso, definito dal tempo di ciclo.

In assenza di un tempo di ciclo comune, cioè se le postazioni lavorano a velocità differenti, i prodotti in alcune fasi più veloci potrebbero dover aspettare prima di entrare nella postazione successiva, oppure una postazione potrebbe dover aspettare il prodotto successivo a quello che ha appena finito di lavorare.

In questi casi spesso si ovvia con l'utilizzo di magazzini o meglio accumuli interoperazionali (*buffer*) tra le postazioni. In questo caso di *buffered (unpaced) assembly line*, l'ALBP aumenta la complessità per l'aggiunta del problema di posizionamento e dimensionamento dei magazzini.

### 4.3.2 Tempi di esecuzione dei task deterministici o stocastici.

Nella realtà bisogna tener presente che i tempi di esecuzione di un determinato task, eseguiti da operatori e non su macchine, hanno una spiccata variabilità tipica della componente manuale nella sua esecuzione, ovvero una lavorazione manuale non è così ripetibile e non potrà essere completata in range di tempo troppo ristretti da essere considerati deterministici.

Quindi, al fine di considerare un modello che rispecchi maggiormente l'effettiva produzione si utilizzano dei tempi stocastici, caratterizzati da distribuzioni di frequenza, tipicamente assimilabili a lognormali, gaussiane o triangolari, piuttosto che deterministici; ciò nonostante in alcuni casi si considerano tempi deterministici (KIM 1996, WATANABE 1995, CHIANG 1998).

Questa assunzione è, di fatto, troppo semplificativa rispetto alla realtà, per cui i modelli con task time deterministici possono essere considerati soluzioni di primo livello, e giustamente, più spesso si assume che i tempi siano stocastici, tra l'altro, la distribuzione deve essere ottenuta da osservazioni ripetute, o tempi standard secondo le indicazioni delle metodologie MTM e similari. In letteratura, la distribuzione di probabilità più usata è quella normale (KOTTAS 1981) caratterizzata da valor medio e deviazione standard. È quasi sempre possibile ricadere nella ipotesi che i tempi di completamento di ciascun task siano indipendenti fra loro.

Per un task generico  $k$ ; sia  $t_k$  il tempo di esecuzione, variabile con distribuzione normale di probabilità (Figura 4.1):

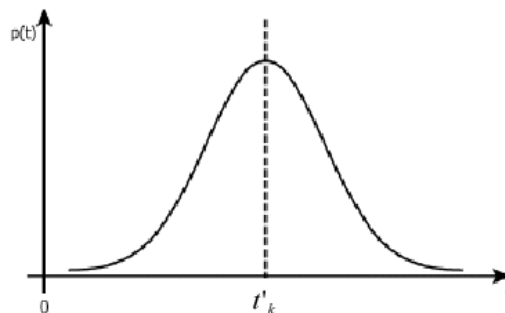


Figura 4.1: Distribuzione normale di probabilità.

Siano:

$p(t)$  la densità di probabilità,

$t'_k$  il valor medio,

$\sigma_k$  la deviazione standard,

$\sigma_k^2$  la varianza.

La condizione di normalizzazione implica che:

$$\int_0^{\infty} p(t) dt = 1$$

Allo stesso tempo le altre grandezze sono:

$$t'_k = \frac{\int_0^{\infty} t p(t) dt}{\int_0^{\infty} p(t) dt} = \int_0^{\infty} t p(t) dt$$

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} (t - t'_k)^2 p(t) dt$$

Il valore della varianza è indicativo della dispersione dei valori attorno alla media, e più piccola risulta essere la varianza  $\sigma_k^2$ , tanto più compatta risulta la dispersione dei valori  $t_k$  attorno a  $t'_k$ .

Per valutare  $t'_k$  e  $\sigma_k$ , si devono effettuare dei campionamenti con osservazioni ripetute in differenti condizioni per diversi operatori, dei tempi di esecuzione in un certo numero  $r$  di prove del task in esame; dagli  $r$  valori differenti  $t_h$  (con  $h = 1, 2, \dots, r$ ) si possono ricavare i valori stimati:

$$t'_k \approx \frac{\sum_{h=1}^r t_h}{r}$$

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^r (t_h - t'_k)^2}{r-1}} \approx \sigma_k$$

Dalle osservazioni fatte si può ricavare o un istogramma o la curva o modello teorico riferire le osservazioni, e di conseguenza la densità di probabilità  $p(t)$ , a partire dalla quale si può definire la funzione di distribuzione  $F(t)$  cumulata o integrata di  $p(t)$ , che esprime la probabilità cumulativa che l'esecuzione del task abbia una durata  $\tau$ , in modo che sia  $0 < \tau \leq t$ ; l'espressione di tale funzione è:

$$F(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau$$

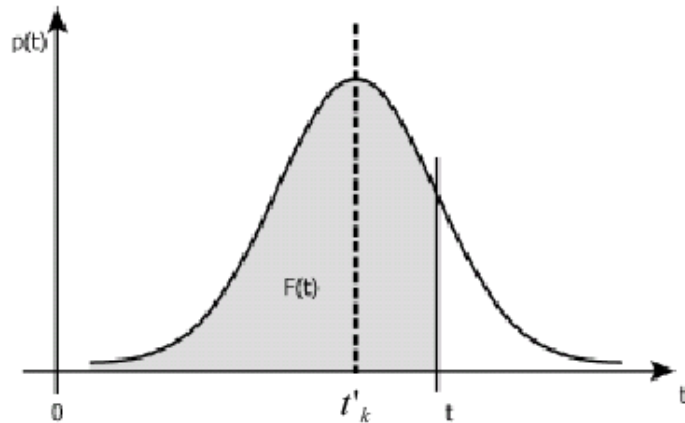


Figura 4.2: Distribuzione normale di probabilità.

In realtà si preferisce utilizzare la variabile normalizzata z, definita come:

$$z = \frac{t - t'_k}{\sigma_k} ,$$

questo per centrare il diagramma sull'origine degli assi, cioè per  $t = t'_k$  si ha  $z=0$ , da cui la funzione  $F(t)$  sarà:

$$F(z) = \int_{-\infty}^z p(z') dz'$$

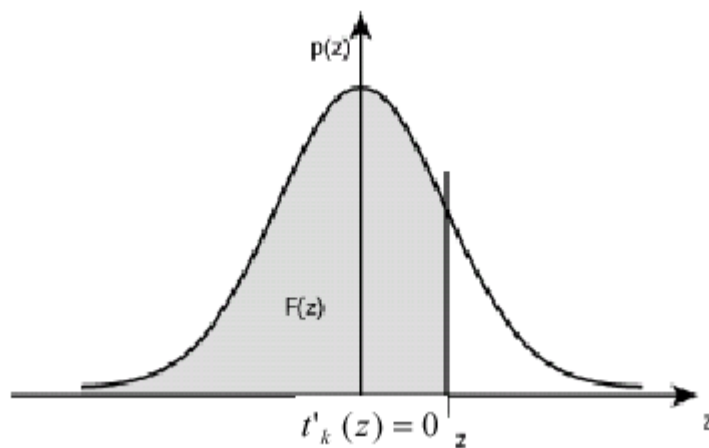


Figura 4.3: Distribuzione normale di probabilità.

Nel caso di assegnazione di più task ad una stazione, il task  $k$ -esimo verrà eseguito in ordine di sequenza e non potrà essere completato finché tutti i task precedenti nella stazione non siano stati completati: il carico totale assegnato alla stazione ed il relativo tempo, risultano somma dei task assegnati e relativi tempi, risultando la variabile “tempo completamento task assegnati alla stazione” una variabile aleatoria derivata. Il suo tempo di completamento si può riavere in relazione agli altri.

Se si indica con  $j$  il generico task fra quelli assegnati già alla stazione, e che quindi precedono il task  $k$ -esimo, consideriamo il tempo totale di esecuzione di tutti i task precedenti più quello di questo stesso task. Poiché tutti i task dell'insieme hanno tempi di esecuzione aventi distribuzione normale di probabilità, si può definire la variabile normalizzata:

$$Z = \frac{ct - \sum_j t'_j}{\sqrt{\sum_j \sigma_j^2}},$$

dove  $ct$  è il tempo ciclo della linea.

La funzione  $F(Z)$ , analogamente ad  $F(z)$ , che abbiamo precedentemente definito, esprimerà la probabilità cumulativa che tutte le attività eseguite nella stazione siano completate entro il tempo  $C_t$ .

Quindi per verificare che tutti i task di una data stazione siano completati con una probabilità  $\Phi$  entro il tempo  $C_t$ , dovrà essere  $F(Z) \geq \Phi(u)$ , dove  $\Phi(u)$  è la funzione cumulata della gaussiana normalizzata. Deve perciò valere la seguente disuguaglianza:

$$\frac{C_t - \sum_j t'_j}{\sqrt{\sum_j \sigma_j^2}} \geq u \iff Z \geq u,$$

espressione che può essere riscritta nel seguente modo:

$$C_t \geq \sum_j t'_j + u \cdot \sqrt{\sum_j \sigma_j^2}$$

Il tempo ciclo deve risultare non minore della somma dei valori medi dei task assegnati più u volte la varianza “composta” con le varianze dei tempi dei task già assegnati.

L'espressione al secondo membro della disuguaglianza può essere definita come tempo totale equivalente relativo ad una probabilità di completamento  $\Phi(u)$  di una data stazione:

$$t_{eq} = \sum_j t_j' Z + u \cdot \sqrt{\sum_j \sigma_j^2}$$

Alcuni autori (SARIN 1999, SILVERMAN 1986) trovano conveniente utilizzare una distribuzione a singolo parametro normale, per la quale la deviazione standard è riferita al valore medio:

$$\sigma_k = cv \cdot t_k'$$

dove cv è un numero detto coefficiente di variazione.

Se si definisce il coefficiente di variazione si ottiene la deviazione standard per ognuno dei tempi di completamento di ogni task. Esempi di algoritmi che tengono conto di tempi di esecuzione dei task stocastici si possono trovare in (SARIN 1999), (JIN 2002) e (LYU 1997).

È possibile integrare i tempi stocastici con considerazioni dovute a eventuali riduzioni sistematiche della variabilità di questi tempi, per effetti di apprendimento da parte degli operatori della linea (*learning effects*) o variazioni di conduzione del processo produttivo.

Esempi di questo tipo di modellazione si trovano in (BOUCHER 1987) e (CHAKRAVARTY 1998).

### 4.3.3 Single model – Mixed model – Multi model.

Attualmente ogni mercato è altamente competitivo, frazionato, diversificato e centrato sul cliente. I produttori competono per attirare i consumatori elevando il livello di diversificazione e personalizzazione.

Ad esempio, nel mercato dell'automobile, ciascun modello ha la possibilità di offrire svariate combinazioni e versioni per adattarsi ai gusti ed

alle possibilità economiche del cliente. Differenti opzioni significano che differenti parti debbano essere montate sul modello base.

Per contenere i costi di investimento ed esercizio di una linea di assemblaggio, le aziende producono famiglie di modelli differenziati e multi opzione sulla stessa linea. In queste circostanze, il problema di bilanciamento di una linea di assemblaggio diventa un *mixed model assembly line balancing (MALBP)* (JIN 2002).

Si distinguono differenti tipi di questo problema, in base ad alcune caratteristiche della programmazione della produzione: *multi-model* e *mixed-model* propriamente detto.

Nel primo caso i lotti per item sono più o meno numerosi, mentre nel secondo, la dimensione del lotto di produzione vuole essere sempre uguale ad uno. Questa modalità ultima è quella che più si accorda con le metodologie *Just In Time* (VANZANTE 1997).

Se prodotti differenti sono avviati su una stessa linea il MALBP integra il problema del *sequencing* della linea, ovvero definizione della sequenza migliore di immissione degli ordini nella linea per minimizzare i tempi di setup e massimizzare l'efficienza della linea.

Questo problema emerge al crescere della dispersione dei tempi di realizzazione tra modello e modello.

In letteratura si riscontra spesso la tendenza, nell'affrontare un *mixed model-ALBP*, a ricondurre il problema stesso ad un *single model-ALBP*, vale a dire che i tempi di esecuzione dei task, dipendenti dal tipo di prodotto, vengono riscritti come tempi di esecuzione aggregati.

Nel caso di tempi deterministici, il problema si può facilmente riformulare nel seguente modo.

Detti:

$A_j$  la domanda relativa al prodotto  $j$

$m$  il numero totale di differenti modelli prodotti

allora la domanda totale  $A$  è data da

$$A = \sum_{j=1}^m A_j .$$

Il peso del prodotto  $j$ ,  $\alpha_j$ , è calcolato come:

$$\alpha_j = \frac{A_j}{A} .$$

Determinati i pesi, è possibile calcolare la media pesata, o composta, dei tempi di esecuzione dei task.

$$t'_k = \sum_{j=1}^m \alpha_j t'_{kj} ,$$

dove  $t'_{kj}$  è il tempo di esecuzione del task  $k$  per il modello  $j$ .

Considerando i tempi di esecuzione dei task come variabili aleatorie, caratterizzate da distribuzioni normali, la relazione appena scritta è ancora valida purché si considerino i tempi  $t'_k$  e  $t'_{kj}$  come tempi medi. Utilizzando il coefficiente di variazione  $cv$  è possibile stimare anche le deviazioni standard dei tempi medi composti.

La deviazione standard del task  $k$  per il prodotto  $j$ , indicata con  $\sigma_{kj}$ , si calcola come:

$$\sigma_{kj} = cv * t'_{kj}$$

Per stimare la deviazione standard composta per il task  $k$ , indicata con  $\sigma_k$ , si può utilizzare la seguente formula:

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{1}{A-1}\right) \left( \sum_{j=1}^m \alpha_j (t'_{kj} - t'_k)^2 + \sum_{j=1}^m (\alpha_j - 1) \sigma_{kj}^2 \right)}$$

Se la domanda annuale totale è grande, la relazione precedente si può riscrivere come:

$$\sigma_k = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^m \alpha_j \left( \sigma_{kj}^2 + (t_{kj}' - t_k')^2 \right) \right)}$$

A questo punto il mixed-model ALBP è ricondotto al single-model ALBP con tempi medi composti di esecuzione dei task  $t_k'$  e deviazioni standard composte  $\sigma_k$ .

#### 4.3.4 U-shaped layout.

Il flusso dei materiali, in relazione anche alla sua numerosità, condiziona e predetermina il layout di un sistema di produzione nella forma a flusso. Tuttavia, a parità di tale scelta, esistono alcune diverse possibilità. Solitamente una linea di assemblaggio è intesa ed organizzata come un sistema seriale, con singole postazioni poste lungo un nastro trasportatore. Tale configurazione in alcuni casi risulta poco flessibile e alcune delle limitazioni, però, possono essere superate adottando un layout a forma di U (*U-shaped assembly line*). In questi casi, entrambe le parti finali della linea sono vicine formando appunto una “U”.

Ogni operatore può lavorare su due segmenti della linea alternativamente; tale soluzione è spesso utilizzata quando sia l’input che l’output della linea si trovano nella stessa area (Figura 4.4).

Questa possibilità permette di ottenere migliori bilanciamenti dei carichi di lavoro, poiché esistono molte più possibili combinazioni tra task e postazioni (MILTENBURG 1998, MONDEN 1998, SCHOLL 1999/2).

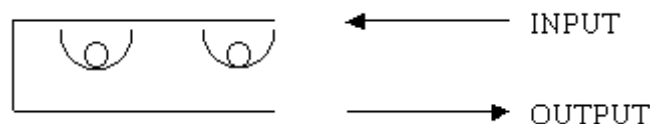


Figura 4.4: Esempio di configurazione linea U-shaped.

### 4.3.5 Paralleling.

In prima istanza si considera che un task venga eseguito da un solo operatore, e questo è normalmente possibile quando il tempo di assegnazione dei task ad ogni stazione non supera il  $C_i$  dovuto a vincoli esterni. Ma quando questa condizione non può essere assecondata, il paralleling è un'opzione che può risolvere il vincolo, facendo operare nella stessa stazione più operatori sulla stessa sequenza di task. Si considera l'opportunità di avere delle postazioni identiche in parallelo. In tal modo potrebbe abbassarsi il tempo operativo della stazione, o al peggio, si otterrebbe il rispetto della cadenza di linea, non nella singola slot pari al tempo ciclo ma realizzando più unità in multipli del tempo ciclo, ma in modo da rispettare la cadenza stessa.

L'uso del paralleling è indotto da due tipi di motivazioni: l'aumento di capacità produttiva offerta e dell'utilizzazione del sistema, che, in certe situazioni, si verifica se si assegnano più lavoratori ad una stessa postazione. Inoltre, la già citata possibilità di trattare task con dei tempi medi di esecuzione superiori al tempo di ciclo.

Tuttavia, all'aumento di flessibilità che l'utilizzo del paralleling permette, si associa un maggiore livello di complessità per la configurazione della linea. Soprattutto gli algoritmi e la loro complessità, crescono molto sotto tale opzione.

L'aspetto economico nella funzione obiettivo da ottimizzare è spesso essenziale rispetto ad altri parametri di performance. Questa cosa può accadere soprattutto quando si ha la necessità di duplicazioni di attrezzature ausiliarie e mezzi di movimentazione, mentre per ALBP senza paralleling basta la minimizzazione delle postazioni di lavoro per ottenere la minimizzazione dei costi di progetto.

Questo costo, infatti, può aumentare con il numero delle postazioni duplicate, quasi proporzionalmente, dato che raddoppiano anche le attrezzature necessarie alle lavorazioni assegnate alle postazioni stesse (tipo avvitatori, attrezzature dedicate, presse, ecc.).

Pertanto è nella funzione obiettivo devono essere considerati anche tali costi, per non ottenere la soluzione banale di una unica postazione (peraltro perfettamente bilanciata), duplicata svariate volte.

In letteratura esistono esempi di algoritmi che presentano questa opzione. Tra gli altri citiamo i lavori di P. R. McMullen e G. V. Frazier (MCMULLEN 1997 e MCMULLEN 1998).

#### 4.3.6 One side – Two side.

Con qualche somiglianza al caso del paralleling si possono considerare le linee *two-sided*.

Solitamente si considera che una linea utilizzi solo un lato della postazione di lavoro.

Come è il caso di prodotti molto grandi, ma non solo, si può lavorare con una linea a doppio lato (*two-sided line*), (si pensi, ad esempio, all'assemblaggio di camion o pullman). Si tratta di fatto di una doppia linea in parallelo: al posto di singole postazioni di lavoro, coppie di postazioni di lavoro, le une di fronte alle altre, eseguono i task assegnati contemporaneamente sui lati opposti dello stesso prodotto (Figura 4.5) (BARTHOLDI 1993, LEE 2001).

In tale caso, come livello di complessità si aggiunge nella valutazione del rispetto dei vincoli, anche quello relativo alla valutazione del lato di assegnazione dei task, che potrebbero richiedere un'assegnazione lato – dipendente.

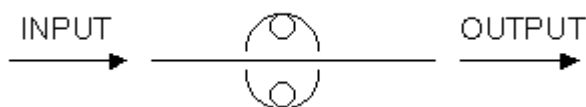


Figura 4.5: Esempio di configurazione linea in two - side.

#### 4.3.7 Restrizioni all'assegnamento dei task.

Come già accennato, nella valutazione di assegnazione di un task ad una postazione è necessario verificare la disponibilità in questa di

equipaggiamenti e competenze di operatori adeguate ai task, ipotesi non sempre verificata. In particolare, nel caso di prodotti complessi, di solito non è possibile avere tutte le postazioni attrezzate nello stesso modo.

Si devono considerare, pertanto, le esigenze di inserire nel problema delle restrizioni nell'assegnazione dei task relativi alle postazioni (*station related*, KILBRIDGE 1961 e BUKCHIN 2000).

Possono esistere nell'assegnazione dei task limitazioni per vincoli legati agli stessi task (*task related*) come incompatibilità tra task, distanze minime o massime (in termini di spazio o di tempo) tra postazioni che eseguono una coppia o un insieme di task (IGNALL 1965, DECKRO 1989, AGNETIS 1995).

Vincoli legati alla posizione (*position related*) possono essere rilevanti per prodotti pesanti, ingombranti o bloccati sul nastro trasportatore in modo tale che non possano essere ruotati nelle posizioni richieste per eseguire un particolare task in una certa postazione (BUXEY 1976, WANG 1986).

Infine, un ultimo tipo di restrizione all'assegnazione di un task è quello legato agli operatori (*operator related*), presente quando non tutti gli operatori hanno la capacità o formazione, per motivi anche di costo retributivo dovuto alla formazione, per eseguire un particolare task, pertanto, quando un operatore è assegnato ad una postazione, sono possibili solo alcune combinazioni di task (AGRAWAL 1985, ISKANDER 1990).

#### **4.3.8 Quali opzioni in caso di ritardo.**

Data anche la forte aleatorietà dei tempi di esecuzione dei task, se si verifica un ritardo nell'esecuzione dei task assegnati ad una postazione di lavoro rispetto al tempo ciclo, si può o bloccare la linea, o ritardare la cadenza produttiva.

Nel caso in cui la linea non possa o non si voglia bloccarla, si può completare il prodotto in un secondo momento fuori dalla linea stessa, sostenendo i costi che ne conseguono, generalmente considerati non dipendenti da quanta quota del task si sia completata (KOTTAS 1981 e SARIN 1999).

Nell'altro caso, si può prolungare il tempo di ciclo fino a quando tutti i task non siano completi, evitando i costi di completamento fuori linea, ma, causando il blocco delle postazioni a monte e a valle.

In alcune linee è prevista l'estensione del tempo di ciclo solo nel caso in cui non siano stati completati dei particolari task (SILVERMAN 1986).

#### **4.4 Le soluzioni: gli algoritmi.**

In letteratura si trovano moltissime trattazioni relative alle linee di assemblaggio, con differenti e numerosi tipi di algoritmi per la ricerca delle soluzioni del problema del bilanciamento della linea di assemblaggio.

Salveson (SALVESON 1955) fu il primo ad utilizzare un approccio empirico, descrivendo la sequenza di assemblaggio, caratterizzata da un insieme di relazioni di precedenza che i task dovevano rispettare nel modo in cui venivano assegnati.

Bowman (BOWMAN 1960) cercò di utilizzare la programmazione lineare a valori interi per risolvere il problema, ma, per l'elevato numero di variabili e di vincoli, la ricerca delle soluzioni ottimali era spesso impraticabile a causa, anche nel caso di problemi semplici.

In seguito furono utilizzati dei metodi più efficienti. Ad esempio Klein (KLEIN 1963) risolse il problema trovando la minima "distanza di task" tra il nodo iniziale e quello finale della matrice di precedenza. Patterson e Albracht (PATTERSON 1975) provarono una tecnica di ricerca attraverso la programmazione a valori interi. Tale soluzione risultò più efficiente dal punto di vista del calcolo eliminando alcune variabili non necessarie dalla formulazione.

Pinto (PINTO 1975) per possibilità anche di paralleling, sviluppò un'efficiente tecnica di tipo branch-and-bound.

Molte delle euristiche proposte hanno contribuito a trovare soluzioni non necessariamente ottime, ma comunque efficienti, con quantità di calcolo richieste molto modeste.

Helgeson e Birnie (HELGESON 1961) svilupparono il *Ranked Positional Weight Technique (RPWT)*, un'euristica che assegnava il task, tra quelli

disponibili, per il quale la somma di tutti i tempi dei task successivi era maggiore.

L'euristica di Moodie e Young (MOODIE 1965), invece, assegnava il task con il tempo di esecuzione più grande.

Arcus (ARCUS 1966) sviluppò un'euristica (COMSOAL) che, dopo aver generato un certo numero di soluzioni possibili con il metodo Monte Carlo, selezionava quella con l'utilizzazione maggiore.

Tutte queste tecniche considerano valori deterministici dei tempi dei task e, pur molto importanti per la ricerca in questo campo, risultano troppo distanti rispetto ai problemi reali.

Per questo motivo molti algoritmi sviluppati si sono posti il problema di considerare valori stocastici per i tempi di esecuzione dei task, come, ad esempio, Kottas e Lau (KOTTAS 1981) i quali hanno sviluppato una tecnica per minimizzare i costi totali (di progetto e di completamento fuori linea).

Carter e Silverman (CARTER 1984, SILVERMAN 1986) hanno modificato questa tecnica in modo tale da garantire un valore minimo della probabilità di completamento, all'interno del tempo di ciclo, dei task assegnati ad una postazione.

Molti anche gli algoritmi per il problema di bilanciamento tipo mixed o multi model.

Diverse sono stati i metodi di risoluzione proposti.

Prima degli anni '80 molti ricercatori considerarono il tempo di esecuzione del task per parti differenti.

Thomopoulos (THOMOPOULOS 1970) valutò la relazione fra costi e classi di inefficienza, per esempio, il tempo di inattività e il tempo di utilizzo, e formulò un modello per minimizzare il costo totale con una euristica per risolverlo. La lunghezza globale della linea venne considerata da Dar-El e Cothier (1975). Erel e Gokcen (1999) hanno usato una formulazione *shortest-route* per minimizzare il task time per diversi modelli considerando i vincoli di precedenza.

Anche la diffusione del sistema JIT in Toyota, l'obiettivo di raggiungere una sequenza che minimizzi la variazione del tasso delle risorse usate dalle

unità ha contribuito a focalizzare l'attenzione di molti ricercatori. Questo obiettivo può integrarne altri, poiché il tempo di task è una delle proprietà di parti differenti e diversi modelli significa la necessità di parti diverse.

Driscoll e Abdel-Shafi (DRISCOLL 1985) hanno presentato una tecnica integrata di bilanciamento e di valutazione basata sulla simulazione per affrontare problemi che prevedono tempi dei task stocastici, diversità di prodotti (mixed model) e tempo di ciclo più piccolo di alcuni tempi di esecuzione dei task. È realizzata in due fasi, la prima effettua il bilanciamento con l'euristica RPWT ed, poi vengono lanciate delle simulazioni per valutare le prestazioni del layout.

Sempre sul mixed-model GALBP interessante è l'algoritmo genetico proposto da Y. K. Kim e Y. J. Kim (KIM 2000) per risolvere contemporaneamente sia il problema di bilanciamento che quello relativo al sequencing ottimale.

Sul problema mixed-model/multi-model si veda anche (VANZANTE 1997). Un'altra euristica efficiente è quella proposta da Gaither (GAITHER 1996), che adotta, come criterio principale di selezione dei task, l'aumento dell'utilizzazione della postazione e prevede la possibilità di paralleling, ma considera deterministici i valori dei tempi. McMullen e Frazier (MCMULLEN 1997) hanno modificato questa euristica rendendola adatta a trattare con tempi stocastici e considerando la linea di tipo mixed model.

Lee (LEE 2001) prevede anche la possibilità di avere una linea two sided.

Altri metodi sono stati sviluppati considerando la natura combinatoria del problema del bilanciamento della linea. Peterson (PETERSON 1993) ha proposto una procedura di tipo tabu-search, con la quale una soluzione iniziale viene modificata nel rispetto delle restrizioni (tabu) imposte nel tentativo di migliorarla.

Suresh e Sahu, e McMullen e Frazier (SURESH 1994, MCMULLEN 1998) hanno sviluppato una tecnica di *simulated annealing* che considera una soluzione iniziale come un corpo solido portato ad elevata temperatura e, successivamente, lasciato raffreddare (ricottura).

Le molecole (i task) hanno una certa mobilità (tra le postazioni) che diminuisce con il calo della temperatura e che trasforma la soluzione iniziale in altre soluzioni.

Questa tecnica, così come il tabu search, cerca di trovare la migliore soluzione, senza rischiare di bloccarsi su un punto di minimo locale.

Leu, Watanabe e Kim (LEU 1994, WATANABE 1995, KIM 1996) hanno sviluppato degli algoritmi di tipo genetico, che emulano quello che avviene nel processo di selezione naturale degli esseri viventi. Una popolazione iniziale d'individui che rappresenta le possibili soluzioni a quella fase, è sottoposta ad una selezione in base all'adattabilità (fitness) di ciascuna soluzione al problema. La selezione fa sopravvivere solo alcuni individui che formeranno la successiva generazione tramite *algoritmi di crossover* e di *mutazione*. Nkasu e Leung (NKASU 1995) hanno proposto una versione modificata di COMSOAL che considera i tempi stocastici.

Infine Lyu (LYU 1997) ha presentato un algoritmo basato su un approccio di ottimizzazione single-run, che utilizza la simulazione per il bilanciamento della linea.

#### **4.5 Parametri di misura delle performance.**

In letteratura sono stati definiti diversi parametri da poter utilizzare per misurare la qualità di una soluzione; fra i primi, Kilbridge e Wester (KILBRIDGE 1961) hanno definito il *Balance Delay (BD)*, che è definito nel seguente modo:

$$BD = \left( 1 - \frac{\sum_{k=1}^n t'_k}{p \cdot ct} \right) \cdot 100$$

dove:

$ct$  è il tempo ciclo,

$t'_k$  il valor medio del tempo di esecuzione del task  $k$ ,

$n$  il numero dei task,

$p$  il numero delle postazioni di lavoro.

Il Balance Delay è, quindi, una misura dell'inefficienza della linea; che, però, non riesce a considerare la distribuzione del carico di lavoro tra le postazioni.

Un altro indice (MOODIE 1965), detto Smoothness Index (*SI*), è dato da:

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^p (ct - t_i)^2}$$

dove  $t_i$  non è altro che la somma dei tempi dei task assegnati alla postazione  $i$ .

Rispetto al BD, questo considera i carichi di lavoro per ogni postazione, ma restituisce un valore in tempo assoluto non adimensionale, non consentendo confronti tra problemi.

Driscoll e Thilakawardana (DRISCOLL 2001) hanno proposto di utilizzare due indici. Il primo, la *Line Efficiency (LE)*, rappresenta, su una scala da 0 a 100, il raggiungimento di una buona utilizzazione della linea ed è una misura diretta della convenienza economica di una soluzione.

Il secondo, il *Balance Efficiency (BE)*, dà conto della distribuzione del lavoro tra le diverse postazioni, con conseguente miglioramento delle prestazioni della linea. Anche questo può assumere dei valori compresi tra 0 e 100.

Indicando con:

$$t_{av} = \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{p}$$

il carico di lavoro per postazione, gli indici LE e BE vengono definiti come:

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{p \cdot ct} 100 = \frac{t_{sum}}{p \cdot ct}$$

$$BE = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^p |t_i - t_{av}|}{p \cdot t_{av}} \right) 100$$

Tutti questi indici si calcolano facilmente con i valori dei tempi dei task e la configurazione del layout (numero di postazioni, task assegnati ad ogni postazione).

Per valutare una soluzione di layout in caso di paralleling si utilizzano i seguenti indici (TIACCI 2003). Infatti, gli indici precedenti sono corretti quando la soluzione non preveda il raddoppio di postazioni. Il *Line Efficiency* (LE) per un layout dove si verifica il paralleling per almeno una postazione ignora i costi relativi ad uno o più operatori e ai macchinari necessari (equipment) ad allestire le postazioni supplementari (in tali casi il valore di LE può essere superiore a 100). In caso di paralleling, anche il BE non tiene conto del diverso numero di operatori presenti.

Per ovviare a questo problema vengono proposti questi due nuovi indici.

Indichiamo con:

$t'_k$  il tempo medio di esecuzione del task k

$p$  il numero di postazioni di lavoro

$w_i$  il numero di operatori assegnati alla postazione i

$n_i$  il numero di task assegnati alla postazione i

$w_{\bullet} = \sum_{i=1}^p w_i$  il numero totale di operatori nella linea

$w_t = \frac{\sum_{k=1}^n t'_k}{ct} = w_t = \frac{t_{sum}}{ct}$  il numero teorico di operatori necessari, uguale al numero di stazioni se si prevede di non fare il “paralleling”, ovvero più operatori in stazione.

$e_{\bullet} = \sum_{i=1}^p e_i = \sum_{i=1}^p n_i \cdot w_i$  il numero di attrezzature utilizzate nella linea.

I task assegnati indicano la possibilità di effettuare operazioni diverse che richiedono attrezzature diverse, mentre il numero di operatori indica le operazioni/task in parallelo che si possono realizzare.

Sia:

$e_t = n$  il numero di attrezzature teorico.

$e_t = n$  può risultare  $< e_\bullet = \sum_{i=1}^p e_i = \sum_{i=1}^p n_i \cdot w_i$  nel caso di paralleling.

$LC$  il costo della manodopera.

$EC$  il costo di attrezzaggio.

Se ipotizziamo che il costo annuo di un operatore sia dieci volte superiore al costo annuo per una attrezzatura (MCMULLEN 1998), allora le risorse totali si possono esprimere nel modo seguente:

$R_r = LC \cdot w_\bullet + EC \cdot e_\bullet$  risorse *reali* utilizzate,

$R_t = LC \cdot w_t + EC \cdot e_t$  risorse *teoriche* necessarie,

quindi:

$$LE_p = \frac{R_t}{R_r} \cdot 100$$

Se indichiamo con:

$L_i = \frac{t_i}{w_i}$  il carico di lavoro medio per operatore nella postazione  $i$ ,

e

$L_{av} = \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot L_i}{w_\bullet} = \frac{t_{sum}}{w_\bullet} = L_{av} = \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot \frac{t_i}{w_i}}{w_\bullet} = \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{w_\bullet} = \frac{t_{sum}}{w_\bullet}$  il carico di lavoro medio per operatore.

Allora:

$$BE_p = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot |L_i - L_{av}|}{w_{\bullet} \cdot L_{av}} \right) \cdot 100$$

Ovviamente, se in una soluzione non è previsto paralleling,  $LE_p = LE$  e  $BE_p = BE$ .

Solo il ricorso all'utilizzo della simulazione consente di determinare parametri relativi alla emulazione del comportamento aleatorio del sistema.

I principali sono brevemente descritti di seguito:

- Utilizzazione media del sistema (*ASU*), è il rapporto tra il tempo totale di effettivo utilizzo delle risorse del sistema e il tempo totale di disponibilità delle risorse stesse.
- Percentuale delle unità completate nel tempo di ciclo (*POT*), è una misura dell'abilità delle singole postazioni ad eseguire le lavorazioni nel tempo disponibile.
- Cycle time ratio (*CTR*), è il rapporto tra il tempo di ciclo desiderato e quello reale.
- Flow time (*FT*), è il tempo medio che un prodotto impiega per attraversare tutta la linea.
- Work in process (*WIP*), è la quantità di prodotti che mediamente sono nella linea.
- Cadenza produttiva (*CP*), è il tempo medio che intercorre tra l'uscita dalla linea di due prodotti successivi.

#### **4.6 Classificazione dei problemi.**

Un altro tipo di classificazione possibile dei problemi, è relativa al tipo di soluzione che si vuole ottenere. L'obiettivo principale del bilanciamento ha attinenza con il tipo di tecnica risolutiva, anche per uno stesso caso.

Di seguito indichiamo tre obiettivi tipici:

- Ricerca del layout che garantisca la cadenza produttiva richiesta, con i costi di progetto più contenuti possibili .
- Ricerca del layout più economico, con cadenza produttiva media prossima a quella richiesta.
- Ricerca del layout che, con dei costi di progetto relativamente contenuti, fornisca le migliori prestazioni per cadenza produttiva e di flow time.

La classificazione è relativa anche alle caratteristiche del particolare problema definite sul diagramma tecnologico (e quindi i vincoli di precedenza) e, ovviamente, dai i tempi di esecuzione dei task.

#### **4.7 Simulazione ad eventi discreti.**

Spesso si utilizza la simulazione, più come strumento di validazione e verifica, che non come strumento di determinazione della soluzione.

In effetti, dalle analisi e studi che si possono realizzare con un modello dinamico del sistema progettato, si possono ottenere molte indicazioni sull'effettiva bontà della soluzione ottenuta attraverso un algoritmo e scovarne anche i punti deboli.

Ulteriormente, la simulazione permette all'aleatorietà del sistema di estrinsecarsi completamente, valutando anche la robustezza della soluzione l'una rispetto ad un'altra, così come verificare l'efficacia al variare di qualcuna delle condizioni di stato.

Si ritiene opportuno dare una breve descrizione della simulazione ad eventi discreti.

È necessario, prima di tutto, introdurre i concetti di sistema e modello.

Un *sistema* è definito come un insieme di entità, come, ad esempio, macchinari o persone, che agiscono e interagiscono insieme in modo tale da completare un processo logico con una finalità unica. In pratica, la definizione di sistema dipende dagli obiettivi dello studio che si vuole intraprendere.

Si definisce *stato del sistema* il valore assunto dall'insieme di variabili definite per descrivere il sistema in un particolare momento. I sistemi sono classificati come *discreti* e *continui*. I primi sono quelli per i quali le variabili variano in maniera istantanea in particolari momenti di tempo, mentre, per i secondi, le variabili cambiano in maniera continua rispetto al tempo.

Difficilmente un sistema può essere descritto come completamente discreto o completamente continuo, spesso risulta solo che una delle caratteristiche sia predominante rispetto all'altra. Per un sistema ci può essere l'esigenza di predire le prestazioni che si potrebbero ottenere modificando una o più caratteristiche o condizioni. In Figura 4.6 sono mostrati i diversi metodi di analisi che si possono utilizzare per studiare in sistema.

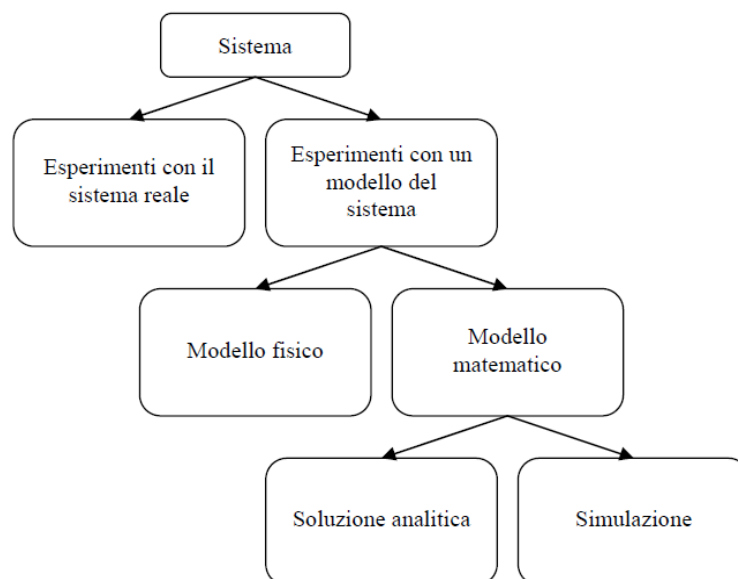


Figura 4.6 – Metodi di studio di un sistema.

Di seguito accenniamo alle diverse tipologie di metodi evidenziati in figura:

- *Esperimenti con il sistema reale o esperimenti con un modello del sistema:* se è possibile, non costoso, modificare fisicamente il sistema, è bene farlo, poiché, in questo modo, non ci sono dubbi sulla validità dello studio condotto. Non sempre si fa per motivi economici, di tempo, o perché il sistema è in fase di valutazione/progetto. Per questi motivi, di solito, è necessario

costruire un *modello* del sistema reale. È fondamentale definire gli aspetti del comportamento da considerare, e, quindi, quanto il modello debba essere dettagliato e aderente alla realtà (*validità* del modello).

- *Modello fisico o modello matematico*: i modelli fisici sono utilizzati nello studio di problemi complessi quali quelli aerodinamici (si pensi ai modelli in similitudine utilizzati in galleria del vento), ma anche nello studio di sistemi industriali (magazzini, linee di produzione, ecc.). Comunque la maggior parte dei modelli sono di tipo matematico. Essi rappresentano il sistema attraverso relazioni logiche e quantitative.
- *Soluzioni analitiche o simulazione*: una volta costruito il modello matematico, bisogna definire come questo possa essere utilizzato per rispondere alle domande di interesse riguardanti il sistema. Se il modello è ancora abbastanza semplice, è possibile lavorare con le sue relazioni e quantità per ottenere soluzioni esatte del problema. Se il livello di complessità del sistema cresce, o il modello è più dettagliato, risulta difficile trovare una soluzione in forma chiusa (qualche volta, addirittura impossibile), allora si può cercare di trovare una soluzione utilizzando la simulazione, ovvero inserendo nel modello una certa quantità di input, per studiare come questi influenzano l'output finale.

Ancora classificazioni sotto l'aspetto temporale delle questioni:

- *Modelli statici o modelli dinamici*: un modello di simulazione statico è una rappresentazione del sistema in un particolare momento. Invece, in un modello dinamico, la variabile tempo assume una notevole importanza poiché lo stato del sistema varia con esso.
- *Modelli deterministici o modelli stocastici*: se nella definizione del modello di simulazione non esistono elementi variabili aleatoriamente, si parla di modello deterministico. In questo caso,

l'output è univocamente e ripetibilmente determinato a parità degli input. Se, invece, nel modello sono presenti uno o più elementi aleatori, allora l'output stesso sarà una funzione di variabile con distribuzione di tipo probabilistico, e lo si dovrà considerare come una stima, entro un certo intervallo di confidenza, della caratteristica reale del sistema.

- *Modelli continui o modelli discreti:* come per i sistemi, anche i modelli, in maniera non necessariamente corrispondente con il sistema che vogliono valutare, si possono suddividere in continui e discreti. Infatti, è importante sottolineare che non necessariamente un sistema continuo deve essere descritto con un modello continuo ed analogamente per un sistema discreto. In realtà la modellazione viene scelta in base agli obiettivi che ci si pongono nell'affrontare il problema (LAW 2000).

Nella simulazione ad eventi discreti, il tempo non scorre in maniera continua, ma salta dall'istante presente a quello in cui accadrà un altro evento. Dopo ogni salto sono eseguite le azioni corrispondenti all'evento programmato, che cambiano lo stato del sistema, mentre tra due eventi consecutivi non avvengono cambiamenti.

Esistono tre differenti approcci alla simulazione ad eventi discreti:

5. *Approccio basato sugli eventi:* il modello consiste in una collezione di eventi che definiscono i cambiamenti dello stato del sistema e attivano la schedulazione degli altri eventi che dipendono da essi. Questo tipo di simulazione, il più semplice, è il maggiormente utilizzato, anche perché implementabile con qualsiasi tipo di linguaggio di programmazione.
5. *Approccio basato sulle attività:* il modello è costituito da un insieme di attività che rappresentano le azioni delle entità del sistema che necessitano di un certo tempo di esecuzione. Ad ogni attività sono

associata una condizione di inizio, delle azioni da eseguire al momento di inizio dell'attività, una durata ed altre azioni di fine attività. Questo approccio è facile da capire, ma poco efficiente in termini di tempi di esecuzione.

5. *Approccio basato sui processi*: il modello è costituito da una serie di processi che rappresentano il ciclo di esistenza e storia delle entità del sistema e sono costituiti da una sequenza di azioni ordinate. Dato che i processi modellano gli oggetti del mondo reale, questo tipo di approccio è facile da capire e trova nei linguaggi di programmazione *object-oriented* la via più naturale per essere implementato.

#### **4.8 Alcuni problemi tipici.**

In letteratura è possibile rintracciare alcuni problemi classici di bilanciamento delle linee, raccolti in gruppi da studiosi e ricercatori, e che vengono impiegati nel tentativo di riuscire a confrontare i diversi algoritmi proposti.

Alcuni data set sono riconducibili a quelli di Sholl (SHOLL 1993).

In molti casi, tuttavia, è necessario modificare, o, ampliare i dati dei problemi, quando si voglia prevedere possibilità di paralleling o mixed-model.

Ciò è si fa facilmente aggiungendo dei casi che, a parità degli altri parametri, abbiano tempo di ciclo più basso (inferiore al tempo di esecuzione di uno o più task, proprio per obbligare la possibilità di utilizzare il paralleling delle postazioni di lavoro).

#### **4.9 Algoritmo Genetico per un problema tipo GALBP-1.**

Per completezza ed esemplificazione, si descrive qui un algoritmo genetico pensato per la risoluzione di problemi GALBP-1 di tipo mixed-model, con tempi di esecuzione dei task non deterministici e paralleling possibile tra le postazioni.

La funzione obiettivo che l'algoritmo ottimizza considera sia i costi di progettazione della linea, sia il bilanciamento dei carichi di lavoro tra le varie postazioni.

Queste opzioni di modellazione lo rendono versatile e adeguato a molti casi reali.

#### **4.9.1 L'algoritmo genetico.**

L'algoritmo genera inizialmente una popolazione di individui che rappresentano soluzioni possibili, successivamente valutate con una funzione di fitness.

Viene poi applicato un algoritmo di selezione che determina le soluzioni superstiti che con la loro genica andranno a far parte della generazione successiva. Il modello è a torneo utilizzato in molti algoritmi genetici (GOLDBERG 1989).

Gli individui superstiti (per scelta la metà della popolazione iniziale) generano i nuovi individui (quindi, le nuove soluzioni possibili) tramite un operatore di cross-over, nel numero adeguato per ricostituire il numero di individui iniziale.

La nuova generazione di individui viene ulteriormente sottoposta ad una possibile mutazione casuale con un operatore di mutazione che agisce con probabilità definita.

Questo processo ricorsivo di valutazione della funzione di fitness e applicazione degli operatori di selezione, cross-over e mutazione continua per un numero di volte definite da una condizione di stop, che può essere il numero di generazioni.

La soluzione rappresentata dall'individuo con la funzione di fitness maggiore viene scelta come la soluzione finale.

#### **4.9.2 Rappresentazione degli individui.**

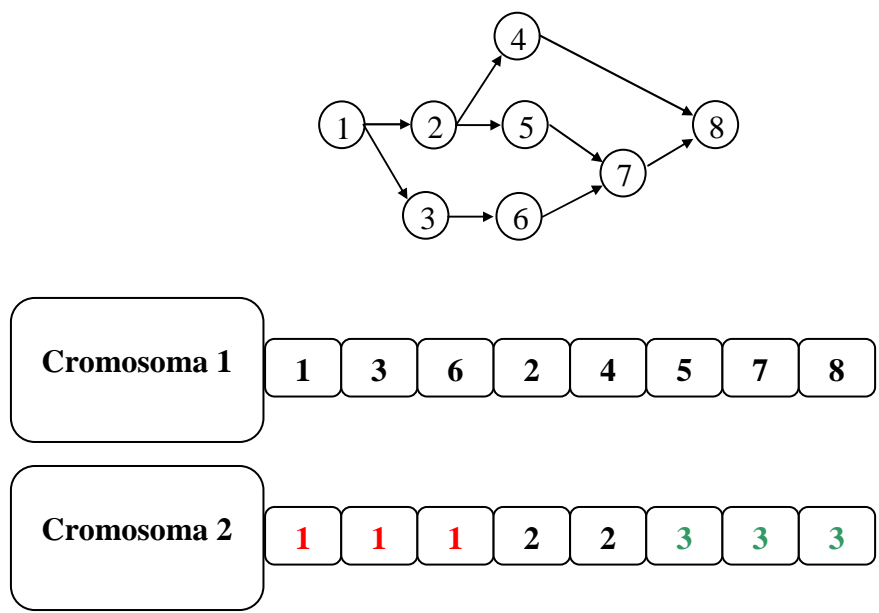
Per rendere possibile la determinazione di soluzioni che permettano postazioni di lavoro parallele è necessario codificare più informazioni di quelle del caso che ciò che non sia.

Pertanto, ogni individuo viene rappresentato attraverso una coppia di cromosomi (MARTINI 2003).

Il primo contiene la sequenza nella quale i task nell'ordine in cui questi sono assegnati alle postazioni di lavoro (*sequence-oriented representation*, LEU 1994).

Il secondo cromosoma, invece, definisce la postazione di assegnazione del task.

Così, entrambi i cromosomi sono vettori di n numeri, con n numero totale dei task (si veda come esempio lo schema in Figura 4.7).



Rappresentano la seguente soluzione:

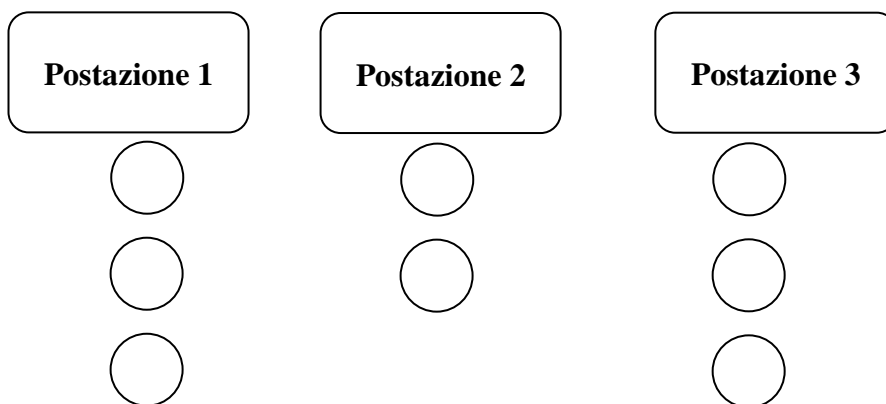


Figura 4.7 – Rappresentazione dei cromosomi.

Il numero di operatori assegnati per postazione di lavoro è ottenuto con un algoritmo di decodifica, che dati i task assegnati alle postazioni e calcola il numero di operatori necessari per ciascuna di queste nel seguente modo.

Ricordando che si sta risolvendo un problema di bilanciamento di una linea mixed-model, si calcola il tempo medio aggregato di esecuzione dei task e la rispettiva varianza aggregata, come precedentemente formalizzate. Tali parametri sono impiegati per il calcolo della probabilità di completamento dei task assegnati alla postazione (MCMULLEN 1997), con un solo operatore, inizialmente. Se tale probabilità risulta inferiore al valore stabilito (ad esempio il 95%) il numero di operatori viene aumentato di uno e il calcolo viene eseguita un'altra volta, fino a quando non si raggiunge la desiderata probabilità di completamento nel tempo di ciclo.

Questo tipo di codifica delle soluzioni, si noti, amplia il concetto di algoritmo genetico, di volontà di emulare quello che accade in natura (selezione degli organismi geneticamente più adattabili alle caratteristiche dell'ambiente in cui vivono). Pertanto, più un organismo è complesso, maggiore saranno le informazioni necessarie per codificarlo (e più elevato sarà il numero caratteristico di cromosomi).

#### **4.9.3 Popolazione iniziale.**

Come accennato prima, bisogna per prima cosa occorre generare una popolazione iniziale di individui.

Le performance dell'algoritmo sono dipendono dal numero di individui, e dai criteri con cui tali individui vengono creati.

L'applicazione del criterio di *randomness* nella generazione degli individui della popolazione porta a migliori soluzioni piuttosto di una popolazione prestabilita (ANDERSON 1994).

Una procedura per il primo cromosoma di ogni individuo è quella presentata da Kim (KIM 1996). Consiste nella generazione casuale di un individuo che rappresenta una soluzione possibile, cioè che rispetti i vincoli di precedenza.

Dalla lista contenente tutti i task che, inizialmente, senza vincoli di precedenza tra loro, se n scelga uno casualmente, e si inserisca al primo posto della sequenza. A questo punto la lista è aggiornata, se l'esecuzione del task assegnato abbia reso possibile l'assegnazione di un altro task, quindi si procede ad un'altra selezione casuale. In questo modo viene generato il primo cromosoma.

Per costruire il secondo cromosoma si assegna il valore uguale a 1 alla prima posizione. Per la posizione seguente si può avere lo stesso valore del precedente o aumentare di 1, con una probabilità definita (ad esempio del 50%).

#### 4.9.4 Funzione di fitness.

La funzione di fitness utilizzata tiene conto degli indici *line efficiency* (*LE*) e la *model variability* (*MV*), che tengono conto di differenti aspetti delle soluzioni. La loro definizione risulta adattata rispetto al caso generale per tener conto della presenza di stazioni di lavoro parallele, per le quali i suddetti parametri perdono di significato.

La Line Efficiency (*LE*), presentata da Driscoll (DRISCOLL 2001), da conto del conseguimento di una buona utilizzazione della linea, in termini diretti di misura della convenienza economica della soluzione, su una scala da 0 a 100. Tuttavia, in caso di paralleling, la *LE* di un layout presenterà un valore affetto da errore, dovuto al non considerare l'extra costo per la presenza di operatori plurimi su stazione, e attrezzature raddoppiate (conseguendo in indici superiori a 100). Pertanto è meglio impiegare un indice  $LE_p$  dato dal rapporto tra le risorse teoricamente necessarie (operatori ed attrezzature) e quelle realmente utilizzate come mostrato di seguito:

$$LE_p = \frac{R_t}{R_r} \cdot 100$$

dove:

$R_r = LC \cdot w_r + EC \cdot e_r$  risorse *reali* utilizzate,

$R_t = LC \cdot w_t + EC \cdot e_t$  risorse *teoriche* necessarie.

In questa formulazione si assume un rapporto definito fra costo annuale dell'operatore e costo per le attrezzature (MCMULLEN 1998), e tale rapporto può essere modificato caso per caso, senza che i risultati presentati perdano di generalità.

La Model Variability (BUKCHIN 1998) misura la variabilità dei tempi di assemblaggio di un certo modello assegnati a differenti postazioni di lavoro. Bukchin mostra come questa variabilità sia uno degli indici con la maggior correlazione tra risultati simulati in una linea di assemblaggio con più modelli. In modo da tenere in considerazione il paralleling, la formulazione originaria è stata modificata nel modo seguente:

$$MV_p = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot \sum_{i=1}^p \left( \frac{t_{ij}}{ct \cdot w_i} - \frac{t_{\bullet j}}{ct \cdot w_{\bullet}} \right)^2$$

Si noti che:

$\frac{t_{ij}}{ct \cdot w_i}$  è l'utilizzazione media per operatore nella postazione  $i$  per il modello  $j$ ,

$\frac{t_{\bullet j}}{ct \cdot w_{\bullet}}$  è l'utilizzazione media per operatore nella linea per il modello  $j$ .

La funzione di fitness viene così definita:

$$Fit = k \cdot LE_p - MV_p$$

Un individuo con un valore di fitness maggiore corrisponde a soluzione migliore (TIACCI 2004).

Inoltre è opportuno osservare che  $MV_p$  è un parametro adimensionale che non necessariamente assume valori in un range tra 0 e 100, come invece accade per  $LE_p$ . Per questo motivo è stato introdotto un fattore  $k$ , che permette di pesare i due indici in un modo più coerente.

#### 4.9.5 Cross-over.

Gli individui sopravvissuti alla selezione generano altri individui, tramite un operatore di cross-over che genera due nuovi individui figli ( $S1$  ed  $S2$ ) da due individui genitori ( $P1$  and  $P2$ ).

Per il primo cromosoma è stato utilizzato un cross-over a punto singolo presentato da Kim (KIM 1996), una cui variazione è stata utilizzata per generare una soluzione compatibile con i vincoli di precedenza senza duplicazioni ne perdite di task.

Con la scelta casuale di un punto di taglio viene scelto casualmente in uno dei genitori ( $P1$ ), e l'aggiunta degli elementi dopo il punto di taglio ereditati nelle stesse posizioni nell'individuo figlio, si ottengono gli individui figlio.

Questi stessi elementi sono sottratti dall'altro genitore ( $P2$ ), significa che tutti i valori numerici corrispondenti agli elementi presenti dopo il taglio nel primo genitore, ad es. "3", sono eliminati nella sequenza in trasformazione del secondo genitore, ed i rimanenti vengono copiati nell'individuo figlio nello stesso ordine in cui appaiono in  $P2$ .

Per ottenere invece, il secondo cromosoma come punto di taglio viene preso lo stesso del primo cromosoma. I valori nelle posizioni precedenti vengono copiati nello stesso ordine e nella stessa posizione nel secondo cromosoma di  $S1$ .

Sia  $d$  la differenza tra l'ultimo valore copiato di  $P1$  e il corrispondente valore di  $P2$ . I valori delle posizioni a destra del punto di taglio del primo cromosoma di  $P2$  sono copiati nelle posizioni a destra del punto di taglio del secondo cromosoma di  $S1$  dopo essere state incrementate di  $d$ . In questo modo è stato generato un nuovo individuo ( $S1$ ) che rappresenta una soluzione possibile e che, sebbene differente dai suoi genitori, possiede quelle caratteristiche che hanno permesso loro di sopravvivere. Il secondo individuo viene generato in modo del tutto analogo, solo invertendo il ruolo di  $P1$  con quello di  $P2$ .

L'esempio in Figura 4.8 mostra il modo in cui i due genitori ( $P1$  e  $P2$ ) generano due figli ( $S1$  e  $S2$ ). Il punto di taglio è stato scelto, ad esempio, tra la quinta e la sesta posizione di ciascun cromosoma.

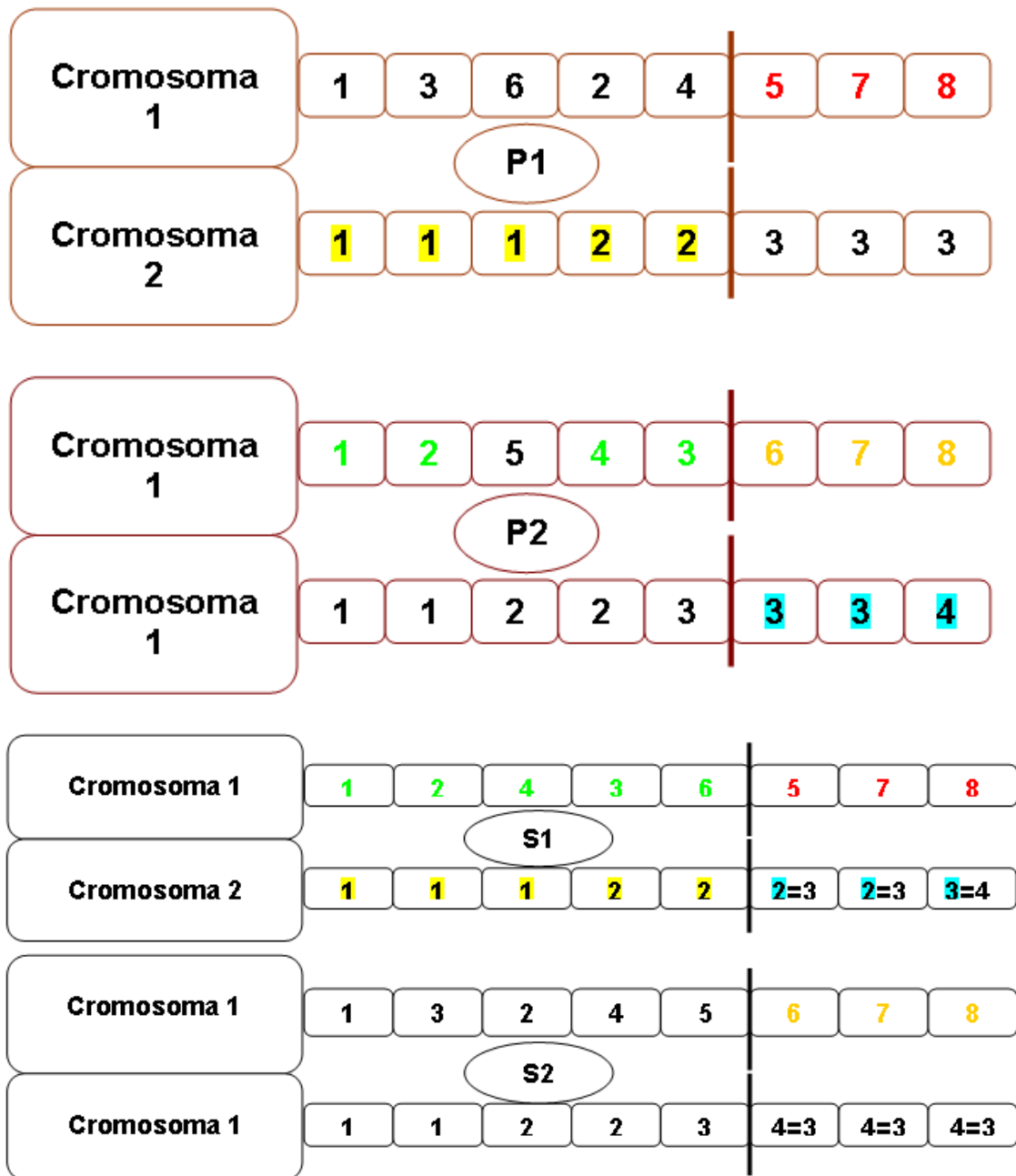


Figura 4.8 – Esempio di cross-over.

#### 4.9.6 Mutazione.

Tutti gli individui di ogni successiva generazione, con un definito tasso di probabilità ( $mr$ , *mutation rate*), possono subire una mutazione. Un valore di questa probabilità può essere del 55%.

Per il *primo cromosoma*, così come per l'operatore di cross-over, si è optato per quello presentato da Kim (KIM 1996). Si sceglie casualmente un task da un individuo, e si determinano tutti i possibili spostamenti di posizione che non violino i vincoli di precedenza: cioè tali che il task segua tutti i suoi immediati predecessori e preceda tutti i suoi immediati successori. Conseguenza che le sue potenziali posizioni possibili siano consecutive, che definiscono una sottostringa del cromosoma. Tra le possibili posizioni, il task viene posizionato in una casualmente.

Il *secondo cromosoma* può venire modificato scegliendo casualmente una posizione.

Detto  $p$  il valore contenuto in questa posizione, e  $l$  il valore della posizione precedente, ovviamente risulterà  $l \leq p$ .

- Se  $l < p$ , allora tutti i valori da  $p$  incluso saranno diminuiti di 1, risultando l'unione delle due postazioni di lavoro.
- Se  $l = p$ , allora tutti i valori da  $p$  incluso in poi vengono aumentati di 1, come se la postazione fosse divisa in due.

Con riferimento al caso mostrato in Figura precedente, si può notare in Figura 4.8, come una mutazione possa modificare un individuo. Supponiamo, ad esempio, che il task 3 del primo cromosoma (in posizione 6) sia stato scelto per la mutazione. Questo task non ha vincoli di precedenza con i task 1, 4, 2, 7, e 5 che sono tutti ad esso adiacenti (in questo caso sono tutti predecessori).

Pertanto sarà possibile inserirlo in qualsiasi posizione tra le prime cinque (in questo esempio, in posizione 2). Nel secondo cromosoma, se la sesta posizione viene scelta per la mutazione, essendo  $2 < 3$ , tutti i valori dalla sesta posizione (inclusa) in poi saranno diminuiti di 1.

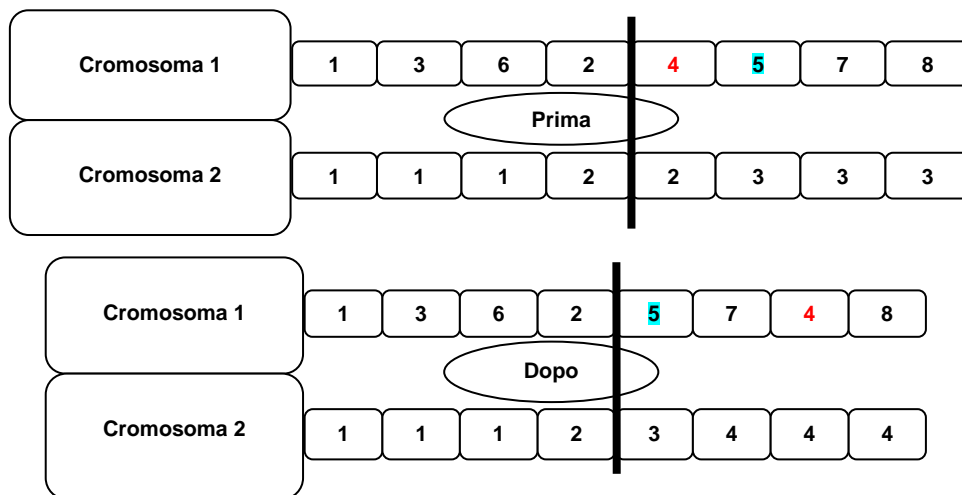


Figura 4.9 – Esempio di mutazione.

#### 4.10 *Tabu search* e *GALBP-1*.

Si presenta anche un esempio di algoritmo *tabu search* che, come il precedente, è adatto per problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio mixed-model con tempi di esecuzione dei task stocastici e possibilità di paralleling delle postazioni di lavoro.

Questo algoritmo prende le mosse da uno precedente con implementazione di opzioni di modellazione.

##### 4.10.1 Il *tabu search* (TS).

Il *tabu search* (TS) è un procedimento euristico per risolvere problemi di ottimizzazione combinatoriale fondato su un insieme di regole, si spera intelligenti che, quindi, consentano l'esplorazione non esaustiva, non totale, dello spazio delle soluzioni di un dato problema.

Risale alla fine degli anni '60, inizio anni '70, presentata nella sua forma attuale nel 1989 da Glover (GLOVER 1989 e GLOVER 1989/2) come tecnica per superare l'intrappolamento in soluzioni di ottimo locale.

Si è affermata come stabile tecnica di ottimizzazione diffusa in molti campi.

Si parte da una soluzione selezionata casualmente o dalla soluzione di un'altra euristica e cerca nelle sue immediate vicinanze una nuova soluzione che migliori la precedente.

L'idea fondante è di proibire iterazioni in determinate direzioni di ricerca per evitare la ciclizzazione e uscire dai punti di ottimo locale. Un punto cruciale è l'integrazione di funzionalità di memoria flessibile (a breve e/o lungo termine) nella procedura di ricerca della soluzione per evitare movimenti che ripristinino le soluzioni precedenti. A tale scopo una "*tabu list*", la lista di mosse proibite (da qui la parola "tabu"), è aggiornata e definita ad ogni iterazione.

Questa è una caratteristica distintiva rispetto ad algoritmi genetici ed al *simulated annealing* che si affidano ad una ricerca di tipo probabilistico-casuale, mentre la TS ha il vantaggio di tener conto della storia del processo di ricerca e di poterla inglobare nel processo stesso.

#### **4.10.2 I tabu.**

L'idea su cui poggia la *tabu search* è di provare a migliorare ripetutamente la soluzione sotto regole guida per ottenere delle buone soluzioni in spazi di soluzione complessi.

A partire da una soluzione calcolata, o casualmente o ereditata da altra metodica, detta soluzione iniziale  $s$ , si valutano le soluzioni vicine, cioè ottenibili con piccoli cambi della configurazione della linea, come, ad esempio lo spostamento di un task da stazione a stazione; tra queste l'algoritmo determina la soluzione migliore  $s'$ . Soluzione a migliorare fino a raggiungere una condizione che stabilisce il termine dell'iterazione.

Senza introduzione di regole di inibizione facilmente si incorrerà in una soluzione di ottimo locale. Pertanto, il TS introduce una struttura di memoria che inibisce o sfavorisce mosse che ricondurrebbero ad una soluzione ottenuta recentemente.

La configurazione della struttura di memoria è relevantissima. Questa è definita con una matrice di interi (detta *matrice dei tabu*) avente tante righe quanti sono i task del problema da risolvere e tante colonne quante sono le

stazioni di lavoro presenti nella soluzione iniziale. Il valore di ogni suo elemento indica che lo spostamento di un certo task in una data stazione può avvenire solo a partire da una definita iterazione.

La matrice dei tabu viene quindi utilizzata per stabilire se una mossa, da una determinata soluzione ad una soluzione vicina, è permessa. Se, per esempio, la matrice ha valore 0 in corrispondenza del task  $i$  nella stazione  $j$ , allora il task  $i$  è libero di spostarsi dalla sua stazione attuale alla stazione  $j$ . Supponiamo ora che tale valore sia pari a 6, ciò significa che il task  $i$  non si potrà spostare nella stazione  $j$  fino al termine dell'iterazione 6.

Dopo lo spostamento del task, alla riga  $i$  e colonna  $j$  della matrice dei tabù verrà assegnato il valore del numero dell'iterazione corrente più la costante chiamata *tabu size*; ciò significa che al task mosso sarà proibito tornare indietro alla stazione precedente per un numero di iterazioni pari a tale costante.

Si supponga di trattare un problema di 6 task, i quali nella soluzione iniziale siano distribuiti in tre stazioni di lavoro (Figura 4.10).

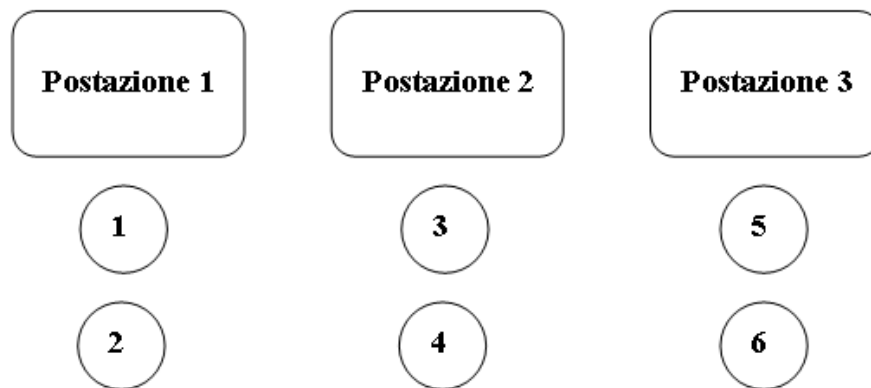


Figura 4.10 – Soluzione iniziale.

Si ipotizzi di avere i valori della matrice dei tabù inizializzati a 0. Sia la costante tabu size pari a 3. Si supponga che nell'iterazione 1 si decida, in maniera casuale, di spostare il task 2 dalla stazione 1 alla stazione 2 (Figura 4.11).

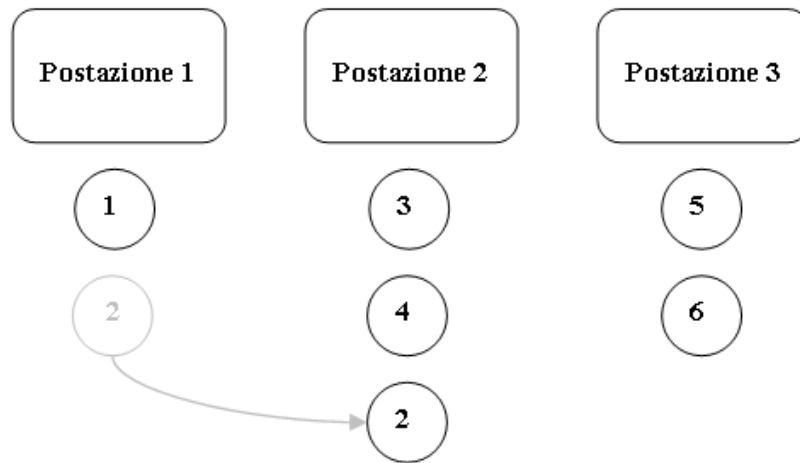


Figura 4.11 – Spostamento.

Nella matrice dei tabù verrà quindi assegnato pari a 4 (iterazione corrente + tabu size) il valore relativo al task 2 per la stazione 1 (Figura 4.12).

Task	Postazioni di lavoro		
	1	2	3
1	0	0	0
2	4	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Figura 4.12 – Matrice dei tabu.

Ora si supponga che nell'iterazione 2 si decida di scambiare il task 1 della stazione 1 con il task 2 della stazione 2 per stabilire se tale soluzione è migliore della precedente (Figura 4.12).

Dalla matrice dei tabù è possibile vedere che il valore della casella (1, 2) è 0, quindi è possibile muovere il task 1 nella stazione 2, ma il valore della casella (2, 1) è 4, ciò significa che il task 2 non può spostarsi nella stazione 1 se non dopo l'iterazione 4 (cioè dalla 5 in poi). In questa situazione lo scambio dei task non si verifica. Viene quindi proposta una mossa alternativa. La ricerca di soluzioni vicine continua fino a quando la soluzione

proposta non rispetta la matrice dei tabù, solo allora l'iterazione 2 può dichiararsi conclusa.

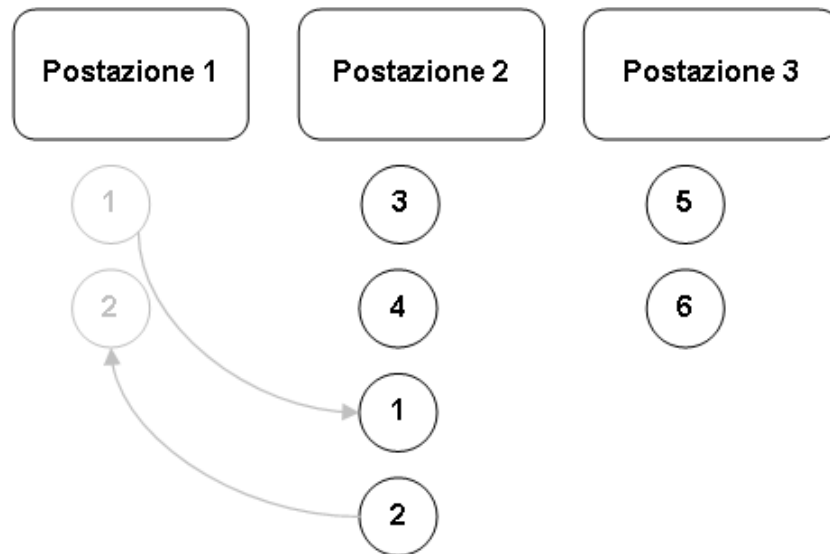


Figura 4.13 – Scambio (non possibile).

### 4.10.3 Criterio di aspirazione.

Per correggere ulteriormente l'algoritmo ed evitare di perdere soluzioni ottimali, si integra il criterio di aspirazione.

Infatti, nel caso che ad una determinata iterazione in prima istanza cerchi di muovere un certo task in una stazione tabù, la quale però risulti condurre alla soluzione migliore trovata sino allora. Per evitare di "saltare" questa opportunità, attenendosi alla procedura tabu search come fin ora presentata, si potrebbe in teoria perdere una soluzione ottimale, si aggiunge una regola chiamata criterio di aspirazione.

Dunque, secondo il criterio di aspirazione, se una mossa può condurre ad una soluzione che non si vuole rischiare di perdere, avente il più alto valore trovato della funzione obiettivo, essa viene accettata pur essendo proibita dalla matrice dei tabù.

Per l'esempio precedente, lo scambio dei task 1 e 2 potrebbe quindi avvenire in base al criterio di aspirazione. La soluzione ottenuta e la matrice dei tabù si presenterebbero come nelle seguenti Figure 4.14 e 4.15

(iterazione 2, + tabu size pari a 3 = 5, sia in posizione “1,2”, sia in posizione “2,2”).

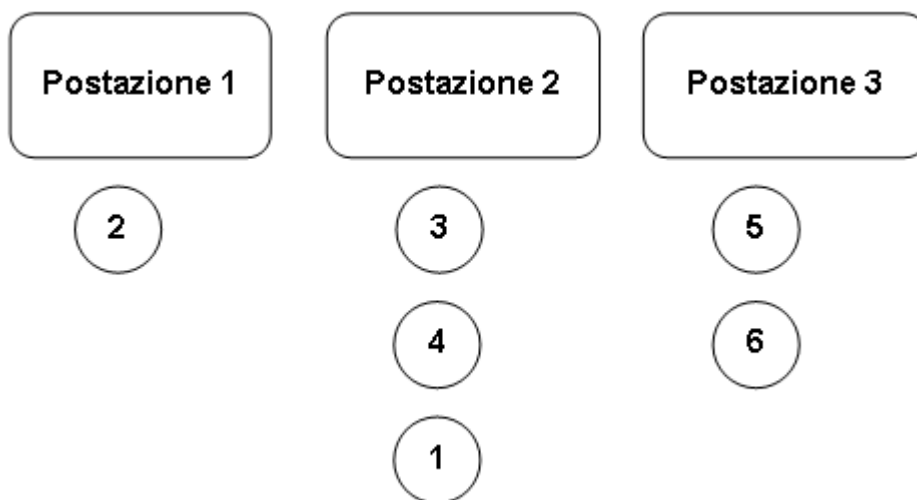


Figura 4.14 – Scambio (criterio di aspirazione).

Task	Postazioni di lavoro		
	1	2	3
1	5	0	0
2	4	5	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Figura 4.15 – Matrice dei tabù dopo lo scambio.

Il criterio di aspirazione è una regola che permette ad una mossa di violare temporaneamente lo stato di tabù e rende la qualità della soluzione meno dipendente dalla costante tabu size.

#### 4.10.4 Tabu size.

Il *tabu size* (TSZ) determina il tenore dello stato di tabù. Quindi se ad esempio il tabu size è pari a 3, allora dopo lo spostamento di un task da una stazione di lavoro ad un'altra, non potrà tornare indietro alla stazione di

origine prima che si compiano altre 3 iterazioni. È ovvio porsi il problema di definire un criterio di determinazione di tale costante.

In linea di tendenza, con valori di tabu size bassi si aumenta la probabilità che la soluzione venga intrappolata in un minimo locale, se tale valore è alto si rischia di eliminare molte opportunità di trovare una soluzione migliore (ed entra, come tampone, il criterio di aspirazione).

Il valore di tabu size deve essere commisurato anche alla dimensione del problema da analizzare, poiché un tabu size pari a 4 non agisce allo stesso modo in un problema con 12 task e in un problema con 100 task, dove l'effetto di inibizione di tale costante non si percepirebbe quasi per nulla. Perciò si utilizzano valori del tabu size proporzionali alla grandezza del problema da affrontare:

$$TSZ = k \cdot n$$

con  $n$  numero totale dei task e  $k$  costante arbitraria intera.

#### **4.10.5 Come realizzare un controllo sulle iterazioni peggiorative.**

Il paralleling potrebbe attribuire un'eccessiva ampiezza allo spazio delle soluzioni possibili. Risulta che, la casualità con cui il tabu search, nel corso dell'iterazione, modifica la soluzione corrente, affetta parimenti il valore della funzione obiettivo rischiando di muoversi verso valori peggiori (o maggiori) rispetto alla soluzione iniziale. Per ovviare a questo problema si è limitato il numero di iterazioni eseguibili verso valori della funzione obiettivo maggiori rispetto al valore migliore trovato fino a quel punto.

Quindi se, dopo aver trovato una buona soluzione, l'algoritmo esegue iterazioni successive (*PIM, Pejorative Iteration Maximum number*) che danno luogo a soluzioni aventi valori della funzione obiettivo maggiori di quello ottenuto con tale soluzione, essa viene ripristinata, inclusi i relativi tabu, ed il processo di ricerca viene ripreso da quel punto. In questo modo si riesce a legare in modo maggiore la ricerca casuale alla funzione obiettivo.

#### **4.10.6 Come si ottiene la soluzione iniziale.**

Come già detto, bisogna avere una soluzione iniziale da cui partire, qualunque purché fattibile: scelta in maniera casuale, o che derivi da un'altra euristica.

Questa ultima scelta, In molti casi, permette di ottenere un risultato migliore.

Di seguito una un'euristica composta da due regole:

1. Scegliere per primi i task con il maggior numero di successori;
2. Regola secondaria: scegliere il task con il maggior tempo di completamento.

Per numero di successori si intende il numero di task presenti nel percorso più lungo (nel diagramma dei vincoli di precedenza) a partire dal task preso in esame.

La regola secondaria viene usata quando sorge una situazione di pareggio.

Il funzionamento di questa euristica si può schematizzare nei seguenti due punti che si ripetono in sequenza:

- Scegli il task successivo in base alla prima regola fino a quando non sono stati assegnati tutti i task. Usa la seconda regola nelle situazioni di pareggio.
- Assegna il task scelto alla stazione corrente se c'è ancora spazio (cioè se il tempo totale utilizzato dalla stazione è minore del tempo di ciclo), altrimenti assegnalo ad una nuova stazione.

#### **4.10.7 Funzione obiettivo.**

Il processo di ricerca TS tenta di migliorare la soluzione iniziale, guidato da una funzione obiettivo che cerca di stabilire se una mossa è più o meno conveniente.

L'algoritmo originale ha come funzione obiettivo la  $F = \max \sum_{i=1}^p (t_j)^2$  e

implementa la strategia del *task aggregation*, che è stata corretta in modo da poter tenere conto delle diverse opzioni di modellazione:

- *Paralleling*: in questo caso la funzione obiettivo è stata cambiata per poter avere soluzioni con paralleling. Infatti, a causa di questa funzionalità, non è possibile determinare il tempo totale di completamento di una stazione senza conoscere a priori il numero di operatori assegnati ad essa. Si è sostituita la funzione obiettivo con una che minimizza il design cost (somma di costo di manodopera e costo delle attrezzature). Definendo *LC* il costo orario dell'operatore e *EC* costo orario per l'utilizzo della singola attrezzatura (supponendo identico), la funzione obiettivo si presenta come segue:

$$\min \left( LC \sum_{i=1}^p w_i + EC \sum_{i=1}^p (n_i \cdot w_i) \right),$$

dove  $w_i$  è il numero di operatori presenti nella stazione  $i$ .

- *Tempi di completamento stocastici*: volendo tener conto della variabilità dei tempi di completamento dei task si può far ricorso alla relazione:

$$t_{eq} = \sum_j t_j' + u \sqrt{\sum_j \sigma_j^2} + t_{eq},$$

questa è utilizzata per definire il numero di operatori che è possibile assegnare ad una stazione. Il numero di operatori assegnati alla generica stazione  $i$  è dato dal numero intero superiore a:

$$w_i = \frac{t_{eq,i}}{CT}.$$

- *Mixed model*: in questo algoritmo si è tenuto conto della produzione di modelli diversi riconducendo il problema ad un *single model* ALBP.

**4.10.8 Controllo di fattibilità di una soluzione.**

L'algoritmo, ad ogni step, verifica la fattibilità della soluzione corrente. Considerando diagramma dei vincoli di precedenza già presentato:

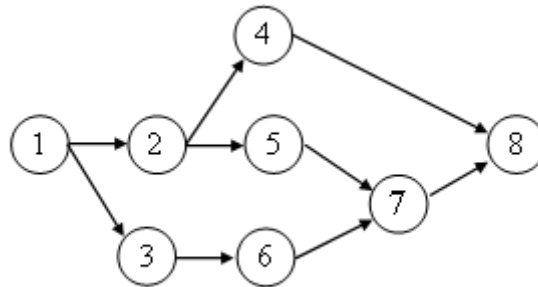


Figura 4.16 – Esempio di diagramma tecnologico.

Una soluzione non fattibile può avere le prime due stazioni di lavoro strutturate come in figura :

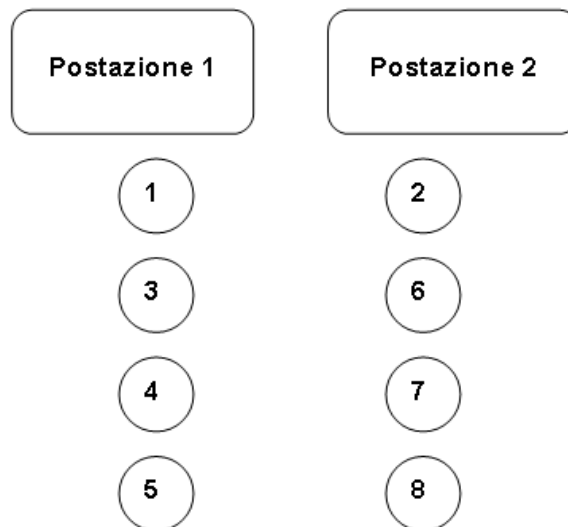


Figura 4.17 – Esempio di soluzione non fattibile.

Il diagramma mostra che è necessario eseguire i task 1, 2 e 4 in questo ordine. La soluzione proposta, invece, presenta il task 2 assegnato alla postazione 2, e il 3 alla 1, in maniera palesemente non fattibile.

Per verificare la fattibilità di una soluzione, l'algoritmo controlla, per tutte le coppie di task (X, Y) di una data stazione, se esiste un task Z tale che nel diagramma esista un percorso da X a Z e un percorso da Z a Y, essendo Z

un task non assegnato a tale stazione. Se il task Z esiste, esprime la violazione delle regole di precedenza, e pertanto dichiara che la soluzione non è fattibile.

#### **4.10.9 Memoria a breve e a lungo termine.**

Il tabu search può essere migliorato utilizzando ancora ulteriori regole aggiuntive. Si è già parlato della memoria flessibile di breve termine espressa nei tabù, per evitare l'intrappolamento in un ottimo locale.

È possibile, però, usufruire di una memoria a lungo termine per ottenere la ricerca di nuove soluzioni migliori.

Se si osserva che le buone soluzioni trovate fino ad un dato punto hanno qualche caratteristica in comune, tale osservazione può essere utilizzata per condizionare l'algoritmo alla ricerca delle soluzioni vicine con caratteristiche simili. Questo metodo ulteriore sovrapposto alle altre regole della ricerca è conosciuto come *criterio di intensificazione*. Esso può essere utilizzato per incoraggiare le nuove soluzioni a soddisfare tali caratteristiche e scoraggiare quelle che non le soddisfano.

Ancora, a quest'ultimo criterio può essere necessario affiancare il *criterio di diversificazione*, ad esso complementare, per permettere una ricerca delle soluzioni più efficace. In maniera inversa, il criterio di diversificazione mira a respingere dalla soluzione le caratteristiche indesiderate, con l'introduzione di una funzione di penalità che si affianca alla funzione obiettivo nei casi in cui la mossa presa in esame non è in grado di migliorare la soluzione.

Si può decidere ancora di variare il numero dei task mossi in un'iterazione. Si è verificato che, aumentando tale numero, diminuisce il numero di iterazioni necessarie per ottenere una buona soluzione; d'altra parte il tempo di calcolo cresce esponenzialmente.

#### **4.10.10 Simulazione e funzione obiettivo.**

Per la valutazione delle performance dell'algoritmo TS, si può utilizzare la simulazione considerando che i sistemi industriali sono sistemi dinamici, e sarebbe sicuramente difficile se non impossibile valutarne i valori dei

parametri caratteristici e rilevanti, così come delle criticità senza strumenti dinamici quali la simulazione (MARTINI 2004).

Un possibile modello potrebbe simulare una linea di assemblaggio, senza buffer interoperazionali tra postazioni, tale da far ripercuotere ogni ritardo di una singola stazione sulle altre.

Come output di una singola simulazione si potrebbe valutare il throughput (*TP*), cioè il tempo medio che intercorre tra il completamento di due prodotti consecutivi, indicativo della produttività generale, e l'utilizzazione effettiva (*Util*), vale a dire il rapporto tra il tempo in cui un operatore è occupato e il tempo totale disponibile. Se ad ogni iterazione dell'algoritmo si produce una soluzione di layout e si testa in simulazione, si può calcolare valore medio di *TP* e *Util*, e una funzione obiettivo (da massimizzare) come media pesata tra il costo di progetto e questi due output.

In questo breve capitolo si è voluto fare una panoramica generale sulla tematica inerente l'utilizzo degli algoritmi nel problema di bilanciamento delle linee di assemblaggio.

Partendo dal tipo di alternative possibili nella scelta della configurazione della linea, agli algoritmi utilizzati per il suo bilanciamento, sino ai parametri per la valutazione della bontà delle scelte effettuate sia dal punto di vista analitico che pratico.

Numerosi sono gli aspetti che caratterizzano e vincolano il problema del bilanciamento di linee di assemblaggio, in molti casi bisogna poi fare i conti con la realtà di una sequenza di lavorazioni effettuate comunque dall'uomo, con tutto ciò che ne può comportare; tuttavia l'approccio analitico, che si è descritto in questo lavoro, risulta essere una valida guida nella risoluzione di tali problematiche.

## Bibliografia

- AGNETIS 1995, A. AGNETIS, A. CIANCIMINO, M. LUCERTINI, M. PIZZICHELLA, 1995, "Balancing flexible lines for car components assembly.", *International Journal of Production Research*, 33, 333-350.
- AGRAWAL 1985, P.K. AGRAWAL, 1985, "The related activity concept in assembly line balancing.", *International Journal of Production Research*, 23, 403-421.
- ALEXOUDA 2001, G. ALEXOUDA, K. PAPARRIZOS, 2001, "A genetic algorithm approach to the product line design problem using the seller's return criterion: An extensive comparative computational study.", *European Journal of Operational Research*, 134, 165-178.
- AMEN 2001, M. AMEN, 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.
- ANDERSON 1994, E.J.ANDERSON, M.C.FERRIS, 1994, "Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assembly line balancing problem.", *ORSA Journal on Computing*, no. 6, 161-173.
- ARCUS 1966, A.L. ARCUS, 1966, "COMSOAL: a computer method of sequencing operation for assembly lines.", *International Journal of Production Research*, 4, 259- 277.
- ASKIN 1997, R.G. ASKIN, M. ZHOU, 1997. "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem.", *International Journal of Production Research*, 35, 3095-3105.
- BARTHOLDI 1993, J.J. BARTHOLDI, 1993, "Balancing two-sided assembly line: a case study.", *International Journal of Production Research*, 31, 2447-2461.
- BECKER 2003, C. BECKER, A. SCHOLL, 2003. "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing.", *Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft*, 21/03, FSU Jena.
- BOUCHER 1987, T.O. BOUCHER, 1987, "Choice of assembly line design under task learning.", *International Journal of Production Research*, 25, 513-524.
- BOWMAN 1960, E.H.BOWMAN, 1960, "Assembly line balancing by linear programming.", *Operational Research*, 8, 386-389.
- BRUZZONE 2002, A.BRUZZONE, S. SAETTA, 2002, "LESNEX: LEan Simulation Network of Excellence.", HMS2002 and MAS2002 International workshops, (Bergeggi, SV, Italy, October 3-5).
- BUKCHIN 1998, J. BUKCHIN, 1998, "A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment.", *International Journal of Production Research*, 36, 2669-2685.
- BUKCHIN 2000, J. BUKCHIN, M. TZUR, 2000, "Design of flexible assembly line to minimize equipment cost.", *IIE Transactions*, 32, 585-598.

- BUXEY 1976, G.M. BUXEY, D. SADJADI, 1976, "Simulation studies of conveyor-paced assembly lines with buffer capacity.", *International Journal of Production Research* 14, 607 - 624.
- CARTER 1984, J.C. CARTER, F.N. SILVERMAN, 1984, "A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs.", *Journal of Operational Management*, 4, 145-157.
- CHAKRAVARTY 1998, A.K. CHAKRAVARTY, 1988, "Line balancing with task learning effects.", *IIE Transactions* 20, 186-193.
- CHIANG 1998, W.C. CHIANG, 1998, "The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research.*", 77, 209- 227.
- CHEN 2002, R.S. CHEN, K.Y. LU, S.C. YU, 2002, "A hybrid genetic algorithm approach on multi-objective of assembly planning problem.", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15, 447-457.
- DECKRO 1989, R.F. DECKRO, 1989, "Balancing cycle time and workstations.", *IIE Transactions*, 21, 106-111.
- DOMINICI 2004, P. DOMINICI, A. MARTINI, L. TIACCI, S. SAETTA, 2004 "Development of a tabu search algorithm for the assembly line balancing problem", *Summer Computer Simulation Conference*, 25-29 luglio 2004, San José, California, USA.
- DRISCOLL 1985, J. DRISCOLL, A.A.A. ABDEL-SHAFI, 1985, "A simulation approach to evaluating assembly line balancing solution.", *International Journal of Production Research*, 23, 975-985.
- DRISCOLL 2001, J.DRISCOLL, D.THILAKAWARDANA, 2001, "The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality.", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17, 81-86.
- FLESZAR 2003, K. FLESZAR, K.S. HINDI, 2003, "An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem.", *European Journal of Operational Research*, 145, 606–620.
- GAITHER 1996, N. GAITHER, 1996, *Production and Operations Management*, 7th ed. Duxbury Press, Boston, MA.
- GLOVER 1989, F. GLOVER, 1989, "Tabu search, Part I", *ORSA Journal on Computing*, 1, 190-206.
- GLOVER 1989/2, F. GLOVER, 1989, "Tabu search, Part II", *ORSA Journal on Computing*, 2, 4-32.
- GOLDBERG 1989, D.E. GOLDBERG, B. CORB, K. DEB, 1989, "Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results.", *Complex Systems 3. Complex Systems Publications, Inc.*, pp. 493-530.
- GONCALVES 2002, J.F. GONCALVES, J.R. DE ALMEIDA, 2002, "A Hybrid Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing", *Journal of Heuristics*, 8, 629–642.

- GRABAU 1997, M.R. GRABAU, R.A. MAURER, D.P. OTT, 1997, "Using simulation to generate the data to balance an assembly line.", *Proceeding of the 1997 Winter Simulation Conference, WSC '97, (Atlanta, GA, December 7-10)*, 733-738.
- HELGESON 1961, W.B. HELGESON, D.P. BIRNIE, 1961, "Assembly line balancing using the ranked positional weight technique.", *Journal of Industrial Engineering*, 12, 394-398.
- HELSGAUN 2004, K. HELSGAUN, "Discrete event simulation in Java.", Department of Computer Science, Roskilde University, Denmark.
- IGNAL 1965, E.J. IGNAL, 1965, "A review of assembly line balancing.", *Journal of Industrial Engineering*, 16, 244-254.
- ISKANDER 1990, W.H. ISKANDER, J. CHOU, 1990, "Unbalanced production line scheduling with partial job specialization.", *Naval Research Logistics*, 37, 789-805.
- JIN 2002, M. JIN, S.D. WU, 2002, "A new heuristic method for mixed model assembly line balancing problem.", *Computers and Industrial Engineering*, 44, 159-169.
- KILBRIDGE 1961, M. KILBRIDGE, L.WESTER, 1961, "The balance delay problem.", *Management Science*, 8, 69-84.
- KIM 1996, Y. K. KIM, Y. J. KIM, Y. KIM, 1996, "Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives.", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 30, no. 3, 397-409.
- KIM 1997, Y. K. KIM, Y. J. KIM, Y. CHO, 1997, "A heuristic-based genetic algorithm for workload smoothing in assembly line.", *Computers Operational Research*, 25, 2, 99-111.
- KIM 2000, Y. K. KIM, Y. J. KIM, 2000, "A Coevolutionary Algorithm for Balancing and Sequencing in Mixed Model Assembly Lines.", *Applied Intelligence* 13, 247– 258.
- KLEIN 1963, M. KLEIN, 1963, "On assembly line balancing.", *Operational Research*, 11, 274-281.
- KOTTAS 1981, J.F. KOTTAS, H.S. LAU, 1981, "A stochastic line balancing procedure.", *International Journal of Production Research*, vol. 19, no. 2, 177-193.
- LAW 2000, A.M. LAW, W.D. KELTON, 2000, *Simulation Modeling and Analysis*, third edition, McGraw-Hill.
- LEE 2001, T.O. LEE, Y. KIM, Y.K. KIM, 2001, "Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness.", *Computers and Industrial Engineering*, 40, 273-292.
- LEU 1994, Y. LEU, L.A. MATHESON, L.P. REES, 1994, "Assembling line balancing using genetic algorithms.", *Decision Sciences*, 25(4), 581-606.
- LI 2001, J.R. LI, P. KHOO, S.B. TOR, 2001, "A Tabu-enhanced genetic algorithm approach for assembly process planning.", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 198-207, 2003.
- LYU 1997, J.J. LYU, 1997, "A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems.", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 16, no. 3, 204-210.

- MARTINI 2003, A. MARTINI, 2003, "Simulazione snella nella piccola e media impresa: un metodo per la riduzione della raccolta dati ed il supporto alle decisioni nel problema del bilanciamento della linea di assemblaggio.", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Perugia.
- MARTINI 2004, A. MARTINI, S. SAETTA, L. TIACCI, 2004, "Using simulation to calculate effective objective functions of metaheuristics applied to industrial problems", Summer Computer Simulation Conference, 25-29 luglio 2004, San José, California, USA.
- MCMULLEN 1997, P.R. MCMULLEN, G.V. FRAZIER, 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 1998, P.R. MCMULLEN, G.V. FRAZIER, 1998, "Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations.", *International Journal of Production Research*, vol. 36, no. 10, 2717-2741.
- MCMULLEN 2000, P.R. MCMULLEN, G.V. FRAZIER, 2000, "A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line.", *IIE Transactions*, 32, 679-686.
- MCMULLEN 2003, P.R. MCMULLEN, P. TARASEWICH, 2003, "Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem", *IIE Transactions* 35, 605- 617.
- MILTENBURG 1998, J. MILTENBURG, 1998, "Balancing U-lines in a multiple U-line facility.", *European Journal of Operational Research*, 109, 1-23.
- MONDEN 1998, Y. MONDEN, 1998, "Toyota production system - An integrated approach to just-in-time.", 3rd ed., Kluwer, Dordrecht.
- MOODIE 1965, C.L. MOODIE, H.H. YOUNG, 1965, "A heuristic method of assembly line balancing for assumption of constant or variable work element time.", *Journal of Industrial Engineering*, 16, 23-29.
- NKASU 1995, M.M. NKASU, K.H. LEUNG, 1995, "A stochastic approach to assembly line balancing.", *International Journal of Production Research*, 33, 975-991.
- PATTERSON 1975, J.H. PATTERSON, J.J. ALBRACHT, 1975, "Assembly line balancing zero-one programming with Fibonacci search.", *Operational Research*, 23, 166-172.
- PETERSON 1993, C.PETERSON, 1993, "A tabu search procedure for the simple assembly line balancing problem.", *Proceedings of the Decision Sciences Institute Conference*, (Washington, DC), 1502-1504.
- PINTO 1975, P.A. PINTO, 1975, "Assembly line balancing with paralleling.", *Doctoral Dissertation*, University of North Carolina at Chapel Hill.
- REKIEK 2001, B. REKIEK, P. DE LIT, F. PELLICHERO, T. L'EGLISE, P. FOUA, E. FALKENAUER, A. DELCHAMBRE, 2001, "A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line balancing.", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12, 247-485.
- SAETTA 2004, S. SAETTA, A. MARTINI, L. TIACCI, 2004, "Line Balancing and Inventory Control Techniques for the Lean Production: Measurements and Optimization of the

Production System”, Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, 16-8 settembre 2004, Rio de Janeiro, Brasile.

SALVESON 1955, M.E. SALVESON, 1955, “The assembly line balancing problem.”, The Journal of Industrial Engineering, 6, 18-25.

SARIN 1999, S.C. SARIN, E. EREL, E.M. DAR-EL, 1999, “A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem.”, Omega: International Journal of Production Economics, 27, 525-535.

SHOLL 1993, A. SHOLL, 1993, “Dataset of Sholl 1993”, [www.assemblylinebalancing.de](http://www.assemblylinebalancing.de).

SHOLL 1996, A. SHOLL, S. VOß, 1996, “Simple Assembly Line Balancing — Heuristic Approaches.”, Journal of Heuristics, 2, 217–244.

SHOLL 1999, A.SHOLL, R. KLEIN, 1999, “Balancing assembly lines effectively – A computational comparison.”, European Journal of Operational Research, 114, 50-58.

SCHOLL 1999/2, A. SHOLL, 1999, “Balancing and sequencing assembly lines.”, 2<sup>nd</sup> edition, Physica, Heidelberg.

SHOLL 2003, A. SHOLL, C. BECKER, 2003, “State-of-the-art exact and heuristic solution procedure for simply assembly line balancing problem.”, Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft 20/03, FSU Jena.

SILVERMAN 1986, F.N. SILVERMAN, J.C. CARTER, 1986, “A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages.”, Management Science, 32 (4), 455-463.

SURESH 1994, G. SURESH, S. SAHU, 1994, “Stochastic assembly line balancing using simulated annealing.”, International Journal of Production Research, vol. 32, no. 8, 1801-1810.

THOMOPOULOS 1970, N.T. THOMOPOULOS, 1970, “Mixed model line balancing with smoothed station assignments”, Management Science, 16, 593-603.

A. MARTINI, 2007. “*Algoritmi per il problema generalizzato di bilanciamento delle linee di assemblaggio*”. Tesi Dottorato di Ricerca. Università degli Studi di Perugia.

## 5 LA SIMULAZIONE.

### 5.1 I metodi di simulazione.

Un peso rilevante in questo lavoro lo svolgerà la simulazione ad eventi discreti.

Essa è stata utilizzata sia per realizzare gli algoritmi di schedulazione per il problema in oggetto, sia per verificare la bontà delle soluzioni, per ottenere degli output che fossero più significativi nel confronto delle soluzioni, rispetto a quelli che si possono determinare senza l'ausilio della simulazione.

Si utilizzerà la simulazione anche per calcolare funzioni obiettivo complesse, ma cercando di realizzare tempi di elaborazione del calcolatore contenuti.

La simulazione può essere impiegata sia per sistemi discreti che continui, tuttavia la prima tipologia di sistemi è più adatta alla modellazione di sistemi di produzione. I metodi di simulazione per tali sistemi sono numerosi e possono essere classificati come mostrato in Figura 5.1 (Guizzi 150).

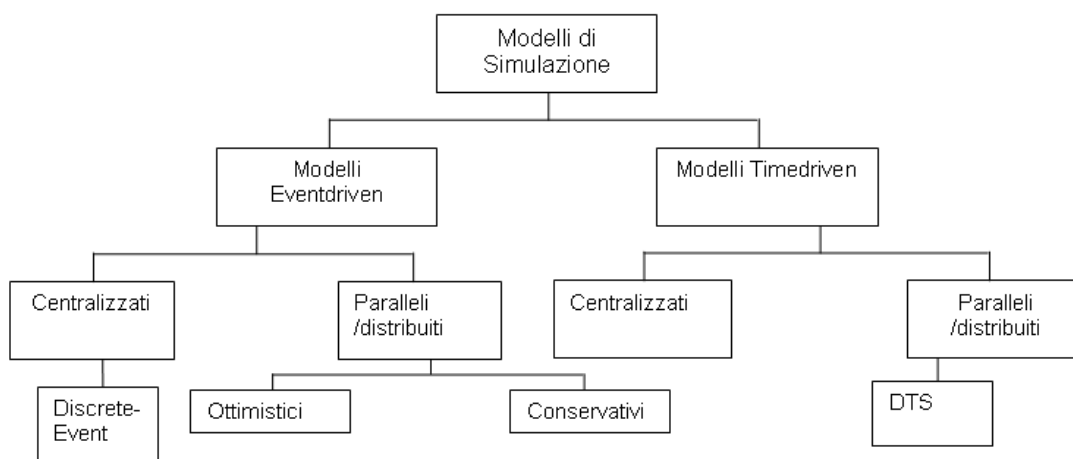


Figura 5.1 – Classificazione dei metodi di simulazione.

Le simulazioni Event-driven vedono evolvere il sistema in base all'accadimento di determinati eventi, e l'avanzamento del timing della simulazione è discontinuo.

Nel caso time driven la schedulazione degli eventi è definita sugli istanti di tempo, ed il timing di simulazione aumenta con un tasso costante. I sistemi di produzione possono essere realizzati impiegando entrambi gli approcci.

Nel primo caso, si segue il path di istruzioni dovuto dalle entità circolanti, mentre nel secondo si osserva il sistema a diversi istanti di tempo.

In ogni caso, ad ogni osservazione lo stato di tutti i componenti del modello si modifica.

In generale, i software commerciali sono focalizzati sulla Discrete-Event Simulation (DES), e molti approcci sono basati su questo.

Ma esistono numerose applicazioni recenti sviluppate impiegando la Distributed Discrete-Event Simulation, che scompone problemi complessi su più processori e agli approcci di tipo time driven centralizzati e distribuiti.

## **5.2 I modelli di simulazione come strumento di supporto decisionale.**

Per lungo tempo la simulazione di sistemi di produzione e logistici è stata ampiamente analizzata in relazione a problemi strategici e tattici, soprattutto per analizzare e prevedere le cause di eventuali disastri nel sistema di produzione o per testare nuovi progetti di sistema senza grossi oneri di investimento (guizzi 90).

A partire dagli anni '80 software commerciali di simulazione sono stati sviluppati e impiegati maggiormente dalle imprese più grandi e strutturate, soprattutto come strumento di supporto tattico strategico.

Uno sviluppo molto interessante della simulazione è quello della *simulazione operativa* come supporto a planning e control di breve termine per sistemi di produzione e logistici, con la realizzazione di modelli di simulazione estremamente dettagliati e aggiornati quanto più possibile in real time al sistema reale.

Grazie a questo tipo di modelli e all'integrazione ai sistemi informativi aziendali sarebbe possibile realizzare la simulazione in real time, parallelamente all'esercizio del sistema reale, o con una leggera

accelerazione del tempo di simulazione, si potrebbe valutare le diverse alternative decisionali.

Gli ambiti ai quali la simulazione operativa può giovare sono lo *scheduling*, la pianificazione della capacità e controllo.

I possibili impieghi di questo tipo di simulazione nell'ambito dei processi produttivi è in accordo allo schema rappresentato in figura.

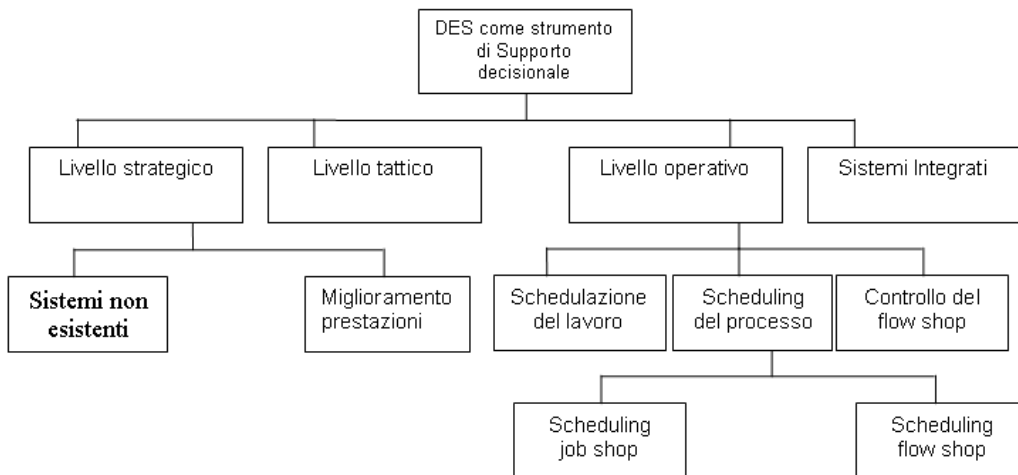


Figura 5.2 – Classificazione dei modelli di simulazione.

### 5.2.1 Impieghi della simulazione per obiettivi strategici.

Nell'impiego della simulazione come strumento di supporto tattico e strategico, ritroviamo il suo impiego per selezionare la migliore configurazione tra diversi sistemi.

In particolare, si analizzano quattro diverse modalità di sviluppo dei sistemi di simulazione come strumento di supporto decisionale.

#### *Lo sviluppo di modelli di simulazione per la progettazione di sistemi*

Ceric et al. propone un approccio per l'utilizzo della simulazione sia per valutare la selezione delle configurazioni da valutare, sia nella fase di scelta tra le diverse alternative.

Il modello concettuale è realizzato utilizzando diagrammi ciclici attivi. La complessità della simulazione è risultata rilevante a causa della complessità e dinamicità del sistema.

Poiché il sistema reale a cui confrontarsi non esiste, la validazione realizzata è di tipo independent verification and validation basata sulla face validity (consultazione di esperti) e non su analisi statistiche per misura errore e verifica. Il modello al computer è stato verificato eseguendo esperimenti per differenti alternative con piano fattoriale completo dei parametri, ciascuno dei quali a due livelli. La simulazione è di tipo terminating e sviluppata a partire dalle stesse condizioni iniziali. È stata effettuata l'analisi di significatività dei fattori per due configurazioni del sistema tra cui effettuare la scelta.

Tale scelta è stata realizzata valutando gli output di simulazione delle due alternative, attraverso analisi statistiche in termini di intervalli di confidenza per le medie degli indicatori.

*Modelli di simulazione per il miglioramento delle performance di sistemi produttivi.*

Il processo di miglioramento delle performance vuole valutare il sistema in termini di interazioni e interdipendenze degli elementi del sistema.

Per quanto concerne, l'analisi delle performance di sistemi esistenti un esempio è presentato da Alan et al.

Al fine di relazionare i cambiamenti nei componenti con le performance del sistema in analisi è necessario effettuare la modellazione del sistema. Gli autori analizzano il miglioramento delle performance del processo attraverso l'impiego della simulazione. Infatti, la simulazione fornisce informazioni circa gli elementi critici del sistema, le diverse interazioni e le sue dinamiche caratteristiche.

I modelli di simulazione possono, quindi, essere impiegati per lo studio del comportamento del sistema attuale e la sua descrizione, per l'analisi degli

elementi critici e per la stima delle performance e per valutare le diverse soluzioni proposte.

Un ulteriore esempio di valutazione delle prestazioni del sistema è quello presentato da Ueno et al. Come nel caso analizzato da Alan et al., si considera la simulazione come strumento di supporto alla riprogettazione del processo produttivo. Tuttavia, a differenza dell'approccio precedente, la simulazione è utilizzata non per una valutazione complessiva del sistema, ma per individuare i colli di bottiglia delle linee di produzione.

In questo caso, si adopera la simulazione come alternativa per la rilevazione della macchina con il tasso di produzione minore. Si dimostra che la tecnica impiegata risulta più realistica e pratica, in particolare nel caso in cui il sistema da analizzare sia ampio e complesso. L'obiettivo della simulazione è la determinazione di una nuova configurazione della linea di produzione che permette di ottenere il livello di produzione desiderato con il minimo costo. In altri termini, si valuta la capacità produttiva, si identificano i colli di bottiglia per definire la nuova struttura della linea di produzione. Il modello è strutturato considerando un numero ridotto di sottomodelli poi connessi tra loro.

Gli input necessari per la realizzazione del modello sono:

- Caratteristiche macchine.
- Sequenza job sulla prima macchina.
- Stoccaggio fuori linea e capacità buffer intermedi.
- Probabilità rilavorazione ad ogni ispezione.
- Ispezione delle macchine e schedulazione delle riparazioni.

Il modello è generato utilizzando il linguaggio Slam e in misura limitata il Fortran.

Si considera anche l'impiego di macchine parallele, tenendo conto che il setup può essere effettuato solo per una macchina del gruppo per volta e le relative regole di assegnazione. Le misure di performance sono i tassi di produzione attuali e non nominali (prodotti per ora) che tengono conto anche dei tempi di setup, di rilavorazione di blocking e di starving. La procedura di

simulazione è indicata in Figura 5.3. Esecuzione della simulazione con la configurazione iniziale del sistema

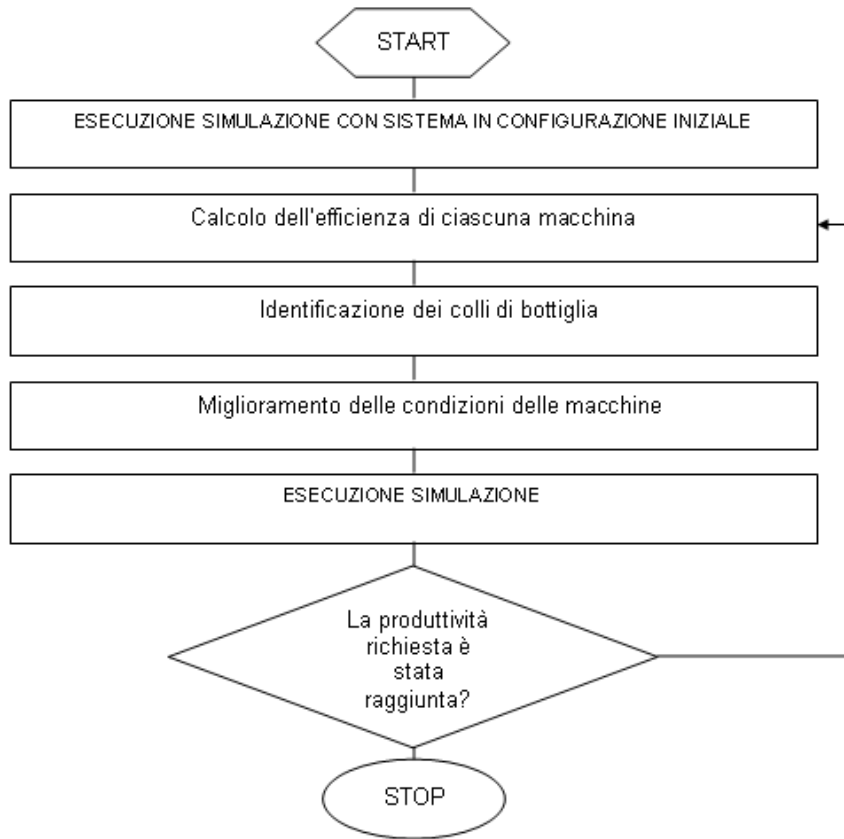


Figura 5.3 – Le fasi della simulazione.

I parametri sono espressi in termini di tempo di processamento, di setup e tasso di rilavorazione. Quindi, la simulazione permette di individuare senza la necessità di impiegare elevate semplificazioni del sistema, le interconnessioni e le dipendenze tra le diverse parti del sistema.

L'impiego della simulazione per il processo decisionale strategico, presentato Kumar et al., era finalizzato alla riprogettazione del sistema di produzione al fine di migliorare la capacità produttiva. È stato sviluppato un sistema di simulazione DES per configurare una linea semi-automatizzata di produzione nell'ambito del processo di realizzazione di parti in plastica, per migliorare il processo produttivo esistente in termini di capacità. La simulazione è integrata al *Design of Experiment* (DOE), impiegato per

interpretare i risultati ottenuti e evidenziare informazioni su come specifici parametri affettano il comportamento del sistema.

È stato analizzato un processo con quattro fasi e buffer. L'obiettivo della simulazione era di supportare una decisione per la capacità dei buffer in relazione all'automazione della linea di produzione. Ulteriormente, la simulazione ha permesso l'analisi sul throughput per la nuova configurazione del processo produttivo e di definire i valori dei parametri, che permettono la massimizzazione del throughput per il nuovo assetto.

Si sono ottenute superfici di risposta, per valutare il comportamento del sistema in termini di obiettivi fissati al variare di alcuni fattori, quali tempo medio di ciclo macchine, capacità del buffer, mean time to failure delle macchine, numero di macchine in parallelo per un dato stadio e la dimensione dei lotti.

#### *L'impiego dei modelli di simulazione a livello tattico*

Un esempio in tal senso è offerto da Watson et al.

Gli autori analizzano la pianificazione del rilascio degli ordini per una produzione *make-to-order*. In genere, per tale pianificazione si fa ricorso all'impiego della logica MRP, a capacità infinita e lead time definiti su dati storici e esperienze passate. In tal modo si ottengono pianificazioni che spesso risultano irrealizzabili, con elevate difficoltà nella fase di scheduling. Infatti, non esistono correzioni del lead time rispetto a parametri come carico di lavoro, capacità, priorità degli ordini, *routing*, DB dei prodotti finiti, dimensione lotto, vincoli del modello.

Gli autori hanno proposto approccio alternativo, il *Resource Planning Based on Queuing Simulation (qRP)*, che genera il rilascio degli ordini con una logica di esplosione della distinta base backward simile a quella del MRP, integrato da modello di un sistema di code simulato, rendendo più attendibile e realistica la rappresentazione del sistema.

I lead time dei componenti variabili e dipendenti dallo stato dello shop, possono variare da periodo a periodo a differenza del MRP. La distinta base viene esplosa backward rispetto alle due date dei prodotti finiti, secondo un

approccio definibile come Simulation based order release planning o simulation based backward planning o simulation based resource planning.

Tuttavia non esistono software commerciali che lo includano. Il qRP richiede una previsione dettagliata della domanda per i prodotti finali e moltissime informazioni sul processo quali routing delle parti, le distinte base e i WIP. Il modello è costituito da moduli distinti che realizzano tutte le funzioni del modello.

Una sperimentazione DOE con un piano fattoriale completo caratterizzato dai seguenti fattori: struttura del prodotto (piatta, elevata, complessa), shop flow (flow shop, job shop), modello di domanda del master scheduler (stabile, instabile), shop load (leggero pesante) variabilità del sistema (bassa, alta) bilanciamento (un collo di bottiglia, più colli) assegnazione della due date (costante, basata su regole di lavoro) e carico di lavoro iniziale (leggero, pesante).

*L'impiego dei modelli di simulazione a livello operativo.*

Molti modelli di simulazione sono stati testati come strumento supporto per il processo di *operation decision making*. Cioè per analizzare statisticamente il comportamento dei process sotto definite condizioni per fattori controllabili e non controllabili.

La simulazione supporta le decisioni operative per il conseguimento degli obiettivi condizionate limitando gli effetti di variazione in relazione ai fattori non controllabili, ovvero dell'ambiente.

Laddove si verificano delle problematiche nella conduzione del processo operativo sotto determinate condizioni predefinite, è possibile individuare soluzioni alternative che migliorino le performance del sistema.

Per l'utilizzo della simulazione come strumento decisionale operativo, sono stati considerati approcci mirati alla valutazione di problemi di schedulazione del lavoro, dei processi produttivi, distinti per tipologia di sistema: schedulazione di sistemi di tipo flow shop, di tipo job shop.

*L'impiego dei modelli di simulazione per la schedulazione giornaliera del lavoro.*

Un impiego della simulazione ad eventi discreti in ambito operativo, fornito da Andersson et al., è stato orientato alla pianificazione dell'allocazione giornaliera delle risorse umane. Si considera il sistema di supporto decisionale basato sulla simulazione (SBDS) a livello operativo del sistema di produzione per una linea di assemblaggio Radio Base Station (RBS) all'Ericsson Radio System, Gävle.

La validazione del modello di simulazione è stata effettuata attraverso l'impiego di animazioni, dato l'obiettivo dello studio di valutare l'impiego della simulazione come sistema di supporto decisionale e non l'ottenimento di un sistema operativo

Il sistema è interfacciato con altri sistemi, ovvero con il decisore, con il Manufacturing, Planning and Control System (MPCS) e con la linea reale di assemblaggio.

Possibili azioni di ri-schedulazione erano previste in caso di livello di precisione insoddisfacente.

I risultati ottenuti, sono incoraggianti per la capacità di tale approccio di migliorare le performances del sistema a parità di risorse impiegate.

Il limite di tale approccio è la necessità di avere disponibilità di dati in real time sullo stato del sistema di assemblaggio, cosa difficilmente automatizzabile.

Non è possibile considerarlo come un sistema integrato perché non completamente connesso con il processo reale.

*L'impiego dei modelli di simulazione per la schedulazione dei processi produttivi.*

La modellazione per la schedulazione di tipo DES permette di ottenere schedulazioni stabili attraverso l'approccio incrementale, ovvero, non fa variare di molto la schedulazione al variare di piccoli cambiamenti nei parametri del sistema. È anche possibile trattare problemi complessi.

È possibile impiegare un modello di simulazione sia nella fase di analisi preliminare del sistema oltre che di pianificazione operativa.

Si ritrovano studi sia per processi flow shop che job shop. Poiché il primo può essere analizzato come un caso particolare del secondo, maggiore attenzione è stata rivolta all'impiego di modelli di simulazione per il job shop.

*L'impiego dei modelli di simulazione per la schedulazione di sistemi flow shop.*

Un esempio particolarmente accurato di schedulazione per il flow shop si ritrova proposto da Vaydianathan et al.

La DES è impiegata nell'industria di processo per la schedulazione giornaliera. La quantità di prodotti finali (circa 300), la domanda discontinua e *shelf-life* limitata (90 gg) complicano molto la generazione manuale della schedulazione.

Il sistema è caratterizzato da programma di schedulazione e dal modello di simulazione. Il primo è impiegato per generare la schedulazione giornaliera. Il sistema di simulazione, di seguito, impiega la schedulazione ottenuta per simulare il sistema e migliorarla.

Gli autori hanno considerato vincoli di produzione dovuti ad una *shelf-life* limitata del prodotto e una domanda fortemente stagionale, con picchi nei mesi invernali nel caso applicativo. Gli autori apprezzano la consistenza della simulazione nell'ambito dello scheduling, considerando la complessità del sistema per:

- Lunghi *lead time* di produzione.
- Capacità limitata.
- Stagionalità della domanda.
- Prodotti omogenei.
- Le risorse critiche, ovvero con maggiori vincoli di capacità, variabili a seconda della schedulazione. Quindi non si può effettuare la massimizzazione della loro utilizzazione per massimizzare la produzione complessiva.
- Necessità di considerare *breakdown*, arrivi di larghi ordini nuovi.

- Impossibilità di incremento della capacità perché questa è adeguata alla domanda nei periodi non di picco.

Inoltre, la valutazione statistica degli output permette all'analista di nuove correzioni e modifiche. Il sistema sviluppato con *Visual Basic*, ha come dati in input principali gli ordini, le previsioni la scorta di prodotti finiti la scorta di WIP. La schedulazione è in pull system, ovvero schedulando per prima la fase finale.

La dimensione dei job è dipendente dal livello di domanda: i job con basso livello di domanda devono avere dimensione pari alla quantità ordinata, mentre quelli con domanda elevata si corregge la quantità schedulata anche con le previsioni per i successivi giorni.

L'analisi dei risultati sperimentali mostra che l'impiego della simulazione come schedulatore migliora gli indicatori di performance valutati, in termini di tassi di utilizzazione e quantità prodotte.

*L'impiego dei modelli di simulazione per la schedulazione dei processi di tipo job shop.*

Nell'ambito del job shop si ritrovano molti approcci.

Le tecniche di schedulazione proposte da Backer et al. e Palaniswami et al. mostrano l'efficacia dell'impiego della simulazione come supporto decisionale.

Il primo studio ha come obiettivo dell'analisi l'evidenziazione dei vantaggi derivanti dall'impiego della simulazione, per l'analisi più realistica in termini di aleatorietà del processo, ed pertanto impiega numerose ipotesi semplificative nella valutazione del sistema.

È un possibile punto di partenza per valutare l'evoluzione della tecnica.

L'analisi realizzata da Palaniswami et al. vede un numero di ipotesi semplificative ridotto. Anche in tale caso, comunque, la simulazione è utilizzata come strumento di verifica della schedulazione effettuata.

L'approccio proposto da Selladurai et al. prova a realizzare la schedulazione direttamente impiegando la simulazione, limitando l'impiego a casi basati su semplici regole di dispatching.

Nel tempo la complessità dei sistemi di simulazione per la schedulazione nell'ambito job shop è cresciuta per risolvere specifiche esigenze produttive.

Sono stati realizzati sistemi di simulazione che permettano la schedulazione multi - obiettivo con tempi di setup variabili. In questo caso, la simulazione risulta un mezzo di analisi fondamentale in quanto permette di scomporre problemi NP-hard in sottoproblemi.

Esempi di analisi di questo tipo sono stati proposti da Yang et al., che valutano le opportunità di approcci di ottimizzazione multi-obiettivo basato su un'analisi di Pareto attraverso la simulazione nell'ambito di sistemi produttivi.

In particolare, sono considerati esempi numerici per confrontare la metodologia proposta con l'approccio tradizionale per un obiettivo e diverse regole euristiche di dispatching.

Altri esempi sono quelli proposti da Sivakumar, Gupta e Sivakumar per produzione di semiconduttori. Vengono realizzati casi sperimentali reali e confronti con le altre tecniche di schedulazione come i metodi euristici.

Un'altra problematica affrontata è relativa alla realizzazione di una schedulazione per minimizzare il ritardo degli ordini con un sistema di simulazione di tipo *Backward/Forward Hybrid Simulation* (BFHS), al fine di ottenere un livello di dettaglio e di accuratezza elevato.

I primi esempi di impiego di questo tipo di simulazione sono stati proposti da Fuyuki et al.

Gli autori hanno dimostrato che, su cento problemi di job shop semplici per diversi livelli di ristrettezza della due-date, il metodo proposto risulta in gran parte dei casi migliore rispetto alle tecniche tradizionali. Tuttavia, gli autori hanno valutato il BFHS per minimizzare il ritardo e non gli scostamenti globali rispetto alla due-date, in termini anche di anticipo oltre che di ritardo. Tale tecnica è stata per questo scopo perfezionata da Arakawa et al., utilizzando un'ulteriore tipologia del BFHS definito type D che combina il type C e quello B. Infatti, Fuyuki et al. hanno impiegato il type C, in cui l'ordine di

tempo di inizio di lavorazione per ogni job su ogni macchina ottenuto dalla simulazione backward è utilizzato come ordine di priorità dei job nella simulazione forward. Il type B, invece, usa i tempi ottenuti dalla simulazione backward per controllare l'assegnazione dei job nella simulazione forward, in modo da migliorare le prestazioni della tecnica adoperata.

Si evidenzia una caratteristica fondamentale conseguente all'impiego della simulazione come supporto decisionale alla realizzazione della schedulazione, che è la possibilità di valutare a differenza dei metodi analitici, anche se solo in termini di fluttuazione dei tempi di processamento, l'aleatorietà intrinseca dei processi di produzione.

Palaniswami et al. hanno analizzato i modelli di simulazione per testare l'efficacia di una o più regole di dispatching, in quanto le semplici regole di priorità considerano variabili quali la due date e i tempi di processamento per i job, mentre la complessità dei sistemi e le tecnologie richiedono la valutazione di ulteriori variabili nel modello di simulazione per effettuare un'analisi più realistica.

Ad esempio, è opportuno analizzare la complessità di alcuni job che causa maggiori tempi di setup e di produzione; oppure, variabili quale la dimensione dei lotti, i breakdown delle macchine, i "sotto-scorta" e gli errori degli operatori.

La simulazione discreta permette di rappresentare un sistema job shop considerando tali variabili, ma rimane da evidenziare che attendibilità e utilizzabilità dipendono dalla stima realistica di tali variabili, spesso limitata alla valutazione di esperti del sistema reale o, sistematizzando tale capacità attraverso l'impiego di un sistema esperto.

Il sistema esperto si basa sull'esperienza passata in relazione al sistema e alle tipologie di job completate ed è capace di realizzare una stima realistica delle variabili.

In particolare, il modello di simulazione permette di valutare meglio il sistema reale rispetto allo studio precedente, perché considera sia l'aleatorietà del sistema in termini di variazione dei tempi di processamento, sia la presenza di eventi casuali quali il breakdown delle macchine. Inoltre, le

ipotesi semplificative adottate sono molto più verosimili rispetto a quelle proposte da Baker et al.

Un altro approccio è presentato da Selladurai et al.

Sono considerati eventi aleatori altrimenti non facilmente analizzabili con le tecniche di scheduling puramente analitiche. Ma in questo caso gli eventi casuali sono le urgenze o meno degli ordini.

In questo studio è possibile effettuare direttamente ed automaticamente nella simulazione la schedulazione. Anche se le tecniche di scheduling impiegate sono molto semplici e poco efficienti per sistemi complessi.

La simulazione serve a valutare gli effetti delle regole di schedulazione e di priorità considerando o meno ordini urgenti per ottimizzare possibili funzioni obiettivo alternative, come la minimizzazione delle scorte di WIP o del tempo di attesa oppure la massimizzazione dell'utilizzazione delle risorse o del throughput.

Lo studio ha mostrato che alcune regole, per esempio la HRN è migliore nel caso di ordini non urgenti rispetto alla FIFO e SPT in termini di utilizzazione e minore variabilità, mentre lo è la FIFO nel caso di ordini urgenti. Per i WIP la SPT è migliore nel caso di non pre-emptive e ordini urgenti, per la schedulazione pre-emptive è migliore la FIFO. Infine, la SPT è migliore per la massimizzazione del throughput.

Concludendo, è possibile affermare che l'impiego di moderne tecniche di simulazione e gli studi relativi superano le limitazioni, nell'ambito dello scheduling del processo, dovute alla forte semplificazione della realtà che si verifica con tecniche puramente analitiche.

#### *I sistemi di simulazione integrati.*

In generale, la definizione di questo tipo di sistemi varia in relazione agli scopi per i quali sono sviluppati e alle strutture ottenute.

Talvolta, si sono impiegati sistemi integrati per la definizione delle diverse configurazioni del sistema a livello strategico, facendo interagire il modello di

simulazione dinamicamente con sistemi raccolta dati per ottenere una struttura autoadattante di tipo self-building.

Un tipo di analisi di questo tipo è stata ampiamente effettuata da Mosca et al. per sistemi flow shop con software di simulazione Arena 8.0, testando sperimentalmente lo studio su una piccola azienda con sette operai e otto centri di lavorazione.

Fasi dello sviluppo del sistema:

- 1) Data collection, per la raccolta di dati sui flussi di lavoro e tempi di processamento a cui abbinare tramite tecniche di valutazione della goodness-of-fit, le distribuzioni statistiche più appropriate;
- 2) Implementazione del modello, con integrazione di database adeguati per la validazione e la verifica. Partendo da un piano della produzione simulato, si genera un ordine di produzione, costituito da una distinta base a 4, si genera un ordine per ogni sottoprodotto e a questo si assegna una priorità. Quindi, l'ordine è scomposto in sottordini per ogni entità da produrre. La realizzazione della sottoentità può far avanzare il suo livello superiore che procede nel sistema, oppure essere assemblata con altra entità, e sarà e poi il nuovo assemblato a far avanzare il livello superiore o, uscire dal sistema aggiornando il database;
- 3) Valutazione della relazione funzionale tra diversi fattori per selezionare la migliore configurazione.

Il modello di simulazione, integrato con un database relazionale (MS Access 2003) costruito da diverse tabelle che contengono i dati relativi alle date, consente all'utilizzatore di gestire eccezioni usando lo schedulatore di Arena, e gli ordini pianificati, in termini di due date, id\_order, id\_product, quantità richiesta e priorità. Esiste poi la tabella per le distinte base multilivello e multiprodotto. Infine, il database emula un magazzino virtuale per i prodotti spediti sottratti e elementi prodotti aggiunti.

Il modello sviluppato dagli autori presenta un modulo VBA separato connesso con SIMAN per la generazione degli ordini, che per ogni ordine

associa due attributi all'entità che definiscono la quantità da produrre e quella da mantenere.

I prodotti hanno una priorità, o valore aggiunto, che definisce la priorità di esecuzione riservando agli altri la possibilità di essere processati solo quando le risorse sono disponibili.

Un algoritmo di tipo MRP schedula i sotto-assiemi in base a due date finali.

La generazione degli ordini e conseguentemente delle diverse entità con i diversi attributi viene fatta seguire con la loro spedizione ad un magazzino logico, e in parallelo al primo modulo della loro sequenza di lavorazione.

Le sequenze realizzate sono 52 e il percorso da seguire è definito sull'entità in forma di attributo. La prima azione il prelievo del prodotto dalle scorte, la seconda segue la sequenza di lavorazione, poi le entità si ricongiungono.

La lunghezza della simulazione è stata definita dopo la valutazione dello stato stazionario del sistema utilizzando la curva a ginocchio del Mean Square Pure Error.

La funzione obiettivo sviluppata considera il valore economico prodotto e i WIP pesati dal valore di priorità, linea usata e di prodotto.

Fattori di penalità sono stati introdotti per considerare le risorse utilizzate, per valutare il non rispetto di target come il rapporto il valore dei prodotti producibili e quello di produzione ottenuto, e per la penalità associata al ritardo.

Questa funzione è stata post processata e analizzata utilizzando il *DOE* e le *Superfici di Risposta* nella fase di valutazione delle configurazioni. I risultati di tale fase, sviluppata considerando come fattori il numero di centri di assemblaggio (2-4), la capacità di lavoro delle macchine di affilatura (2-4), il volume totale di produzione (0,8-1,2) ed il numero di risorse umane (7-9), sono stati elaborati attraverso un programma Excel in VBA. La struttura globale ottenuta si è dimostrata essere particolarmente flessibile.

### **5.3 Analisi dell'output.**

#### **5.3.1 Introduzione e sviluppo.**

A causa dell'aleatorietà intrinseca di un sistema analizzato con un modello di simulazione, anche gli output sono aleatori. Una replica, o *run*, non è altro che una delle possibili prove eseguite sul modello, di durata dipendente dalle caratteristiche del sistema reale allo studio, e basata su un set di valori di input che assume alcuni valori.

Effettuando un numero di repliche  $n$  maggiore di uno (ovvero, non lanciando  $n$  volte lo stesso run), si eseguono più prove,  $n$  per la precisione, tutte della medesima durata, sul medesimo modello.

Se gli input sono deterministici, a parità di configurazione tra una replica e l'altra, gli output sono gli stessi, per cui, in tal caso, è inutile eseguire più repliche. Se, invece, alcuni degli input, seguono delle distribuzioni statistiche, gli output risultano anch'essi variabili aleatorie. E' tipico l'errore nell'effettuare una simulazione di eseguire un singolo run e considerare l'unica osservazione in uscita come stima affidabile del comportamento reale del sistema. Tali osservazioni, in realtà, sono solo istanze, particolari, di variabili aleatorie, e che ad istanze differenti, potrebbero discostarsi di molto, a causa di una varianza molto elevata.

Per dare consistenza ai risultati di uno studio con simulazione è necessario effettuare sulle uscite analisi statistiche e impiegare tecniche statistiche per progettare e analizzare gli esperimenti di una simulazione. Tipicamente ci si basa comunemente, ma va verificato, sull'ipotesi che i dati da analizzare siano indipendenti e identicamente distribuiti; infatti, questo non si verifica per gli output di una simulazione.

Se  $Y_1, Y_2, \dots$  sono i dati di output di un singolo run di una simulazione; è possibile considerare ciascuna  $Y_i$  come una variabile aleatoria di e quindi la collezione di variabili aleatorie  $\{Y_i, i = 1, 2, \dots\}$  può considerarsi un processo stocastico. Non è affatto scontato che le variabili aleatorie  $Y_i$  siano indipendenti né identicamente distribuite e, pertanto, che siano applicabili direttamente i metodi di analisi statistica per l'analisi di questi dati.

E' necessario effettuare molte repliche della simulazione, ciascuna di lunghezza  $m$ , di cui osservare la produzione del valore delle variabili aleatorie:

Siano  $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}$  la realizzazione della variabile aleatoria  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  ottenute nella prima replica.

Mentre nella successiva si avranno differenti realizzazioni delle variabili aleatorie  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ ; siano  $y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2m}$ .

Per  $n$  repliche indipendenti di lunghezza  $m$ , si ottiene:

$$\begin{array}{ccc}
 y_{11} & y_{12} & y_{1m} \\
 y_{21} & y_{22} & y_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots \\
 y_{n1} & y_{n2} & y_{nm}
 \end{array}$$

Mentre le realizzazioni, per la stessa replica, non sono indipendenti ed identicamente distribuite, se per ogni  $i = 1, 2, \dots, m$ , consideriamo le osservazioni  $y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ni}$ , ovvero l' $i$ -esima colonna della matrice, queste sono osservazioni indipendenti ed identicamente distribuite della variabile aleatoria  $Y_i$ .

Quindi l'analisi statistica è applicabile alle osservazioni  $y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ni}$ , per ogni fissato  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Ci sono due tipi di contesti da distinguere:

- *Terminating simulation*: è definita la durata di ciascuna replica, dettato dalle caratteristiche di interesse del sistema reale. In questo caso si è interessati al comportamento del sistema su un orizzonte temporale finito e a partire dalle condizioni iniziali, in cui il sistema parte, che hanno un ampio impatto sulle misure di prestazione del sistema.
- *Nonterminating simulation*: non esiste un evento che specifica la durata di ciascuna replica. I sistemi possono avere un comportamento stazionario, ovvero, in un run molto lungo, la distribuzione degli output è indipendente dal tempo nonché dalle condizioni iniziali.

Per definire di più la differenza tra i due tipi di simulazione analizziamo lo stato stazionario e il transitorio.

Sia  $\{Y_i, i = 1, 2, \dots\}$  un processo stocastico che rappresenta i risultati di una simulazione e, per ogni  $i = 1, 2, \dots$ , sia

$$F_i(y|I) = P(Y_i \leq y|I) \quad y \in \mathbb{R}$$

la probabilità condizionata che l'evento  $\{Y_i \leq y\}$  accada, date le condizioni iniziali  $I$ , ovvero  $F_i(\cdot|I)$  è la funzione di distribuzione di  $Y_i$  date le condizioni iniziali  $I$ , detta anche distribuzione transitoria del processo di output al tempo (discreto)  $i$  con condizioni iniziali  $I$ .

In generale, la  $F_i(y|I)$  è diversa per differenti valori di  $i$  e per ogni insieme di condizioni iniziali  $I$ .

Se, per ogni  $y$  e  $I$ ,

$$\Pr\{Y_i \leq y\} = F_i(y|I) \quad \rightarrow \quad F(y) = \Pr\{Y \leq y\} \quad \text{per } i \rightarrow \infty$$

allora  $F(y)$  è la distribuzione stazionaria del processo di output  $\{Y_i, i = 1, 2, \dots\}$ , e  $Y$  è la variabile aleatoria stazionaria di interesse con funzione di distribuzione  $F(y)$ . Lo stato stazionario si raggiunge in teoria per  $i \rightarrow \infty$ .

Nella pratica, tuttavia, esiste, quasi sempre un valore temporale  $k$  in corrispondenza del quale le distribuzioni rimarranno invariate.

Si assume lo stato stazionario per il sistema a partire dal tempo  $k$ .

Inoltre se  $Y$  è una variabile aleatoria con distribuzione stazionaria  $F$ , allora  $E(Y)$  è una misura di prestazione stazionaria e  $E(Y_i|I) \rightarrow E(Y)$  per  $i \rightarrow \infty$ , per ogni insieme di condizioni iniziali  $I$ .

*Terminating simulation: analisi del transitorio.*

Si realizzino  $n$  repliche indipendenti di una simulazione con terminazione, il cui evento di termine sia sempre “E”, si ed inizia con condizioni iniziali “I”, caratterizzate dalla medesima distribuzione. Consideriamo, per semplicità, una singola misura di interesse da voler stimare, la variabile aleatoria  $X$ , di cui  $X_j$  la istanza ottenuta nella  $j$ -esima replica, per  $j = 1, 2, \dots, n$ .

$X_j$  sono v.a. indipendenti ed identicamente distribuite.

*Stima della media e calcolo dell'intervallo di confidenza.*

Se si vuole determinare stima e l'intervallo di confidenza della media  $\mu = E(X)$ , uno stimatore corretto della media di una popolazione è dato da

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Esso è, uno stimatore consistente che quindi converge stocasticamente al parametro  $\mu$  quando  $n$ , dimensione del campione, tende ad infinito:

se, fissati un  $\varepsilon$  e un  $\delta$ , positivi e comunque piccoli, per  $n \rightarrow \infty$  vale la relazione :

$$\Pr\{|\bar{X} - \mu| < \delta\} > 1 - \varepsilon$$

Inoltre  $X$  è il migliore tra i tutti gli stimatori della media di una v.a., avendo la minima varianza.

Il *Teorema del limite centrale* afferma che la somma di  $n$  v.a. stocasticamente indipendenti ed equi distribuite con media  $\mu$  e varianza  $\sigma^2$  tende, per  $n \rightarrow \infty$ , ad essere distribuita come una v.a. Normale con media  $n\mu$  e varianza  $n\sigma^2$ .

Il numeratore della media campionaria  $\bar{X}$  è somma di  $n$  v.a. indipendenti ed identicamente distribuite con media  $\mu$  e varianza  $\sigma^2$ , quindi risulta, in virtù del teorema del limite centrale, che la Cdf della  $\bar{X}(n)$  tende, al crescere di  $n$ ,

a quella Gaussiana di media  $\mu$  e varianza  $\sigma^2/n$ , mentre la Cdf della corrispondente v.a. normalizzata

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$$

tende a quella Gaussiana standard

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \stackrel{D}{\approx} N(0,1)$$

il simbolo  $\stackrel{D}{\approx}$  indica che le distribuzioni sono approssimativamente la stessa.

Fissato dunque un livello di confidenza  $1 - \alpha$ , con  $\alpha \in [0,1]$ , l'intervallo di confidenza approssimato al  $100(1 - \alpha)\%$  è dato da

$$\bar{X}(n) \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$$

Generalmente, nella maggior parte dei casi, non è possibile ottenere la varianza  $\sigma^2$  non è nota, ma è possibile definire e utilizzare il suo stimatore

$$S^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}(n))^2$$

Per definizione, quando le  $X_i$  sono v.a. normali, la nuova v.a.  $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}}$  è, una v.a. t di Student di n-1 gradi di libertà, essendo il rapporto di una Gaussiana standard e la radice quadrata di una *Chi-quadro*  $\chi^2$ , divisa per i suoi gradi di libertà, s-indipendenti tra loro:

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{(n-1)S}{\sigma^2} / (n-1)}}$$

e l'intervallo di confidenza approssimato con il rischio alfa di errore al  $100(1 - \alpha)\%$  è

$$\bar{X}(n) \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S(n)}{\sqrt{n}}$$

Ovvero:

$$\Pr \left\{ \bar{X}(n) - t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \leq \mu \leq \bar{X}(n) + t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \right\} \cong 1 - \alpha$$

Essendo caratterizzata da un numero di osservazioni finito, la distribuzione t di Student è meno “precisa” della gaussiana, e (Figura ), per ogni n finito, la distribuzione t di Student risulta più “dispersa”, meno alta e più larga di quella normale, risultando

$$t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} > z_{1-\frac{\alpha}{2}}, \text{ quindi l'intervallo di confidenza risulta più ampio di quello}$$

ottenibile facendo ricorso alle relazioni con la gaussiana.

Solo, per  $n \rightarrow \infty$ ,  $t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \rightarrow z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ; in particolare  $t_{40, 0,95}$  differisce dalla  $z_{0,95}$

per meno del 3%.

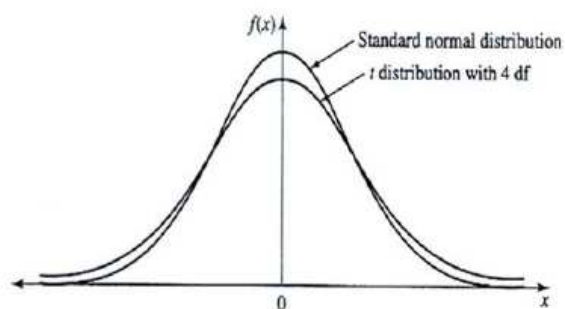


Figura 5.4 – Confronto tra la distribuzione normale standard e la distribuzione t.

Il metodo di analisi dell’output che utilizza la t di Student per il calcolo dell’intervallo di confidenza è definito *procedura con dimensione campionaria fissata*. Il limite è che se non si può controllare n, numero osservazioni, non è possibile per l’analista controllare la semi-ampiezza dell’intervallo di confidenza, ovvero la precisione della stima  $X(n)$ .

Infatti, se  $n$  è fissato, la semi-ampiezza dell'intervallo di confidenza dipende solo dalla varianza di  $X$ , ignota e non controllabile.

L'intervallo di confidenza al  $100(1-\alpha)\%$  è per definizione stima di un più o meno margine di errore e rappresenta l'intervallo che contiene il valore vero del parametro della popolazione con una probabilità al più pari a  $1-\alpha$ .

L'entità dell'intervallo per l'errore si riduce all'aumentare della dimensione del campione, forse progettabile, mentre aumenta all'aumentare della deviazione standard della popolazione. Quindi, non è possibile intervenire sulla varianza della popolazione per ridurre l'entità dell'errore ma solo aumentare la dimensione campionaria  $n$  per contenere l'errore in range desiderati.

È possibile definire una procedura che consente di quantificare il numero di repliche richieste per stimare la media  $\mu = E(X)$  con un errore o precisione specificati.

Si può misurare l'errore che si commette in termini di:

$$\text{Errore assoluto } \beta = |\bar{X}(n) - \mu|$$

$$\text{Errore relativo } \gamma = \frac{|\bar{X}(n) - \mu|}{|\mu|}$$

Se si effettuano  $n$  repliche di una simulazione fino a che la semi-ampiezza  $\delta(n, \alpha)$  dell'intervallo di confidenza al  $100(1-\alpha)\%$  soddisfa la disuguaglianza  $\delta(n, \alpha) < \beta$ , allora:

$$\Pr\left\{\bar{X}(n) - \delta(n, \alpha) \leq \mu \leq \bar{X}(n) + \delta(n, \alpha)\right\} = \Pr\left\{|\bar{X}(n) - \mu| \leq \delta(n, \alpha)\right\} \leq \Pr\left\{|\bar{X}(n) - \mu| \leq \beta\right\}$$

Quindi con probabilità pari a circa  $(1 - \alpha)$ , si è limitato l'errore commesso al più a  $\beta$ .

Solo in 10 casi su 100, se si definiscono intervalli di confidenza al 90% utilizzando il criterio di arresto sul numero delle repliche, ci si aspetta che l'errore assoluto  $|\bar{X}(n) - \mu|$  sia superiore a  $\beta$ .

Per quanto riguarda l'errore relativo, si supponga di eseguire  $n$  repliche di una simulazione fino a che sia verificata la seguente disuguaglianza:

$$\frac{\delta(n, \alpha)}{|\bar{X}(n)|} \leq \gamma$$

Analogamente al caso precedente si ha:

$$\begin{aligned} (1-\alpha) \Pr\left\{|\bar{X}(n) - \mu| \leq \delta(n, \alpha)\right\} &= \Pr\left\{\frac{|\bar{X}(n) - \mu|}{|\bar{X}(n)|} \leq \frac{\delta(n, \alpha)}{|\bar{X}(n)|}\right\} \leq \Pr\left\{\frac{|\bar{X}(n) - \mu|}{|\bar{X}(n)|} \leq \gamma\right\} = \\ &= \Pr\left\{|\bar{X}(n) - \mu| \leq \gamma|\bar{X}(n) - \mu + \mu|\right\} \leq \Pr\left\{(1-\gamma)|\bar{X}(n) - \mu| \leq \gamma|\mu|\right\} = \Pr\left\{\frac{|\bar{X}(n) - \mu|}{|\mu|} \leq \frac{\gamma}{1-\gamma}\right\} \end{aligned}$$

Quindi l'errore relativo è pari al più a  $\gamma/(1-\gamma)$  con probabilità  $1 - \alpha$  [10].

Se  $n$  fosse fissato a priori, non ci sarebbe nessun controllo sulla precisione della stima  $|\bar{X}(n)|$ , ovvero l'ampiezza dell'intervallo di confidenza. Quindi è opportuno provare a decidere il numero di repliche da effettuare, se non ci sono limitazioni, per ottenere la precisione desiderata.

A questo scopo sono state definite due strategie generali:

- *Procedura a due fasi:* in una prima fase vengono effettuate  $n_0$  repliche sulla base delle quali si calcola  $S^2(n_0)$  e la semi-ampiezza dell'intervallo di confidenza  $\delta(n_0, \alpha)$ . In seguito, eventualmente, si effettuano altre repliche fino al raggiungimento della precisione desiderata.
- *Procedura iterativa:* si aumenta iterativamente il numero delle repliche fino a che non si raggiunge il livello di accuratezza desiderato.

*Procedura a due fasi.*

Nella prima fase sono effettuate un numero fissato  $n_0$  di repliche, si calcola la stima della varianza  $S^2(n_0)$  e l'intervallo di confidenza per  $\mu$ . Nella seconda fase, assumendo che la stima  $S^2(n_0)$  non cambi significativamente con il numero delle repliche, si effettuano eventualmente ulteriori repliche fino

ad ottenere la precisione desiderata. Considerando l'errore assoluto, il numero totale delle repliche da effettuare per ottenere un errore assoluto pari al più a  $\beta$  è dato da

$$n_a^* = \min \left\{ i \geq n \mid t_{i-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2(n_0)}{i}} \leq \beta \right\}$$

Ovvero, si incrementa il numero delle repliche aggiuntive  $i$  di 1 fino a quando si verifica la disuguaglianza.

Ovviamente, se  $n_a^* > n_0$  allora si dovranno effettuare  $n_a^* - n_0$  repliche aggiuntive.

*Procedura iterativa.*

La procedura a due fasi ha lo svantaggio di utilizzare la stima  $\bar{X}(n_0)$  e  $S^2(n_0)$  basate sulle  $n_0$  repliche fissate nel calcolo del numero di repliche necessarie per ottenere una precisione desiderata. Ma tali stime potrebbero essere abbastanza imprecise e portare il numero di repliche a crescere sovrastimato, oppure viceversa, non ottenendo la precisione desiderata.

Si può far meglio utilizzando una procedura iterativa che determina una stima di  $\mu$ . con errore relativo pari a  $\gamma$  e intervallo di confidenza del  $100(1-\alpha)\%$ . Qui, rispetto a prima, ad ogni replica aggiuntiva eventualmente effettuata, viene ricalcolata la stima della varianza che, invece, nel caso precedente rimaneva fissata a  $S^2(n_0)$ .

Uno schema algoritmico di questa procedura è il seguente:

**Passo 1:** si effettuano  $n_0$  repliche della simulazione e si pone  $n = n_0$ .

**Passo 2:** si calcolano  $\bar{X}(n)$  e  $\delta(n, \alpha)$  da  $X_1, \dots, X_n$ .

**Passo 3:** se  $\frac{\delta(n, \alpha)}{\bar{X}(n)} \leq \frac{\gamma}{1 + \gamma}$  si usa  $\bar{X}(n)$  come stima di  $\mu$  e STOP.

È stato verificato che la procedura descritta fornisce una buona copertura dell'intervallo di confidenza al 90%, utilizzando  $n_0 \geq 10$  e  $\gamma \geq 0,15$ .

*Stima di altre misure di prestazione.*

Per comprendere il comportamento di un sistema manifatturiero è possibile stimare, oltre alle medie, valori di quantità numerabile, quali il numero atteso di elementi in coda in un determinato arco temporale.

Uno stimatore corretto è:

$$\left[ \frac{\int_0^T Q(t) dt}{T} \right]$$

dove  $Q(t)$  è il numero di elementi in coda al tempo  $t$  e  $T$  è il periodo di attività del sistema (ad esempio un turno lavorativo).

Spesso può essere utile stimare la probabilità che una certa v.a. di interesse assuma dei valori compresi in un determinato intervallo. Sia  $X$  una variabile aleatoria definita su una replica  $i$  una simulazione e si supponga di voler stimare la probabilità:

$$\Pr\{X \in B\}$$

con  $B$  insieme di numeri reali. Siano  $X_1, X_2, \dots, X_n$  le variabili aleatorie IID (Indipendenti Identicamente Distribuite) ottenute effettuando  $n$  repliche indipendenti della simulazione.

Se con  $S$  si indica il numero delle  $X_i$  che cade in  $B$ ,  $S$  avrà una distribuzione binomiale di parametri  $n$  e  $p$ , e uno stimatore corretto di  $p$  è dato da  $S$ :

$$\hat{p} = \frac{S}{n}$$

Gli intervalli di confidenza per queste stime si calcolano applicando le tecniche precedentemente analizzate.

*Nonterminating Simulation: analisi dello stato stazionario.*

Se abbiamo un processo stocastico che genera una variabile  $Y_1, Y_2, \dots$  un stocastica di output generato da singolo run di simulazione senza terminazione, si supponga che, per  $i \rightarrow \infty$  sia:

$$F_i(y) = \Pr\{Y_i \leq y\} \quad YF(y) = \Pr\{Y \leq y\}$$

dove  $Y$  è la v.a. stazionaria di interesse con funzione di distribuzione  $F$ .

Con la notazione precedente si è inteso sopprimere la dipendenza di  $F_i$  dalle condizioni iniziali.

Allora  $\Phi$  è un parametro stazionario se esso per  $Y$  rappresenta una caratteristica come il valore atteso  $E(Y)$  o un quantile di  $Y$ , etc.

In una simulazione senza terminazione la funzione di distribuzione delle  $Y_i$ ,  $F_i$ , è diversa da  $F$  poiché dipendente dalle condizioni iniziali  $I$ , e questo complica la stima di  $\Phi$ .

Le prime  $I$ , finite, osservazioni  $Y_1, Y_2, \dots, Y_I$ , non sono adeguate e da considerare per il calcolo di  $\Phi$ , se si vuole una rappresentazione del comportamento stazionario del sistema. Ad esempio, la media campionaria  $\bar{Y}(I)$  basata sulle prime  $I$  osservazioni, con  $I$  finito, è uno stimatore distorto della media  $v = E(Y)$ .

In letteratura tale problema è riferito come *problema del transitorio iniziale* o *dello start-up*.

*Il problema del transitorio iniziale.*

I metodi più diffusi per determinare la lunghezza del warm-up, intesa come il periodo di simulazione prima di ottenere lo stato stazionario, sono:

- METODO DI WELCH.
- METODO SPC.
- RANDOMIZATION TEST
- CONWAY RULE CROSSING OF THE MEANS RULE.
- MARGINAL STANDARD ERROR RULE.

Si voglia stimare la media stazionaria, definita come

$$v = \lim_{i \rightarrow \infty} E(Y_i) = E(Y)$$

Per evitare il problema suddetto, nella fase di startup, si effettua il warming up, ovvero la cancellazione dei dati iniziali, che consiste nel non considerare nella stima le prime osservazioni, le più influenzate dalle condizioni iniziali.

Quindi, invece di utilizzare la stima  $\bar{Y}(m)$  basata su  $m$  osservazioni, si considera quella troncata a sinistra:

$$\bar{Y}(m, l) = \frac{\sum_{j=l+1}^m Y_j}{m-l}$$

dove  $l$  è il numero finito delle osservazioni che vengono scartate.

Il problema, sembra evidente, è quello della corretta scelta di  $l$ , ovvero del periodo di warming up, di modo che:

$$E(\bar{Y}(m, l)) \approx v$$

Se il valore di  $l$  è troppo piccolo si rimane influenzati dalle condizioni iniziali, viceversa, si potrebbe spendere troppo in tempo e calcolo.

Esiste una procedura di tipo grafico per determinare  $l$ , basata sul concetto che finito l'effetto del transitorio iniziale, il valore della variabile aleatoria diventa grossomodo uniforme, ovvero si vuole determinare un valore di  $l$  tale

che, per  $i > l$ , risulti  $E(Y_i) \approx v$ .

Graficamente si deve determinare, al di là della instabilità intrinseca della variabile, quando la curva  $E(Y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , si stabilizza intorno al valore  $v$ .

Spesso si ha un andamento influenzato dall'alta variabilità del processo  $Y_1, Y_2, \dots$ , e per ovviare a ciò, ci si può riferire alla *procedura di Welch* che, prima di effettuare l'analisi grafica, effettua un trattamento dei dati per ridurre la varianza:

**Passo 1:** Si effettuano  $n$  repliche ciascuna di lunghezza  $m$ , scegliendo  $m$  grande. Sia  $Y_{ji}$  la  $i$ -esima osservazione della  $j$ -esima replica ( $j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ ).

**Passo 2:** Si calcola la media  $\bar{Y}_i = \sum_{j=1}^n \frac{Y_{ji}}{n}$  per  $i = 1, 2, \dots, m$ , per dati corrispondenti fra le diverse repliche. Il processo stocastico delle medie  $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_n$  ha media  $E(\bar{Y}_i) = E(Y_i)$  e varianza  $Var(\bar{Y}_i) = Var(Y_i)/n$ , pertanto la media non varia, ma la varianza si riduce di un fattore pari a  $1/n$ .

**Passo 3:** Si sostituisce ciascun termine del processo stocastico delle medie  $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_n, \dots$  con la media mobile  $\bar{Y}_{i(w)}$ , definita come

$$\bar{Y}_{i(w)} = \begin{cases} \frac{\sum_{s=-w}^w \bar{Y}_{i+s}}{2w+1} & i = w+1, \dots, m-w \\ \frac{\sum_{s=-(i-1)}^{i-1} \bar{Y}_{i+s}}{2i-1} & i = 1, \dots, w \end{cases}$$

dove  $w \leq m/4$  è un intero positivo, definito “time window”. La media mobile  $\bar{Y}_i(w)$  non è altro che la media campionaria di  $2w+1$  osservazioni delle medie  $\bar{Y}_i$  centrate sull’ $i$ -esima osservazione.

**Passo 4:** Si disegna il grafico delle  $\bar{Y}_i(w)$ , per  $i = 1, 2, \dots, m-w$ , e si sceglie il valore di  $l$  oltre il quale la successione  $\{\bar{Y}_i(w)\}$  appare giunta a convergenza.

È fondamentale scegliere bene i tre parametri della simulazione,  $m$ ,  $n$  e  $w$ :

- La lunghezza delle repliche  $m$  dovrà essere più grande del valore che ci si aspetta per  $l$  e tale da permettere nella simulazione un numero elevato di occorrenze di tutti gli eventi, anche quelli poco probabili.

- per quanto riguarda la scelta del numero di repliche  $n$ , è opportuno iniziare con valori di  $n$  pari a 5 o a 10 per poi aumentare, se necessario.
- Il valore del time window  $w$  deve essere sufficientemente grande da rendere regolare il grafico delle  $\bar{Y}_i(w)$ , ma non tale da non permettere l'individuazione del transitorio [1, 24, 25, 34].

Nel metodo SPC, illustrato da Robinson, si realizzano  $n$  replicazioni e si calcola la media per ciascuna di queste.

L'insieme delle medie  $\{\bar{Y}_i : i=1, 2, \dots, m\}$  viene suddiviso in  $b$  batch di dimensione  $k$ , la cui media è definita come  $\bar{Y}_x$  con  $x=1, 2, \dots, b$ .

Per determinare la dimensione  $b$  si può ricorrere al test di correlazione di Anderson Darling e quello di normalità di Von Neumann; in generale, non si usano meno di 20 batch. Si ottiene in questo modo una serie in funzione del tempo

$$Y_{(k)} = \{\bar{Y}_1(k), \dots, \bar{Y}_b(k)\}$$

Si stima la media e la deviazione standard per l'ultima metà della serie e si definiscono su una carta di controllo per serie temporale e media stimata, i tre limiti di controllo così definiti:

$$CL = \hat{\mu} \pm z \hat{\sigma} / \sqrt{b/2} \quad \text{con } z=1,2,3$$

Lo stato stazionario, come immaginabile, è raggiunto se e quando il processo è e resta in controllo.

Come classicamente vale per le carte di controllo, il processo è fuori controllo quando:

1. Un punto è fuori dai limiti di controllo a 3-sigma della carta.
2. Due o tre punti consecutivi sono fuori dal limite di controllo 2-sigma.
3. Quattro, cinque punti consecutivi sono fuori dal limite di controllo a 1-sigma.
4. Otto punti consecutivi sono su un lato della media.

5. I punti iniziali sono tutti su un lato della media.

Il Randomization test, sviluppato da Yücesan, è utilizzato nella valutazione della media del processo. Il metodo si basa sull'ipotesi nulla che non ci sia bias di inizializzazione.

Anche qui si effettua una simulazione di lunghezza  $m$  ore e ottenendo la serie in output  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$  da raccogliere in  $b$  batches di lunghezza  $k$ , per ognuno dei quali si calcola la media. Le medie sono raggruppate in due gruppi, ad esempio per la prima iterazione della procedura si considera il primo gruppo costituito dalla media del primo batch e il secondo dalle restanti  $b-1$  medie.

È possibile procedere, poi, al confronto tra le medie totali dei due gruppi e valutare se la differenza delle due medie è significativamente diversa da zero, allora l'ipotesi nulla può essere rigettata. In tal caso, si considerano come output della simulazione nello stato stazionario i dati contenuti nel secondo gruppo.

In caso contrario, si possono ridefinire i due gruppi aggiungendo il secondo batch al primo gruppo.

Conway ha suggerito la seguente regola di troncamento: si troncano una serie di misure finché il primo della serie non è nè il massimo nè il minimo della serie rimanente.

L'ultimo metodo consiste nel definire la dimensione del batch  $m$ ,  $b$  il numero di batch e  $n$  la lunghezza della simulazione.

Secondo la regola MSER (*Marginal Standard Error Rule*), per un processo stocastico finito,  $\{Y_i(j): i=1, 2, \dots, n\}$  il punto di troncatura ottimale è dato da:

$$d_j^* = \min_{n > d(j) \geq 0} \left[ \frac{z_{\alpha/2} s(d(j))}{\sqrt{n(j) - d(j)}} \right]$$

Quindi, attraverso la soluzione di un problema non vincolato di minimizzazione si ottiene l'istante di troncatura. A questo punto, dette, per

esempio,  $l$  il numero di osservazioni troncate dalle  $n$  totali con uno dei metodi esposti la media sarà calcolata come:

$$\bar{Y}_{n,l} = \frac{1}{n-l} \sum_{i=l+1}^n Y_i$$

*Stima della media stazionaria e intervalli di confidenza.*

Si presentano alcuni metodi proposti in letteratura per la stima della media stazionaria  $v$  del processo di output  $Y = \{Y_1, i = 1, 2, \dots, n\}$ , definita come:

$$v = \lim_{i \rightarrow \infty} E(Y_i) = E(Y)$$

Stima della media basata sull'approccio "repliche/cancellazioni"

Per la definizione della stima della media stazionaria  $v$  si utilizzano, in ciascuna replica, solo le osservazioni successive al periodo di warm up. Se si sono effettuate  $n$  repliche di una simulazione, ciascuna di lunghezza  $m$  (repliche pilota) e di aver determinato il valore della lunghezza del transitorio,  $l$ .

Sia  $Y_{ji}$  la  $i$ -esima osservazione prodotta nella  $j$ -esima replica e sia  $X$  una nuova v.a. definita come

$$X_j = \frac{\sum_{i=l+1}^m Y_{ji}}{m-l} \quad \text{per } j = 1, \dots, n$$

che rappresenta la media campionaria delle osservazioni  $Y_{j, l+1}, Y_{j, l+2}, \dots, Y_{j, m}$  prodotte dalla  $j$ -esima replica.

Le  $Y_{ji}$  sono sicuramente v.a. dipendenti perché prodotte dalla stessa replica, al contrario delle  $X_j$ , che sono v.a. indipendenti ed identicamente distribuite perché prodotte da repliche indipendenti.

Inoltre, se  $m$  è sufficientemente grande, risulta

$$v = E(X_j).$$

Al termine del  $n$ -esima replica si calcola la media campionaria delle  $X_j$

$$\bar{X}(n) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j$$

e la varianza campionaria delle  $X_j$ , che può essere calcolata con la formula:

$$S^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}(n))^2$$

essendo le  $X_j$  v.a. I.I.D.

Dunque l'intervallo di confidenza per  $\nu$  al  $100(1-\alpha)\%$  è dato da

$$\left[ \bar{X}(n) - t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S(n)}{\sqrt{n}}, \bar{X}(n) + t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S(n)}{\sqrt{n}}, \right]$$

Nella maggior parte dei casi, allo stato attuale per l'onere di tempo di calcolo, è fattibile il ricorso ad  $n$  repliche pilota per determinare  $l$  e poi l'uso delle sole ultime  $m-l$  osservazioni provenienti da  $n'$  repliche differenti da quelle pilota.

Nel caso di lunghezza  $m$  di ciascun replica, inizialmente fissata, di valore molto più grande di  $l$ , è possibile utilizzare un unico set di  $n$  repliche sia per il calcolo del periodo di warm up, sia per la costruzione dell'intervallo di confidenza.

Valgono le considerazioni fatte per il conseguimento della precisione desiderata.

#### Metodo basato sull'evoluzione della MSPE.

Un problema critico è quello della determinazione della lunghezza del run di simulazione. Si valuta un punto di scambio tra l'affidabilità del risultato e il costo/tempo di sperimentazione. Entrambi si incrementano all'aumentare della complessità del modello.

Le metodologie esistenti, Mosca et al., non forniscono una stima a priori sull'entità del puro errore sperimentale che affligge gli output; anno bisogno di molti lanci addizionali non riutilizzabili nella stima degli output, incremento sgradevolmente i tempi di sperimentazione e infine, forniscono risultati

paragonabili a quelli stimabili ad intuito da un ricercatore sufficientemente abile e pratico del simulatore.

Sarebbe opportuno non richiedere prove aggiuntive non recuperabili, di consentire una migliore ripartizione del tempo totale di sperimentazione, ossia diminuendo la durata di ogni singolo run, è possibile, a parità di tempo di sperimentazione, realizzare più lanci e infine consente di misurare il puro errore sperimentale e la sua evoluzione temporale sull'arco di tempo simulato.

Volendo portare avanti una strategia di esperimenti progettati (p.c.c.), è necessario calcolare la durata ottima di ogni singolo run di simulazione al fine di ridurre costi e tempi di sperimentazione. L'idea base della metodologia corretta di misura della durata si basa sui presupposti che le  $n_0$  prove centrali di un p.c.c. consentono una misura dell'errore sperimentale (puro errore) e nel caso di assenza di un p.c.c., la metodologia può essere ugualmente implementata replicando l'esperimento, in uno stesso punto di progetto, per 3÷5 volte accertandosi che ad ogni nuovo lancio corrispondano diversi semi di innesco dei generatori dei numeri random). Altro presupposto è quello che essendo in accordo con il teorema di Cochran, l'Errore Sperimentale è distribuito secondo una distribuzione normale con valore di media pari a zero e varianza  $\sigma^2$ :

$$[\text{NID}(0, \sigma^2)]$$

Per cui il valore atteso della *Mean Square* dell'errore coincide con  $\sigma^2$ :

$$E(\text{MS}_E) = \sigma^2$$

Nella simulazione Montecarlo, l'errore sperimentale va a decrescere statisticamente fin quando non raggiunge un valore limite stabile, condizionato dalla lunghezza del lancio in quanto tanto maggiore è il numero di estrazioni effettuate delle variabili casuali presenti nel modello, tanto più ogni distribuzione viene meglio "ricoperta" dai valori campionati.

Pertanto, si immaginò che il comportamento dell'errore sperimentale, stimato attraverso la *Mean Square Pure Error*, potesse avere un andamento del tipo "Knee Curve", ossia curva a ginocchio:

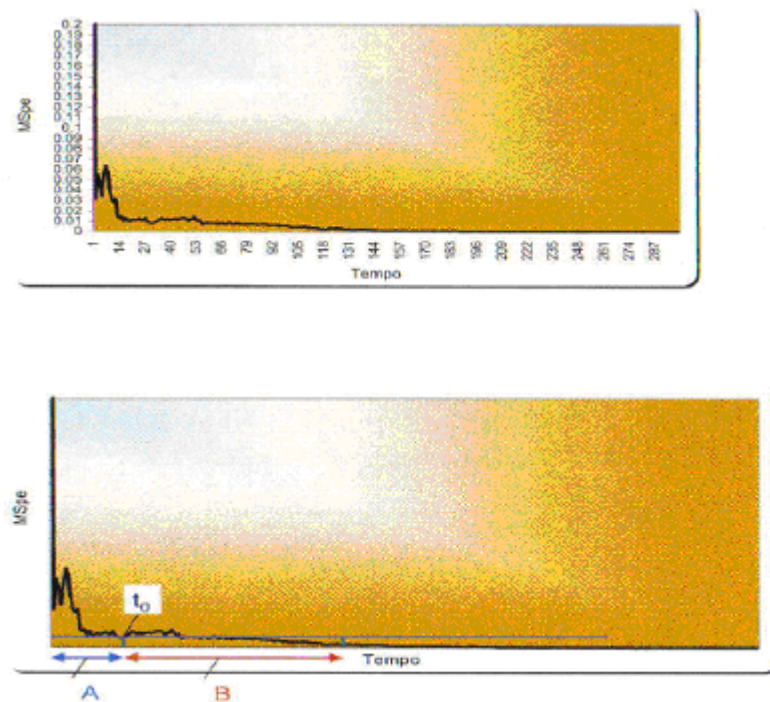


Figura 5.5 – Esempio di Knee curve.

Supponendo quindi che sia così, esiste sempre un istante  $t_0$  oltre il quale non si ha interesse a protrarre l'esperimento in quanto a grandi incrementi del tempo  $T$  corrispondono decrementi poco significativi della MSPE.

Dato un modello testato la sua convalida statistica prevede:

1. Stima di un tempo di simulazione  $T'$  tale da "entrare" nella zona di stabilizzazione della MSPE (zona B), oltre il ginocchio della curva ( $T' > t_0$ ).
2. Stima del tempo di inizializzazione con contabilizzazione dei risultati solo dopo lo stesso (che tuttavia può anche non essere considerata in quanto il suo effetto Sul mspe a regime è ininfluyente).
3. Lancio delle  $n_0$  prove centrali (ovvero delle prove replicate) con effettuazione delle  $r$  rilevazioni intermedie del valore delle funzioni obiettivo considerate d intervalli di tempo  $t_i$  ( $i = 1, \dots, r$ ) equi spazati.

Ciò equivale al lancio di  $r$  simulazioni di durata  $t_i$ , ciascuna replicata  $n_0$  volte.

4. Stima dell'errore sperimentale ( $MSpe$ ) per ciascuno degli  $n_0$  set di lanci aventi una lunghezza  $t_i$  omogenea attraverso le relazioni note:

$$SSpe(t_i) = \sum_{j=1}^{n_0} (Y_j(t_i) - \bar{Y}(t_i))^2$$

$$MSpe(t_i) = \frac{SSpe(t_i)}{n_0 - 1}$$

5. Analisi dell'evoluzione temporale della  $MSpe$ , ottenuta tramite il procedimento appena descritto (una per ogni valore temporale istantaneo: 1000, 2000, ..., 10000). Si consideri che quanto maggiore risulti la durata di una simulazione tanto meglio i valori estratti approssimano le distribuzioni di frequenza originarie: le risposte tendono quindi ad addensarsi attorno al loro valore medio. Per questo motivo al crescere di  $t_i$  ci si attende una progressiva diminuzione della  $MSpe$  fino al raggiungimento della stabilizzazione provocata da un crescente insensibilità del sistema nei confronti di nuove estrazioni casuali: nel periodo iniziale ogni campionamento determina vistose oscillazioni nelle medie della risposta, mentre al trascorrere del tempo l'influenza del numero random sulla stima di quest'ultima perde via via di significatività.
6. Costruzione del grafico della durata portando in ascissa il tempo simulato e in ordinata i relativi valori della  $MSpe$  agli istanti  $t_i$ .
7. Scelta dell'istante di fine simulazione attraverso un'analisi visiva del diagramma ( $MSpe, t_i$ ).

Inoltre è possibile, onde evitare errori interpretativi dovuti all'impossibilità di utilizzare scale grafiche adeguate, impiegare una procedura più rigorosa sotto il profilo strettamente statistico: si suddivide l'asse dei tempi in un numero opportuno di classi di ampiezza sufficientemente significativa e si

calcola nell'ambito per ogni classe per ciascun obiettivo, la media e le somme dei quadrati SSD delle SSp<sub>e</sub>. Detto  $t$  il numero di osservazioni per ogni classe, si otterrà per ciascuna classe:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^t \frac{SSpe_i}{t} \quad SSD = \sum_{i=1}^t (SSpe_i - \bar{D})^2$$

Le rispettive medie quadratiche MSD si ottengono allora dividendo le somme dei quadrati per il numero di gradi di libertà relativo ad ogni blocco e dato da  $(t-1)$ .

Quindi:

$$MSD = \frac{SSD}{(t-1)}$$

Si confrontano le medie quadratiche di ogni classe con quelle immediatamente successive, rapportando sempre quella di maggiore entità a quella meno rilevante, in modo da ottenere frazioni comunque maggiori dell'unità. Così facendo, poiché i rapporti tra medie di quadrati costituiscono grandezze distribuite secondo una Fisher, si perviene ad un *test statistic* che consente di apprezzare la significatività delle variazioni nel tempo delle MSp<sub>e</sub>.

Le due ipotesi da confrontare in tale test sono

H<sub>0</sub>: (*ipotesi nulla*) mancanza di significatività tra la media dei quadrati MSD di una classe e quella della successiva.

H<sub>1</sub>: (*ipotesi alternativa*) variazione significativa tra le due classi.

Scelto un valore relativo all'errore di I specie e indicato con  $\alpha$  il numero totale delle classi si provvede a calcolare i rapporti:

$$F_j = \frac{MSD_j}{MSD_{j+1}} \quad \text{oppure} \quad F_j = \frac{MSD_{j+1}}{MSD_j}$$

Quindi si può concludere che da un certo istante in poi le MSp<sub>e</sub> si sono significativamente assestate se:

$$F_j < F_{\alpha, t-1, t-1}$$

Se la grandezza  $F_j$ , e nessun'altra grandezza  $F_i$  con  $i > j$ , rispetto a tale relazione soddisfa l'ipotesi alternativa, si può senz'altro fissare il centro dell'ennesima classe come istante di fine simulazione.

Volendo effettuare un'analisi della metodologia si può notare come nella simulazione la durata ottima è indipendente dalla scelta dei numeri random.

La capacità del simulatore di essere aderente alla realtà in esame va testata confrontando i dati ottenuti tramite il simulatore con i dati di ritorno dalla realtà in esame o da realtà analoghe. La curva evolutiva della MSp<sub>e</sub> nel tempo ci permette di vagliare l'affidabilità statistica del simulatore in termini di regolarità della knee-curve e di entità della MSp<sub>e</sub> a regime (*rumore di fondo*).

Un simulatore può essere idoneo alla simulazione di certe funzioni obiettivo sotto determinate condizioni al contorno e non di altre per cui, in un'ottica di confronto, occorrerà entrare nel maggior dettaglio possibile del modello. Tornando, invece, al rumore di fondo, questo non è un'entità caratteristica di un certo simulatore ma dipende, nell'ambito del simulatore utilizzato da:

- Livello di stocasticità assegnato alle variabili in casuali.
- La capacità del simulatore di trattare la stocasticità.
- Tipo di funzione obiettivo analizzata.

Dopo questa ampia trattazione inerente la bibliografia esistente in termini di simulazione, nel prossimo capitolo vedremo la tipologia di software utilizzato per tale lavoro: Automod.

## Bibliografia

- Aarts, E. H. L., Van Laarhoven, P. J. M., Lenstra, J. K. and Ulder, N. L. J. (1994) "A Computational Study of Local Search Algorithms for Job-Shop Scheduling," *ORSA Journal on Computing*, 6(2), Spring, 118-125.
- Aarts, E. H. L. and Lenstra, J. K. (eds) (1997) "Local Search in Combinatorial Optimization", Wiley, Chichester.
- Adams, J., Balas, E. and Zawack, D. (1988) "The Shifting Bottleneck Procedure for Job-Shop Scheduling", *Management Science*, March, 34(3), 391- 401.
- Akers, S. B. (1956) "A Graphical Approach to Production Scheduling Problems", *Operations Research*, vol 4, 244-245.
- J.H. Ahmadi, R.H. Ahmadi, S. Dasu, C.S. Tang, "Batching and scheduling jobs on batch and discrete processors", *Operations Research*, 2000.
- A. Alan, B. Pritsker, "Modeling in performance- Enhancing processes"; *Operation Research* (1997), Vol.45, No.6, pp 797-804.
- Alexopoulos G. S. Fishman; "Computational experience with the batch means method"; C. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference ed. S. Andraddttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson.
- C. Alexopoulos, S.H Kim, "Output data analysis for simulation", *Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- C. Alexopoulos, A.F. Seila; "Output analysis for simulation", *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference* J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds.
- Anant S. J. • Sheik M. (1998) "A State-Of-The-Art Review Of Job-Shop Scheduling Techniques".
- Anchordoguy, "Breve storia del Keiretsu giapponese", in *Harvard Business Review*, Ed. Italiana – n. 5, 1995.
- T.W. Anderson, D.A. Darling; " Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes"; *Annals of Mathematical Statistics* (1952), 23: 193-212.
- M. Andersson e G. Olsson; "A simulation based decision support approach for operational capacity planning in a customer order driven assembly line".  
*Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference* D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds.
- Applegate, D. and Cook, W. (1991) "A Computational Study of the Job-Shop Scheduling Problem", *ORSA Journal on Computing*, Spring, 3(2), 149-156.
- J. April, F. Glover, J. P. Kelly, M. Laguna, "Practical introduction to simulation optimization", *Proceeding of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- M. Arakawa, M. Fuyuki, I. Inoue, "A simulation-based production scheduling method for minimizing the due-date-deviation"; *International Transaction in Operational Research* (2002), 9, pp.153-167.

- C.T. Baker, B. P. Dzielinski, "Simulation of simplified job shop", *Management Science* (1960) Vol.6, No.3, pp.311-323.
- Balas, E., and Vazacopoulos, A. (1998) "Guided Local Search with Shifting Bottleneck for Job-Shop Scheduling", *Management Science*, Feb, 44(2), 262-275.
- Balsamo S., R. Mirandola, "Modelli e metodi per la valutazione delle prestazioni di sistemi", Ed. SEU, 1996.
- J. Banks, J.S. Carson, B.L. Nelson, "Discrete-Event System Simulation", Ed. Prentice Hall, 1996.
- Baptiste, P., Le Pape, C. and Nuijten, W. P. M. (1995) "Constraint-Based Optimization and Approximation for Job-Shop Scheduling", *AAAI-SIGMAN Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Montréal, Québec, Canada, Aug 19, pp. 5 - 16.
- Barnes, J. W. and Chambers, J. B. (1995) "Solving the Job Shop Scheduling Problem Using Tabu Search", *IIE Transactions*, vol 27, 257-263.
- M. Becker, A. L. Beylot, G. Damm, W. Y. Thang; "Automatic run-time choice for simulation length in mimesis"; *Rairo Recherche operationnelle/Operations Research*, Vol. 33, No.1, 1999, pp. 93-115.
- Bettonvil, B. and J.P.C. Kleijnen, "Searching for important factors in simulation models with many factors: sequential bifurcation" (1997) *European Journal of Operational Research*, 96, no. 1, pp. 180-194.
- P. J. Bickel, D. A. Freedman; "Some asymptotic theory for the bootstrap"; *Annals of Statistics* (1981) 9, pp. 1196-1217.
- Bierwirth, C., Mattfeld, D. C. and Kopfer, H. (1996) "On Permutation Representations for Scheduling Problems," Voigt, H. M. et al. (eds) *PPSN'IV 327 Parallel Problem Solving from Nature*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 310-318.
- Blackstone, J. H. Jr, Phillips, D. T. and Hogg, G. L. (1982) "A State of the Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job-Shop Operations", *International Journal Of Production Research*, Jan-Feb, vol 20, 27-45.
- Blazewicz, J., Domschke, W. and Pesch, E. (1996) "The Job-Shop Scheduling Problem: Conventional and New Solution Techniques", *European Journal of Operational Research*, 93(1), 23rd August, 1-33.
- Bonfiglioli R., "Lean Thinking alla maniera italiana", 2<sup>a</sup> edizione, Franco Angeli, Milano, 2001.
- Brucker, P. and Neyer, J. (1997) "Tabu Search for the Multi-Mode Job-Shop Problem", *Operations Research Spektrum*, vol 20, 21-28.
- J. M. Calvin, P. W. Glynn, M. K. Nakayama, "The semi-regenerative method of simulation output analysis", *National Science Foundation*, 2003.
- Carlier, J. and Pinson, E. (1994) "Adjustment of Heads and Tails for the Job - Shop Problem", *European Journal of Operational Research*, Oct 27, 78(2), 146-161.

- J.Carpenter, J. Bithell; "Bootstrap confidence intervals: when, which, what? A practical guide for medical statisticians"; *Statistics in Medicine* 2000; 19:1141- 1164.
- Caseau, Y. and Laburthe, F. (1995) "Disjunctive Scheduling with Task Intervals", LIENS Technical Report n° 95-25, Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Normale Supérieure Département de Mathématiques et d'Informatique, 45 rue d'Ulm, 75230 Paris, France.
- V. Ceric, V. Hlupic, "Modelling a Solid-Waste Processing system by discrete event simulation"; *The Journal of the Operational Research Society* (1993), Vol.44, No.2, pp 107-114.
- Chandru V, Lee CY, Uzsoy R. – "Minimizing total completion time on batch processing machines" – *International Journal of Production Research* 1993;31:2097-121.
- R. Chase, R. Jacobs, N. Aquilano "Operations management for competitive advantage", Mc Graw Hill, 2004.
- C.-H. Chen, H.-C. Chen, L. Dai; "A Gradient Approach For Smartly Allocating Computing Budget For Discrete Event Simulation"; *Proceedings of the 328 1996 Winter Simulation Conference* ed. J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner, and J. J. Swain.
- H.-C. Chen., C.-H. Chen, L. Dai, E. Yücesan; "New Development Of Optimal Computing Budget Allocation For Discrete Event Simulation"; *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference* ed. S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson
- R. Chen, A. F. Seila, "Multivariate inference in stationary simulation using Batch Means", *Proceeding of the 1987 Winter Simulation Conference*.
- R. C. H. Cheng; "Bootstrap methods in computer simulation experiments", *Proceeding of the 1995 Winter Simulation Conference*, C. Alexopoulos, W. R. Lilegdon, D. Goldsmann, eds.
- Cheng, C-C. and Smith, S. F. (1997) "Applying Constraint Satisfaction Techniques to Job Shop Scheduling", *Annals of Operations Research*, vol 70, 327-357.
- R. C.H. Cheng; "Analysis of simulation experiments by bootstrap resampling"; *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference* B.A.Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, and M.W. Rohrer, eds.
- Chiarini A., "Total Quality Management", Franco Angeli, 2004.
- S. Cho, "A distributed time-driven simulation method for enabling real-time manufacturing shop floor control", *Computers & Industrial Engineering* (2005), 49, 572-590;
- Chryssolouris, G., Wright, K. and Pierce, J. (1988) "A Simulator for Manufacturing Systems Based on Artificial Intelligence", *Symposium on Advances in Manufacturing Systems Engineering*, Nov 8 - Dec 2, Chicago, Illinois, pp. 1-13.
- K. H. Concannon, K. I. Hunter e J. M. Tremble; "Simul8-Planner simulationbased planning and scheduling"; *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference* S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin e D. J. morrice, eds.
- Dagli, C. H. and Sittisathanchai, S. (1995) "Genetic Neuro-Scheduler - A New Approach for Job-Shop Scheduling", *International Journal of Production Economics*, 41(1-3), 135-145.

- R.D. D'Agostino, H.A. Stephens, "Goodness-of-fit distribution", editors, M. Dekker, New York.
- Dauzère-Pérès, S. and Paulli, J. (1997) "An Integrated Approach for Modeling and Solving the General Multiprocessor Job-Shop Scheduling Problem Using Tabu Search", *Annals of Operations Research*, vol 70, 281-306.
- Davidor, Y., Yamada, T. and Nakano, R. (1993) "The Ecological Framework II: Improving GA Performance at Virtually Zero Cost", *ICGA'5 5th International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 171-176.
- Della Croce, F., Tadei, R. and Volta, G. (1995) "A Genetic Algorithm for the Job Shop Problem, *Computers and Operations Research*", Jan, 22(1), 15-24.
- Dell'Amico, M. and Trubian, M. (1993) Applying Tabu "Search to the Job-Shop Scheduling Problem, *Annals of Operations Research*", vol 41, 231-252.
- T.J.Di Ciccio, B. Efron, "Bootstrap Confidence Intervals", *Statistical science* (1996) Vol.11, No.3, pp.189-228.
- T.J.DiCiccio, J.P.Romano;"A review of Bootstrap confidence intervals"; *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol.50,No,3(1988), pp.338-354.
- T. DiCiccio, R. Tibshirani;"Bootstrap Confidence intervals and Bootstrap approximation" *Journal of the American Statistical association* (1987) Vol.82 No. 397 Theory and Methods.
- J. M. Donohue, "Experimental designs for simulation", *Proceeding of the 1994 Winter Simulation Conference*.
- Drevna, M. and Kasales, C., "Introduction to Arena," Series, 1993. *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, M. Tew and S. Manivannan, Eds., IEE Publishers, Piscataway, NJ.
- L. DuPont, FJ Ghazvini – "A branch and bound algorithm for minimizing mean flow time on a single batch processing machine" – *International Journal of Industrial Engineering*, 1997.
- B. Efron, "Second thoughts on the Bootstrap", *Statistical science* 2003, Vol.18, No.2, 135-140.
- B. Efron, R. Tibshirani; "Bootstrap methods for Standard Errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy"; *Statistical science*(1986), Vol.1, No1, pp 54-75.
- P. Erto, "Probabilità e statistica per le scienze e l'ingegneria" seconda edizione, McGraw-Hill, 2004.
- Fisher, H. and Thompson, G. L. (1963) "Probabilistic Learning Combinations of Local Job-Shop Scheduling Rules", Muth, J. F. and Thompson, G. L. (eds) *Industrial Scheduling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, Ch 15, pp. 225-251.
- Fisher, M. L. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1988) "The Design, Analysis and Implementation of Heuristics", *Management Science*, March, 34(3), 263-265.
- G. A Fishman, "Principles of Discrete Event Simulation", John Wiley, New York, 1978.
- Foo, S. Y., Takefuji, Y. and Szu, H. (1995) "Scaling Properties of Neural Networks for Job-Shop Scheduling", *Neurocomputing*, 8(1), 79-91.

- Fox, M. S. and Sadeh, N. (1990) "Why Is Scheduling Difficult ? A CSP Perspective", Aiello L. (ed) ECAI-90 Proceedings of the 9th European Conference on Artificial Intelligence, August 6-10, Stockholm, Sweden, pp. 754-767.
- M. Fuyuki, I. Inoue; "Due-date-conformance oriented production scheduling in make-to-order production on the basis of backward/forward hybrid simulation"; Journal of Japan Industrial Management Association (1995) 46, pp1. 144-151.
- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979) "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness", W. H. Freeman, San Francisco.
- Giffler, B. and Thompson, G. L. (1960) "Algorithms for Solving Production Scheduling Problems", Operations Research, 8(4), 487-503.
- A.K. Gupta, A.I. Sivakumar, "Multi-objective scheduling of two-job families on a single machine", Omega 33 (2005) 399 – 405.
- AK Gupta, AI. Sivakumar; "Simulation based multiobjective schedule optimization in semiconductor manufacturing."; Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC 2002). San Diego, California: IEEE; 2002. p. 1862 – 70.
- Hanada, A. and Ohnishi, K. (1993) "Near Optimal Job-Shop Scheduling using Neural Network Parallel Computing", IECON'93 Proceedings of the 19th Annual IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Maui, Hawaii, Nov 15-19, vol 1, pp. 315-320.
- M. Hardy; "Actuarial application of the Bootstrap"; SOA 2004 New York Annual Meeting-session 72Ts, Bootstrap methods.
- Hefetz, N. and Adiri, I. (1982) "An Efficient Optimal Algorithm for the Two - Machines Unit-Time Job-Shop Schedule-Length Problem", Mathematics of Operations Research, vol 7, 354-360.
- T. Hesterberg, S. Monaghan, D. S. Moore, A. Clipson e R. Epstein; "Bootstrap methods and permutation tests"; Companion chapter 18 to the practice of business statistics.
- O. Holthaus, O. Rosenberg, H. Ziegler; "Development and simulation of methods for scheduling and coordinating decentralized job shop using multicomputer systems".
- S. Hood, P. D. Welch, "Experimental design issues in simulation with examples from semiconductor manufacturing", proceeding of the 1992 Winter Simulation Conference.
- Hopfield, J. J., and Tank, D. W. (1985) "Neural Computational of Decisions in Optimization Problems", Biological Cybernetics, vol 52, 141-52.
- Y. Ikura, M. Gimple, "Scheduling algorithms for a single batch processing machine" – Operation Research Letters, 1986.
- Jain, A. S., and Meeran, S. (1998) "Job-Shop Scheduling Using Neural Networks", International Journal of Production Research, 36(5), May, 1249-1272.
- Jackson, J. R. (1957) "Simulation Research on Job-Shop Production", Naval Research Logistics Quarterly, vol 4, 287-295.

- Johnson N.J. "Modified t tests and confidence intervals for asymmetric populations". *Journal of the American Statistical Association*(1978), 73, pp. 536-544.
- Johnson, D. S., Aragon, C. R., McGeoch, L. A. and Schevon, C. (1989) "Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation"; Part I, Graph Partitioning, *Operations Research*, 37(6), Nov-Dec, 865-892.
- K.Kelley; "The effects of nonnormal distributions on confidence intervals around the standardized mean difference: Bootstrap and parametric confidence intervals"; *Educational and Psychological Measurement* (1995), Vol.65 No.1.
- W. D. Kelton, "Designing simulation experiments", *Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- W. David Kelton, R. R. Barton, "Experimental Design For Simulation"; *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference* S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, eds.
- W. D. Kelton, J. M. Charnes, "A comparison of confidence region estimators for multivariate simulation output", *Proceeding of the 1988 Winter Simulation Conference*.
- W. David Kelton, R.P. Sadowski, D.A. Sadowski, "Simulation with Arena", Mc Graw Hill, 2000.
- Kelton, W. D., D. A. Sadowski, and R. P. Sadowski, "Simulation with ARENA", 1998, WCB/McGraw-Hill.
- J.P.C. Kleijnen; "Validation of models: statistical techniques and data availability"; *Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference*, P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock e G.W. Evans eds.
- J P.C. Kleijnen, "Experimental designs for sensitivity analysis of simulation models", *Center of Economic Research*, 2001.
- Kleijnen, J.P.C.; "Case study: statistical validation of simulation models." *European Journal of Operational Research*(1995), 87, no. 1, pp. 21-34.
- J.P.C: Kleijnen, B. Bettonvil, W. Van Groenendaal; "Validation of trace driven simulation models: a novel regression test"; *Management Science* (1998), 44: 812-819.
- J. P.C. Kleijnen , R. C.H. Cheng e B. Bettonvill, "Validation of trace.driven simulation models: Bootstrap tests"; Printed: May 8, 2001.
- J.P.C: Kleijnen; R.C.H. Cheng, B. Bettonvil; "Validation of trace-driven simulation models: more on Bootstrap tests"; *Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference* J.A. Joines, R.R. Barton e P. A. Fishwick, eds.
- Kleijnen, J.P.C., R.C.H. Cheng, and A.J. Feelders, "Bootstrapping and validation of metamodels in simulation" (1998), *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, eds. D.J. Medeiros, E.F.
- Kleijnen, J.P.C. , G. Van Ham, and J. Rotmans, " Techniques for sensitivity analysis of simulation models: a case study of the CO2 greenhouse effect", (1992),*Simulation*, 58, no. 6, pp. 410-417.

- Y.B.Kim, T.R. Willemain, J. Haddock, O. C. Runger; "The threshold bootstrap: A new approach to simulation output analysis"; Proceeding of the 1993, Winter Simulation Conference G.W.Evans, M. Mollaghesemi, E.C. Russell e W. E. Biles, eds.
- G.L.J. Kloppenburg, and F.L. Meeuwsen "Testing the mean of an asymmetric population: Johnson's modified t test revisited." Kleijnen, J.P.C., Communications in Statistics, Simulation and Computation (1986), 15, no. 3, pp.715-732.
- Kobayashi, S., Ono, I. and Yamamura, M. (1995) "An Efficient Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling Problems", Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, pp. 506-511.
- Krüger, K., Shakhlevich, N. V., Sotskov, Y. N. and Werner, F. (1995) "A Heuristic Decomposition Algorithm for Scheduling Problems on Mixed Graphs", Journal of the Operational Research Society, vol 46, 1481-1497.
- W. Kuehn, C. Draschba; "Simulation based job shop production analyser"; Proceedings 18th European Simulation Multiconference Graham Horton (c) SCS Europe, 2004.
- S. KUMAR e D. A. NOTTESTAD, "Capacity design: an application using discrete-event simulation and designed experiments", IIE Transactions (2006) 38, 729–736.
- Laguna, M., Barnes, J. W. and Glover, F. W. (1993) "Intelligent Scheduling with Tabu Search: An Application to Jobs with Linear Delay Penalties and Sequence-Dependent Setup Costs and Times", Journal of Applied Intelligence, vol. 3, 159-172.
- Lamming, "Oltre la partnership, strategie per l'innovazione e la produzione snella", Ed. Italiana a cura di Capaldo, Passaro, Pastore, Raffa, Ed. CUEN, 1994.
- A. M. Law, W. D. Kelton, "Simulation Modeling & Analysis", McGraw-Hill Int. Ed., 1991.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. and Shmoys, D. B. (1993) "Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity", in Graves, S. C., Rinnooy Kan, A. H. G., Zipkin, P. H. (eds), Handbook in Operations Research and Management Science, Volume 4: Logistics of Production and Inventory, North Holland, Amsterdam.
- L. H. Lee, E. Peng Chew, S. Teng, D. Goldsman; "Optimal Computing Budget Allocation For Multi-Objective Simulation Models" , Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- E. LeGrande, "The development of a factory simulation system using actual operating data"; Management Technology(1963), Vol.3, No.1, pp 1-19.
- C.L. Li, C.Y. Lee – "Scheduling with agreeable release times and due dates on a batch processing machine" – European Journal of Operational Research, 1997.
- Lourenço, H. R. D. and Zwijnenburg, M. (1996) "Combining the Large-Step Optimization with Tabu-Search: Application to the Job-Shop Scheduling Problem," in Osman, I. H. and Kelly, J. P. (eds) Meta-heuristics: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA, Chapter 14, pp. 219-236.

- P. S. Mahajan, R. G. Ingalls; "Evaluation Of Methods Used To Detect Warm-Up period In Steady State Simulation"; Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- J. H. Marvel, M. A. Schaub e G. Weckman; "Validating the capacity planning process and flowline product sequencing through simulation analysis"; Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.
- Matsuo, H., Suh, C. J. and Sullivan, R. S. (1988) "A Controlled Search Simulated Annealing Method for the General Job-Shop Scheduling Problem", Working Paper #03-04-88, Graduate School of Business, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- Mattfeld, D. C., Bierwirth, C. and Kopfer, H. (1998) "A Search Space Analysis of the Job Shop Scheduling Problem", to appear in Annals of Operations Research.
- McMahon, G. B. and Florian, M. (1975) "On Scheduling with Ready Times and Due Dates to Minimize Maximum Lateness", Operations Research, May-June, 23(3), 475-482.
- G. Metan e I. Sabuncuoglu; "A simulation based learning mechanism for scheduling systems with continuous control and update structure"; Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds..
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. (1953) "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", The Journal of Chemical Physics, 21(6), June, 1087-1092.
- Douglas C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", fifth edition, John Wiley & Sons.
- Morgan, B. J. T. "Elements of Simulation", Chapman & Hall, London 1994.
- R. Mosca, P. Giribone, G. Guglielmono, "Optimal Length in O.R. Simulation Experiments of Large Scale Production System", International Symposium "Applied Modelling and Simulation", Parigi, Luglio 1982.
- R. Mosca, P. Giribone, "Teoria degli esperimenti e simulazione", Università di Genova, 1985.
- R. Mosca, L. Cassettari, R. Revetria e G. Magro; "Simulation as support for production planning in small and medium enterprise: a case study"; Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.
- Nakano, R. and Yamada, T. (1991) "Conventional Genetic Algorithm for Job-Shop Problems", in Kenneth, M. K. and Booker, L. B. (eds) Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, San Diego, USA, pp. 474-479.
- M.K.. Nakayama; "Two-stages stopping procedures based on standardized time series"; Computer and information science department , new jersey institute of technology Newark, NJ 07102.
- M. K. Nakayama, "Simulation output analysis", Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference.
- M. K. Nakayama – "Simulation output analysis" – Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference.

- Nowicki, E. and Smutnicki, C. (1996) "A Fast Taboo Search Algorithm for the Job-Shop Problem", *Management Science*, 42(6), 797-813.
- Nuijten, W. P. M. and Le Pape, C. (1998) "Constraint-Based Job Shop Scheduling with ILOG SCHEDULER", *Journal of Heuristics*, March, 3(4), 271-286.
- Palaniswami S., Jenicke L., "A Knowledge-based Simulation System for Manufacturing Scheduling" *International Journal of Operations & Production Management*, (1992) Vol. 12 No. 11. pp. 4-14.
- Pegden, C., R. Sadowski, and R. Shannon., "Introduction to Simulation Using SIMAN, 2nd ed.", 1995. McGraw-Hill, Singapore.
- Perregaard, M. and Clausen, J. (1995) "Parallel Branch-and-Bound Methods for the Job-Shop Scheduling Problem", Working Paper, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark.
- Pesch, E., Tetzlaff, U. A. W. (1996) "Constraint Propagation Based Scheduling of Job Shops", *INFORMS Journal on Computing*, Spring, 8(2), 144-157.
- Peterson, C. and Anderson, J. R. (1987) "A Mean Field Theory Learning Algorithm for Neural Networks", *Complex Systems*, vol 1, 995-1019.
- Pidd M., "Computer Simulation in Management Science", J.Wiley, 1998.
- Pinson, E. (1988) "Le Problème de Job-Shop, Thèse d'État", L'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. (In French).
- Ramudhin, A. and Marier, P. (1996) "The Generalized Shifting Bottleneck Procedure", *European Journal of Operational Research*, vol 93, 34-48.
- [139] Reeves, C. R. (1993) "Evaluation of Heuristic Performance", in Reeves, C. R. (ed) *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell Scientific Publications, Osney Mead, Oxford, England, chapter 7, pp. 304-315. (Re-issued 1995 by McGraw-Hill, London.)
- Ripley, B.D. "Stochastic Simulation", Ed. John Wiley, New York 1987.
- R. Roy, "Scheduling and control, performance measures and discrete event simulation"; *The Journal of the Operational Research Society* (1998), Vol.49, No.2, pp 151-156.
- A. Ruiz-Torres, J. e K. Nakatani; "Application of real-time simulation to assign due dates on logistic-manufacturing networks"; *Proceedings of the 1998, Winter Simulation Conference* D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds.
- Sabuncuoglu, I. and Bayiz, M. (1997) "A Beam Search Based Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem", Research Report: IEOR-9705, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bilkent University, 06533 Ankara, Turkey (to appear in the *European Journal of Operational Research*).
- Sadeh, N., Nakakuki, Y. and Thangiah, S. R. (1997) "Learning to Recognise (Un)Promising Simulated Annealing Runs: Efficient Search Procedures for Job Shop Scheduling and Vehicle Routing", *Annals of Operations Research* 75, 189-208.

- D. Sadowski, V. Bapat, "The ARENA production family: enterprise modelling solutions", Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference.
- S. M. Sanchez, "ABC's of output analysis", Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference.
- R.G. Sargent; "Verification and validation of simulation models" Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.
- S. Sawyer ; "Resampling Data:Using Bootstraps"; Washington University, March 12, 2005.
- Schmidt, J. W., and R. E. Taylor, "Simulation and Analysis of Industrial Systems", Richard D. Irwin, Homewood, Ill 1970.
- Schriber, T.J., "The Nature and Role of Simulation in the Design of Manufacturing Systems", (1987) Simulation in CIM and Artificial Intelligence Techniques, Ed. Retti, J., and K. E. Wichmann, Society of Computer Simulation, 5-18.
- V. Selladurai P. Aravindan S.G. Ponnambalam e A. Gunasekaran, "Dynamic simulation of job shop scheduling for optimal performance". International Journal of Operations & Production Management, (1995) Vol. 15 No. 17. pp. 106-120;
- V. Sergi, "Produzione assistita da calcolatore", Ed. Cues, 1998.
- R.E. Shannon, "Introduction to the art and science of simulation", Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference.
- C-C. Shen, "Discrete-Event Simulation On The Web" 1997 IEE.
- Al Sivakumar; "Multiobjective dynamic scheduling using discrete event simulation."; International Journal of Computer Integrated Manufacturing (2001); 14 (2):154–67.
- Jeffrey S. Smith, David T. Sturrock Sanjay E. Ramaswamy, "Discrete Event Simulation For Shop Floor Control", Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference ed. J. D. Tew, S. Manivannan, D. A. Sadowski, and A. F. Seila.
- L. Soliani "Fondamenti di statistica applicata", Edizione settembre 2002.
- N. M. Steiger, "ASAP3: a batch means procedure for Steady-State simulation analysis", University of Maine.
- N. M. Steiger, J. M. Wilson, "Experimental performance evaluation of batch means procedures for simulation output analysis", Proceeding of the 1994 Winter Simulation Conference.
- N. M. Steiger, J. M. Wilson, "An improvement batch means for simulation output analysis", University of Maine.
- Storer, R. H., Wu, S. D. and Park, I. (1993) "Genetic Algorithm in Problem Space for Sequencing Problems", in Fandel, G., Gullledge, T. and Jones, A. (eds), Operations Research in Production Planning and Control: Proceedings of a Joint US/German Conference, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 584-597.
- C.S. Sung, S.H. Yoon – "Minimizing maximum completion time in a two batch-processing machine flowshop with dynamic arrivals allowed" – Engineering Optimization, 1997.

- Swart, W., and L. Donno "Simulation Modeling Improves Operations, Planning, and Productivity", 1981.
- Tamaki, H. and Nishikawa, Y. (1992) "A Parallelled Genetic Algorithm Based on a Neighbourhood Model and its Application to the JobShop Scheduling", in Männer, R. and Manderick, B. (eds) PPSN'2 Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel Problem Solving from Nature, Brussels, Belgium, pp. 573-582.
- F. Turco, "Principi generali di progettazione degli impianti industriali", Ed. CLUP, 1990.
- N. Ueno, S. Sotojima, J. Takeda; "Simulation-Based Approach to Design a Multi-Stage Flow-Shop in Steel Works", IEEE 1991.
- Urgeletti, Tinarelli, "La gestione delle scorte nelle imprese commerciali e di produzione – EOQ, MRP, JIT", ETASLIBRI, 1994.
- R. Uzsoy – "Scheduling batch processing machines with incompatible job families" – International Journal of Production Research, 1995.
- B. S. Vaidyanathan, D. M. Miller e Y. H. Park, "Application Of Discrete Event Simulation In Production Scheduling", Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds.
- R.L. Van Horn; "Validation of simulation results"; Management Science, Vol.17 No.5, Theory Series (1971), pp247-258.
- Vaessens, R. J. M., Aarts, E. H. L. and Lenstra, J. K. (1996) "Job Shop Scheduling by Local Search", INFORMS Journal on Computing, vol 8, 302-317.
- S.Vincent, "Input data analysis" Handbook of simulation, edited by J. Banks, Wiley, New York.
- Wang, W. and Brunn, P. (1995), "Production Scheduling and Neural Networks", in Derigs, U. Bachem, A. and Drexl, A. (eds.), Operations Research Proceedings 1994, Springer-Verlag, Berlin, pp. 173-178.
- Watanabe, T., Tokumaru, H. and Hashimoto, Y. (1993) "Job-Shop Scheduling using Neural Networks", Control Engineering Practice, Dec, 1(6), 957-961.
- E. F. Watson, D. J. Medeiros e R. P. Sadowski, "A Simulation-Based Backward Planning Approach For Order-Release"; Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference ed. S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson.
- G. Weiller, "Il controllo del processo di produzione", Franco Angeli, 1996.
- Werner, F. and Winkler, A. (1995) "Insertion Techniques for the Heuristic Solution of the Job-Shop Problem", Discrete Applied Mathematics, 58(2), 191-211.
- Williamson, D. P., Hall, L. A., Hoogeveen, J. A., Hurkens, C. A. J., Lenstra, J. K., Sevast'janov, S. V. and Shmoys, D. B. (1997) "Short Shop Schedules", Operations Research, March - April, 45(2), 288-294.
- Yamada, T. and Nakano, R. (1996c) "A Fusion of Crossover and Local Search", ICIT'96 IEEE International Conference on Industrial Technology, Shanghai, China, Dec 2-6, pp. 426-430.

J. Yang ; T.-S Chang ; “Multiobjective scheduling for IC sort and test with a simulation testbed”; IEEE transactions on semiconductor Manufacturing (1998), vol. 11, no.2, pp.181-231 (19), pp. 304-315.

E. Yücesan; “ Nonparametric techniques in simulation analysis: a tutorial”; Proceeding of the 1994 Winter Simulation Conference J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski e A. F. Seila, eds.

E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon e M. Charnes, eds; “The role of simulation in advanced planning and scheduling”; K. Musselman; Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.

M. K. Nakayama; Selecting The Best System In Steady-State Simulations Using Batch Means; Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman.

Zhang, H.-C. and Huang, S. H. (1995) Applications of Neural Networks in Manufacturing: A State-of-the-Art Survey, International Journal of Production Research, 33(3), 705-728.

## **6 LA PIATTAFORMA AUTOMOD.**

In questo capitolo affronteremo la trattazione riguardante il modello di simulazione utilizzato per l'analisi della linea di assemblaggio oggetto di tale lavoro. Si ritiene opportuno presentare il software utilizzato con un breve cenno all'utilizzo di questo come strumento di analisi dei processi produttivi.

Sebbene nel capitolo precedente abbiamo trattato ampiamente le nozioni della simulazione presenti in letteratura, si ritiene opportuno, nella prima parte, riprendere alcuni concetti base che risulteranno utili per la comprensione delle scelte effettuate per la costruzione del modello.

### **6.1 Sistemi, modelli e simulazione.**

#### **6.1.1 Sistemi.**

Un *sistema* è un insieme di entità che operano ed interagiscono in modo da completare insieme un processo logico. Cosa considerare come sistema dipende dagli obiettivi dello studio che si vuole intraprendere.

Si definisce *stato del sistema* l'insieme di variabili necessarie per descrivere il sistema in un particolare momento.

I sistemi possono essere ad eventi discreti o continui. I primi sono quelli per i quali le variabili variano in maniera istantanea in particolari momenti di tempo, mentre, per i secondi, le variabili cambiano in maniera continua rispetto al tempo. Raramente un sistema è completamente discreto o completamente continuo. In molte occasioni, tuttavia, una delle due caratteristiche è predominante rispetto all'altra.

#### **6.1.2 Modelli.**

Un *modello* è una rappresentazione artificiale ed arbitraria costruita con un particolare linguaggio del sistema reale rispetto al quale risulta spesso semplificativo, tale linguaggio può essere grafico, informatico, matematico, od in molte occasioni una combinazione di questi; nel modello devono però essere ben in evidenza quegli aspetti determinanti del sistema su cui si vuole

imparare ed intervenire. La modellazione consente di estrapolare dall'estrema complessità del reale un insieme di entità astratte più chiaro e facilmente manipolabile, da cui comunque trarre informazioni utili al sistema fisico, che deve rimanere l'obiettivo finale dello studio.

Ad un certo punto della vita di un sistema, può nascere l'esigenza di valutarne le prestazioni che si possono ottenere modificando una o più caratteristiche o condizioni. Entra allora in gioco la necessità di condurre esperimenti, o sul sistema stesso oppure su di un suo modello.

La diramazione delle possibili modalità di conduzione degli esperimenti è illustrata in Figura 6.1, e sotto elencata.

*Scelta tra esperimenti con il sistema reale ed esperimenti con un modello del sistema.*

E' opportuno, se non troppo dispendioso dal punto di vista economico e se risulta possibile farlo, modificare fisicamente il sistema, in quanto in questo modo non ci sono dubbi sulla validità dello studio condotto. Tuttavia raramente è possibile far ciò, sia per motivi economici sia di tempo, o semplicemente perché il sistema deve ancora essere realizzato. Per questo è di solito necessario costruire un modello del sistema reale. La questione fondamentale che si pone è quanto il modello sia aderente alla realtà (*validità del modello*).

*Scelta tra modello fisico e modello matematico.*

Una volta scelto di affidarsi ad uno specifico modello, occorre decidere se riprodurre fisicamente il sistema od astrarne delle relazioni matematiche. I modelli fisici sono molto utilizzati nello studio di problemi complessi quali quelli fluidodinamici, ma si possono utilizzare anche nello studio di sistemi industriali (magazzini, linee di produzione,...). Comunque, la maggior parte dei modelli sono di tipo matematico, non tangibili. Essi rappresentano il sistema attraverso relazioni logiche e quantitative.

*Scelta tra soluzioni analitiche e simulazione.*

Costruito il modello matematico, è necessario esaminare come questo possa essere utilizzato per rispondere alle domande di interesse riguardanti il sistema. Se il modello è sufficientemente semplice, è possibile lavorare con le sue relazioni e quantità in modo da ottenere una soluzione esatta (in *forma chiusa*) del problema. Se il modello è, come quasi sempre accade, troppo complesso perché esista, oppure se siamo alla ricerca di una soluzione in forma chiusa, allora si può ricorrere alla *simulazione*; in questo caso si inseriscono nel modello una certa quantità di input e si studia come questi influenzano l'output finale.

### **6.1.3 Simulazione.**

Per *simulazione* si intendono modelli teorici non formulati a parole o con simboli del mondo matematico, ma rappresentati mediante calcolatore. La simulazione consente di valutare e prevedere lo svolgersi dinamico di eventi susseguenti a condizioni imposte dall'analista o dall'utente (causa-effetto dei fenomeni). Tale modello può essere definito come l'insieme dei processi che hanno luogo nel sistema valutato, processi i cui rapporti costituiscono la logica di funzionamento del sistema stesso.

Ricorrere alla simulazione si rivela indispensabile qualora si vogliono svolgere analisi su sistemi complessi e caratterizzati da parametri che variano in modo stocastico. In questo caso, che si presenta ogni qualvolta si tratti un sistema dove vi è la presenza dell'uomo come forza lavoro, quale la linea di assemblaggio manuale di questo lavoro, non si riescono ad ottenere soluzioni matematiche in forma chiusa, né approcci euristici soddisfacenti.

Possiamo classificare, a loro volta, i modelli di simulazione secondo i seguenti criteri:

- *Statici o dinamici;*
- *Deterministici o stocastici;*
- *Continui o discreti.*

*Modelli statici e modelli dinamici.*

Un modello di simulazione *statico* è una rappresentazione del sistema in un particolare momento. Invece in un modello *dinamico* la variabile tempo assume una notevole importanza poiché lo stato del sistema varia con esso.

*Modelli deterministici e modelli stocastici.*

Se un modello di simulazione non contiene nessun elemento probabilistico, allora si parla di modello *deterministico*. In un modello di questo tipo l'output è univocamente determinato una volta che siano stati stabiliti gli input. Se, invece, nel modello sono presenti uno o più elementi probabilistici, allora l'output stesso sarà di tipo *probabilistico* e lo si dovrà considerare come una stima, entro un certo intervallo di confidenza, della caratteristica reale del sistema.

*Modelli continui e modelli discreti.*

Come i sistemi, anche i modelli si possono suddividere in *continui* e *discreti*. Valgono le stesse considerazioni fatte per i sistemi, ma è importante sottolineare che non necessariamente un sistema continuo deve essere descritto con un modello continuo ed analogamente per un sistema discreto. In realtà la modellazione viene scelta in base agli obiettivi che ci si pongono nell'affrontare il problema.

La simulazione, consentendo l'analisi della realtà con alto grado di dettaglio, permette di ottenere un elevato numero di informazioni utili, rimanendo in sicurezza e in convenienza economica rispetto al fenomeno reale.

Si può applicare la simulazione sia alla riproduzione del sistema fisico sia agli scenari "*what if*", in cui si costruisce un modello di qualcosa che ancora non esiste, per valutarne il funzionamento una volta realizzato.

Le fasi di un'attività che si avvalgono maggiormente dei benefici di una simulazione sono:

*Pianificazione:*

- Parametri di pianificazione;
- Valutazione di alternativa;
- Identificazione dei colli di bottiglia.

*Realizzazione:*

- Schemi per i programmi di controllo;
- Monitoraggio delle fasi iniziali dell'impianto.

*Funzionamento:*

- Valutazione delle ore di lavoro;
- Piano di produzione;
- Analisi di possibili modifiche.

I benefici riscontrabili nell'esecuzione di una simulazione in ambito produttivo possono essere individuati in:

- Maggior sicurezza in fase di pianificazione grazie all'analisi simulata;
- Maggior rendimento abbinato ad una riduzione dei costi;
- Maggior utilizzo dell'impianto;
- Miglior comprensione del comportamento del sistema;
- Esplicita base su cui prendere provvedimenti;
- Rapidità di visualizzazione e valutazione delle prestazioni del sistema.

I principali obiettivi industriali che si possono raggiungere grazie alla simulazione sono:

- Aumentare l'utilizzo delle macchine;
- Aumentare la capacità produttiva riducendo i tempi di attraversamento;
- Valutare differenti soluzioni di layout;
- Ridurre gli spazi necessari allo stoccaggio dei prodotti;

- Ridurre la necessità di personale;
- Visualizzare un impianto accuratamente pianificato;
- Determinare il numero di veicoli all'interno di un sistema di trasporto;
- Prevedere le dimensioni dei buffer;
- Ottimizzare le strategie di controllo;
- Sperimentare il software di gestione degli inventari;
- Ricostruzione di possibili incidenti per aumentare la sicurezza.

Nei seguenti settori la pratica della simulazione è ormai ampiamente diffusa e collaudata:

- Metalmeccanico;
- Automotive;
- Aerospaziale;
- Elettrodomestici;
- Alimentare;
- Servizi postali;
- Porti ed aeroporti;
- Distribuzione;
- Magazzinaggio;
- Semiconduttori;
- Automated material handling systems (AMHS).

Simulare richiede una buona conoscenza sull'ambito del problema che si affronta, perciò occorre seguire un approccio strutturato e collaudato onde evitare di sbagliare premesse e/o risultati.

I passi consigliati, valutati e consolidati nella loro affidabilità, sono i seguenti.

*Formulazione del problema.*

Ogni studio di simulazione nasce per la risoluzione di un problema. Se è il fruitore della simulazione a definire il problema, l'analista deve assicurarsi di

averlo adeguatamente compreso. Non si esclude, in ogni caso la necessità di riformulare il problema durante l'avanzamento del lavoro.

*Definizione degli obiettivi e delle problematiche da esaminare.*

Un'attenta analisi del problema consente di circoscriverne l'esame riducendo il tempo di analisi. Occorre essere certi di ciò cui si vuole conseguire, al fine di distinguere tra dati necessari all'analisi e dati marginali od influenti.

*Analisi del sistema e stesura del modello concettuale.*

E' necessario conoscere a fondo il sistema per evitare di incontrare punti morti, che, inevitabilmente ci portano a dover riprendere l'intero processo. Occorre quindi definire correttamente il comportamento dei flussi di materiali e informazioni.

*Acquisizione ed analisi dei dati in ingresso.*

Di fondamentale importanza la raccolta dei dati riguardanti il sistema che si andrà ad analizzare, diventando questi i valori da attribuire ai parametri di funzionamento del sistema. I dati possono consistere in informazioni geometriche (layout, dimensione magazzini,...), o cinematiche (velocità proprie dei sistemi, tempi di ciclo dei macchinari, tempi degli operatori,...). Attraverso il calcolo stocastico diviene possibile definire una distribuzione di probabilità per ogni parametro, da inserire all'interno del modello.

*Scrittura del modello logico e modellazione.*

Questo passaggio si diversifica a seconda del software utilizzato, poiché occorre procedere secondo le logiche interne di questo. Su di un sistema con rappresentazione grafica, ad esempio, si procede disegnando e collocando gli elementi fisici, si scrivono le logiche di avanzamento, nel caso contrario sono inserite le sole logiche. Non c'è limite al livello di dettaglio che si può raggiungere tramite una simulazione, ciò è funzione del tempo che si può spendere per la sua realizzazione. Durante la fase di modellazione, i modelli

concettuali che si erano in precedenza elaborati sono resi tangibili e visibili, dando luogo ad una prima fase di correzione.

*Calibrazione e validazione.*

Quando il modello è pronto occorre verificare se il comportamento di questo corrisponda alle attese dell'impianto reale. Potrebbe mancare una logica di "instradamento", un buffer potrebbe essere stato dichiarato troppo piccolo, bloccando il modello o invalidandolo. Durante la fase di validazione occorre analizzare il modello al fine di un suo corretto funzionamento.

*Definizione di un piano degli esperimenti.*

Quando il modello è idoneo per il suo funzionamento si può sperimentare il modello in diverse configurazioni o con differenti variabili di ingresso, al fine di un'analisi del suo comportamento, permettendo un avvicinamento alla soluzione ottimale. I software di simulazione sono in grado di eseguire sperimentazioni equivalenti a mesi e mesi di funzionamento, eseguire molteplici *runs* (iterazioni di simulazione) permettendo un'analisi dei dati in uscita esaustiva rispetto ad un unico gruppo di dati, ovvero un solo run, che simula un'unica evoluzione del sistema.

*Analisi dei dati in uscita.*

Dopo aver raccolto i dati relativi ai parametri in uscita, depurati da eventuali transitori, è possibile creare degli intervalli di confidenza, ovvero stimare il range di valori in cui i parametri che descrivono il sistema possono oscillare.

*Presentazione.*

Una volta completata la simulazione è possibile quindi presentarla contando su dati affidabili ed oggettivi. Essendo i dati risultati informatici, è immediata la rappresentazione tramite grafici, mostrando rapidamente quali possono essere le varie soluzioni funzionali, economiche e redditizie.

*Implementazione.*

Qui si ferma il compito dell'analista e la decisione spetta al cliente. Se quest'ultimo è sempre stato presente e coinvolto durante lo sviluppo del modello ed i passi sin qui descritti sono stati eseguiti correttamente dall'incaricato della simulazione, è probabile che l'implementazione nel sistema reale avvenga con successo.

Questo schema non deve essere visto in un unico verso: risulta possibile dover tornare sui propri passi a seguito dell'accorgersi di errori in ultimo o scoprire, a simulazione inoltrata, che il cliente desidera soluzioni differenti da quanto precedentemente accordato.

Un valido ed efficace pacchetto software per la simulazione deve presentare le seguenti caratteristiche:

- *Flessibilità o compatibilità*: capacità di adattarsi ad un elevato numero di sistemi presenti in commercio.
- *Facilità d'uso*: la programmazione è consentita anche ad un non programmatore. Se un programma si rivela *user friendly* nella sua esecuzione, nel suo apprendimento e nella sua programmazione, risulterà certamente di maggior precisione la simulazione, grazie alla maggior produttività dell'operatore.
- *Velocità di esecuzione*: la determinazione di tale parametro richiede la conoscenza della macchina su cui applicare il programma, poiché, all'aumentare delle potenzialità hardware, aumenta la rapidità di esecuzione.
- *Animazione*: permette una visualizzazione immediata degli esiti, dovuti alle modifiche apportate al sistema.
- *Capacità statistiche*: le statistiche hanno un'elevata rilevanza per gli analisti, in quanto è grazie a queste che egli può valutare l'esito di una simulazione come proposta accettabile o inopportuna.

Per valutare l'effettiva convenienza di una simulazione, occorre considerare il rapporto costi/benefici del suo utilizzo.

## **6.2 Lo strumento di simulazione: Automod.**

Il presente Paragrafo tratta un'introduzione al software *AutoMod 11.2, VR Graphics Version*, ideato, prodotto e commercializzato dalla statunitense *Brooks Automation*, ed utilizzato in tale lavoro per la costruzione del modello della linea di assemblaggio e per la simulazione del processo di montaggio delle pompe.

AutoMod è un software per la simulazione di processi industriali ma non solo, largamente diffuso in tutto il Mondo, è un strumento molto flessibile. E' utilizzato, ad esempio, per simulare lo smistamento dei bagagli nei terminali degli aeroporti, oltre che vari processi produttivi e logistici.



Figura 6.1 – Esempio di un'immagine di simulazioni industriali realizzate con AutoMod.

Il software di base si compone essenzialmente di due ambienti, *AutoMod model editor* ed *AutoMod Runtime*; il primo serve a costruire il modello del sistema in esame, il secondo a farlo correre, per raccogliere informazioni visive e statistiche numeriche sui parametri del sistema.

AutoMod comprende, inoltre, una serie di programmi accessori per migliorarne la fruibilità, il realismo o la completezza, quali *AutoStat* per gestire automaticamente le statistiche dei dati, *AutoView* per la realizzazione di filmati esportabili ed utilizzabili in una presentazione, *ACE* per la costruzione di rappresentazioni grafiche di entità sia statiche, sia mobili.

### 6.2.1 AutoMod Model editor.

La costruzione del modello avviene nell'editor, attraverso la definizione delle entità proprie dell'editor, l'importazione di quelle definite nelle espansioni accessorie, quali ACE, e la loro integrazione.

In questa sede si trattano solo i moduli che sono risultati necessari alla costruzione del modello della linea di assemblaggio manuale oggetto di studio, ovvero:

- *Sistema principale.*
- *Sistema Conveyor.*
- *Sistema Static.*

Al *sistema Kinematics*, data la sua importanza nella modellazione del caso in esame, sarà dedicato un sottoparagrafo a sé.

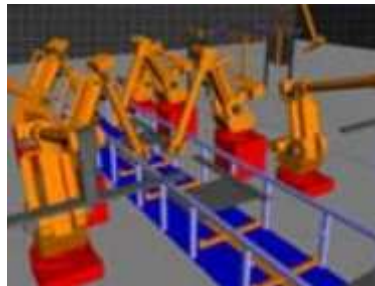


Figura 6.2 – Esempio di un'immagine di simulazioni con sistema kinematics.

Il *sistema principale* contiene le strutture per definire le entità di base di un sistema:

- *Carichi (Loads)*: gli esecutori dei processi; in una linea produttiva rappresentano i prodotti.
- *Processi (Processes)*: insiemi di azioni che modificano le caratteristiche dei carichi e/o le variabili del sistema; ogni processo è eseguito da uno ed un solo carico.
- *Code (Queues)*: luoghi fisici dove i carichi sostano per l'attesa tra un processo ed il successivo.

- *Risorse (Resources)*: rendono possibile l'esecuzione di un processo di trasformazione e sono utilizzate dai carichi: sono la rappresentazione virtuale, nel caso di una linea di assemblaggio, di operatori o robot.
- *Variabili (Variables)*: parametri numerici definiti dall'utente che rappresentano lo stato degli aspetti interessanti del sistema ad un certo istante; le variabili vengono aggiornate seguendo le istruzioni contenute nei processi.
- *Codice sorgente (Source file)*: file di programmazione di estensione ".m", questo definisce la logica di funzionamento del sistema; nel source file (da scrivere utilizzando un'apposita sintassi, ben precisa, in inglese), i processi, le code, le variabili, i carichi e le risorse, definiti singolarmente nelle apposite finestre, vengono legati tra loro, definendo in modo completamente libero, purché coerente con la logica di AutoMod, i rapporti che intercorrono tra le entità. Il source file è di fatto il cuore di AutoMod, in quanto è esso a permettere la modellazione vera e propria ed il controllo del sistema.

Il *sistema Conveyor* si utilizza per modellare le entità fisiche fisse di trasporto dei carichi, come nastri trasportatori motorizzati (per le entità mobili quali i veicoli c'è il modulo *sistema Path Mover*, non utilizzato in questo lavoro di tesi); si compone di:

- *Sezioni (Sections)*: tratti bidimensionali di nastro motorizzato, di cui sono personalizzabili molti parametri cinematici, quali velocità ed accelerazioni, e geometrici, quali dimensioni ed inclinazione. Le sezioni ed i raccordi tra loro costituiscono il modello grafico della linea di assemblaggio.
- *Stazioni (Stations)*: punti in cui il carico può, se comandato da un processo, fermarsi, per poi riprendere a muoversi sul conveyor; sono utili per modellare le postazioni di lavoro.

Il *sistema Static* modella tutti gli elementi fisici fissi, sia importando files ACE, di cui al 6.2.4, sia files di altro tipo. Una notevole caratteristica di AutoMod è, infatti, la possibilità di supportare modelli grafici costruiti su differenti piattaforme. È possibile importare elementi tridimensionali direttamente dai software CAD o da qualsiasi altro sistema, purché scritto in IGES, VRML (Virtual Reality Modeling Language), STEP, DXF (Data eXchange File), o Open Inventor.

### **6.2.2 AutoMod Runtime.**

Grazie all'interazione tra l'Editor ed il Runtime, si completano la modellazione del processo ed il controllo della simulazione passo-passo. Il modello, per la verifica simulativa e statistica, viene costruito attraverso il Runtime, che permette la visione di ciò che viene elaborato, consentendo di verificare la necessità di modifiche strutturali od incongruenze con i moduli. E' possibile anche non visualizzare la simulazione (turn off Animate), quando si è interessati solo alle statistiche di processo. Si può inoltre bloccare la simulazione, per leggere le statistiche o visionare nello specifico una posizione od un'incongruenza. La simulazione può poi avvenire passo passo, leggendo riga per riga il file sorgente, il che consente un controllo maggiore sulla correttezza della scrittura della logica. Ogni qualvolta viene modificato il progetto, questo viene aggiornato nel Runtime, in quanto la simulazione viene costruita ad ogni lancio sul sistema logico del modello.

La simulazione consente una lettura dei rapporti prescelti, che di default vengono trascritti per ogni entità dinamica definita, suddividendoli in gruppi per tipologia di entità, quali code, risorse, stazioni conveyor, processi.

Risulta possibile seguire, istante per istante, l'andamento delle variabili anche tramite grafici definiti dall'utente, i *Business Graphs*, aggiornati di continuo.

Durante la simulazione sono visibili sia gli oggetti statici, sia gli oggetti dinamici.

Se si utilizza, come di solito accade, AutoMod per lo studio di sistemi stocastici, ogni run fornisce in output risultati differenti, pur partendo da input costanti, perché il modello, ad ogni lancio del run, genera numeri random secondo le distribuzioni di probabilità impostate dall'utente. Occorre pertanto, per ottenere risultati attendibili, lanciare molte volte il modello e processare statisticamente gli output, per trovarne le medie e gli intervalli di confidenza; per questo compito si rivela molto utile il software AutoStat, di cui al 6.2.4.

### **6.2.3 Sistema Kinematics.**

Il *sistema Kinematics* è un'espansione di AutoMod che permette di introdurre movimentazioni personalizzate in una simulazione. La logica del sistema prevede dapprima la costruzione in ACE di oggetti grafici tridimensionali con possibilità di movimento, ovvero con coppie cinematiche interne di cui siano stati definiti i parametri richiesti (velocità massima, valori estremali del range di variabilità del parametro di configurazione associato alla coppia cinematica, posizione).

Gli oggetti, importati nell'ambiente fisico Kinematics, sono interpretati come veicoli (*Vehicles*), ovvero sistemi di trasporto dei carichi; vengono, infatti, attivati solo mediante la salita su di essi di un load. Occorre definirne le configurazioni di base, corrispondendo ciascuna di esse ad una precisa combinazione dei valori dei parametri di traslazione e/o rotazione delle coppie cinematiche. Ciò effettuato, si definiscono dei percorsi (*Paths*), accoppiando a scelta le configurazioni di base, in modo che una costituisca la partenza del percorso mentre l'altra l'arrivo. La movimentazione del vehicle lungo il path è eseguita dal sistema come una sequenza di variazioni, a piccolissimi incrementi, dei parametri di configurazione, da quelli della configurazione di base di partenza a quelli dell'arrivo; in questo modo si percepisce un movimento fluido e continuo. Si può comandare l'azionamento dei vehicles, all'arrivo su di essi del carico, sia da apposite finestre del Kinematics stesso sia mediante il

source file, associando ad ogni configurazione una *Station* del tutto analoga a quelle del sistema Conveyor.

#### **6.2.4 AutoView, ACE, AutoStat.**

*AutoView* rappresenta la realtà virtuale, ovvero una presentazione formato film della simulazione prodotta. Viene creata quindi una animazione fluida e realistica, partendo dai modelli sviluppati con AutoMod. È necessario creare uno script che contiene la regia del filmato, all'interno della quale è possibile utilizzare la telecamera per muoversi all'interno del filmato, creare zoom di particolari o lavorazioni interessanti, il che permette una comprensione visiva ed immediata del comportamento del sistema. AutoView genera files in grado di esser letti su differenti piattaforme, avendo i filmati estensione <.avi> e <.mpg>.

*ACE* è un modulo integrativo di AutoMod che permette la costruzione di oggetti tridimensionali attraverso la composizione di figure solide elementari, di dimensioni e colore personalizzabili. Questi oggetti possono essere semplicemente entità grafiche statiche che aumentano il realismo visivo della simulazione, da importare nel modello nel sistema Static, oppure, con la definizione di opportune coppie cinematiche ad un grado di libertà (traslazionale o rotazionale) tra le varie figure elementari, rappresentare le entità mobili di un sistema, quali operatori o robot. In questo caso, l'oggetto costruito in ACE dovrà essere importato nel modulo Kinematics del modello per la definizione delle configurazioni principali e delle animazioni.

*AutoStat* è uno strumento molto potente per l'esecuzione automatica di analisi statistiche. Permette un'ampia gamma di analisi di simulazione:

- Determinazione dei tempi di warm-up, ovvero del tempo necessario al sistema per andare a regime.
- Determinazione degli intervalli di confidenza sui valori delle variabili di uscita.
- Analisi dei fattori di risposta e dei risultati operativi.
- Ottimizzazione delle strategie.

➤ Progetti di sperimentazione.

La possibilità di analisi consente anche un'analisi diretta dalla programmazione inscritta sulle macchine; una funzione delle statistiche è infatti la ricerca del valore ottimale dell'ingresso, per avere l'uscita desiderata. I valori dei parametri di ingresso sono modificabili direttamente su AutoStat, senza dover aprire AutoMod, permettendo così una ricerca di quelli idonei senza la necessità di continue modifiche del modello.

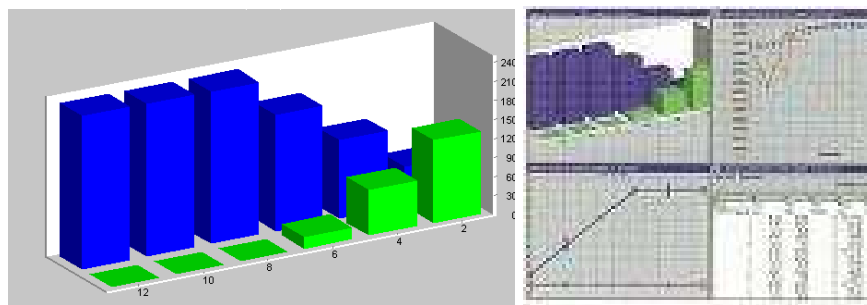


Figura 6.3 – Esempio di analisi AutoStat.

E' possibile visualizzare le statistiche sia direttamente dai rapporti (tabulati), sia tramite la costruzione di grafici personalizzati; entrambi possono riportare i valori sia dei parametri interessanti per un adeguato funzionamento del processo produttivo, sia dei parametri economici e finanziari; la possibilità di costruire dei grafici di questi ultimi permette una scelta immediata dell'investimento da affrontare.

Il prossimo capitolo, l'ultimo sarà dedicato, infine, all'applicazione reale di tali soluzioni in una linea di assemblaggio a carattere manuale.

## **Bibliografia**

A. MARTINI, 2007. *“Algoritmi per il problema generalizzato di bilanciamento delle linee di assemblaggio”*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia.

J.F. KOTTAS, H.S. LAU, 1981. *“A stochastic line balancing procedure”*. International Journal of Production Research, 19, 177-193.

R. GAMBERINI, A. GRASSI, B. RIMINI, 2006. *“A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem”*. International Journal of Production Economics, 102, 226-243.

J. BANKS, 2004. *“Getting started with AutoMod”, Second Edition*. Brooks Automation.

## 7 MODELLAZIONE E ANALISI DELLA LINEA.

Si apre ora la parte centrale del lavoro, che ripercorre il processo logico e cronologico che ha portato alla definizione di ipotesi, vincoli, priorità, analisi dei dati, ed è sfociato nella realizzazione di simulazioni per una linea di assemblaggio pompe oleodinamiche a pistoncini assiali. Per primo verrà presentato il sistema e verranno definite le caratteristiche ed i vincoli. Successivamente sarà impostato il problema, quindi si tratteranno le scelte e le fasi centrali e peculiari di tale studio.

La preparazione e l'impostazione di tale lavoro è nata nel 2009 quando la linea di assemblaggio in oggetto era in forze all'unità operativa *Fluid Power* della multinazionale *Comer Industries S.p.A.* Da dicembre 2010, questo *plant* produttivo è stato ceduto alla società francese *Poclain Hydraulics S.A.*, con la denominazione di *Poclain Hydraulics Industriale S.r.l.* La linea di assemblaggio è tuttora in funzione ed è stata in parte implementata con le prime indicazioni derivanti da tale studio. In ogni caso ci sembra doveroso delineare un breve profilo dell'azienda con cui è iniziata tale "avventura".

### **7.1 L'azienda: Comer Industries S.p.A.**

Il sistema a cui appartiene la linea di assemblaggio in oggetto potrebbe appartenere a moltissime aziende che realizzano manufatti per parti di media complessità con produzione di tipo ATO, quindi non per magazzino, con finestra di schedulazione di circa due settimane.

Nella fattispecie tale azienda progetta, produce e commercializza sistemi avanzati per la trasmissione di potenza, proponendo una linea completa di trasmissioni meccaniche, idrostatiche per l'industria delle macchine operatrici agricole ed industriali, e, recentemente per lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili, proponendo soluzioni per le turbine eoliche, trainata dal boom dell'eolico.

Il mercato principale è quello europeo (63%), seguono il Nord America (30%) ed il Resto del Mondo (7%) (dati riferiti al 2009).

Il gruppo è internazionale, così come il mercato di riferimento.

L'azienda ha ritenuto strategico e importante orientarsi alla filosofia *lean thinking* con l'obiettivo di eliminare gli sprechi e migliorare l'efficienza dei processi.

L'andamento del mercato è risultato altalenante negli ultimi anni, avendo subito fortemente di recente, dopo un periodo di sviluppo e crescita, la recente crisi, legata soprattutto al fermo del settore dell'edilizia.

Attualmente, vede una ripresa quasi completa dei propri livelli produttivi.

### **7.1.1 Operative Unit Fluid Power.**

L'Operative Unit Fluid Power (MO), è la divisione che produce sistemi oleodinamici.

La gamma di produzione si compone di pompe a pistoncini assiali a cilindrata variabile per circuiti chiusi e motori a pistoncini assiali a cilindrata fissa e variabile per circuiti aperti e chiusi, con elevata versatilità e varietà di comandi, destinati all'impiego su macchine operatrici mobili industriali e macchine per agricoltura e manutenzione professionale del verde.

La filiale oleodinamica non fa eccezione rispetto al resto del gruppo per quanto riguarda la filosofia produttiva, completamente orientata ad un approccio lean.

La messa in produzione delle pompe, infatti, avviene normalmente secondo la regola FIFO (*first in, first out*), ovvero segue rigorosamente la sequenza nella quale sono recepite le ordinazioni. I magazzini sono del tipo *a flusso tirato*, con pochi codici e ridotti tempi di giacenza.

Le parti di pompe, motori e motoruote che non reperibili in commercio sono prodotte e lavorate in loco; questa è la parte di processo produttivo effettuata in anticipo, su previsione e per il magazzino; le parti componenti sono il più possibile standardizzate, e comuni per i prodotti finali. Un altro magazzino è destinato a tutti gli elementi acquistati, che, dal trasporto su strada, arrivano direttamente ad esso, in attesa di essere utilizzati nell'assemblaggio.

Nelle linee di assemblaggio confluiscono i due tipi di componenti; i prodotti finiti vanno, infine, al collaudo e quindi alla spedizione.

Sono presenti due linee di assemblaggio, una delle pompe, con 6 postazioni, ed una per motori e motoruote, con 3 postazioni.

### **7.1.2 Pompe e loro linea di assemblaggio.**

Ci si focalizza ora sulla sola linea di assemblaggio delle pompe, che costituisce l'oggetto dell'analisi. Queste sono pompe a cilindrata variabile, a pistoncini assiali con sistema a piano inclinato, per trasmissioni idrostatiche in circuito chiuso; esse prevedono la variazione continua della velocità e regolano in modo ottimale potenza e coppia in funzione delle necessità, tramite servocomandi idraulici, meccanici, elettrici od elettronici.

Si tratta di sei famiglie di prodotti, caratterizzate da una denominazione alfanumerica senza riferimento preciso a parametri tecnici, ma di numero crescente al crescere di cilindrata, ingombri, pesi e complessità:

V0, V1, V100, V250, V450, V650

Oggi, con l'acquisizione da parte della multinazionale francese di cui accennavamo prima, la denominazione è cambiata in:

PM0, PM1, PM10, PM25, PM45, PM65

Tuttavia, per omogeneità di trattazione manterremo la denominazione in origine.

All'interno delle famiglie, poi, esistono molti codici diversi, dovuti alle personalizzazioni, optional e di servocomandi, di cui prevede la possibilità per un certo numero. In Tabella 7.1 si riporta, a titolo di esempio, la gamma delle V250. Ogni elemento della famiglia (elemento – riga, che di qui in avanti sarà denominato tipo o tipologia) richiede una precisa e specifica serie di operazioni da svolgere per essere realizzato, ed è completamente individuato dalla terna, unica per ciascuna riga, codice – comando – optional, che quindi definisce un codice di assemblaggio.

Tabella 7.1 – La gamma della famiglia di pompe V250.

Famiglia	Codice	Comando	Optionals
V250	1	MECCANICO	valvola scambio
V250	1	SERVO ELETTRICO	P.I.
V250	1	SERVO ELETTRICO	tandem
V250	1	SERVO ELETTRICO	tandem/P.I.
V250	1	SERVO IDRAULICO	filtro
V250	1	SERVO IDRAULICO	filtro/valvola scambio
V250	1	SERVO IDRAULICO	P.I.
V250	1	SERVO IDRAULICO	P.I./taglio press/valvola scambio
V250	1	SERVO IDRAULICO	taglio press
V250	1	SERVO IDRAULICO	taglio press/valvola scambio
V250	1	SERVO IDRAULICO	tandem/automotive/P.I.
V250	1	SERVO IDRAULICO	tandem/filtro
V250	1	SERVO IDRAULICO	tandem/P.I.
V250	1	SERVO MECCANICO	filtro/taglio press
V250	1	SERVO MECCANICO	tandem/filtro
V250	2	MECCANICO	no optional
V250	2	SERVO IDRAULICO	filtro/P.I./valvola scambio
V250	2	SERVO IDRAULICO	P.I./taglio press
V250	2	SERVO IDRAULICO	tandem/automotive
V250	2	SERVO MECCANICO	filtro
V250	3	SERVO ELETTRICO	valvola scambio
V250	3	SERVO IDRAULICO	tandem
V250	6	SERVO ELETTRICO	no optional
V250	6	SERVO MECCANICO	valvola scambio
V250	7	SERVO IDRAULICO	no optional
V250	10	SERVO MECCANICO	no optional

L'alternarsi sulla stessa linea di un così alto numero di varianti di prodotto, con tempi di esecuzione differenti, crea la necessità di giungere a compromessi per quanto riguarda la gestione della produzione, dovendo privilegiare nel bilanciamento alcune tipologie, tipicamente le più vendute, rispetto ad altre.

Si riporta, in Figura 7.1, la planimetria del reparto di assemblaggio.

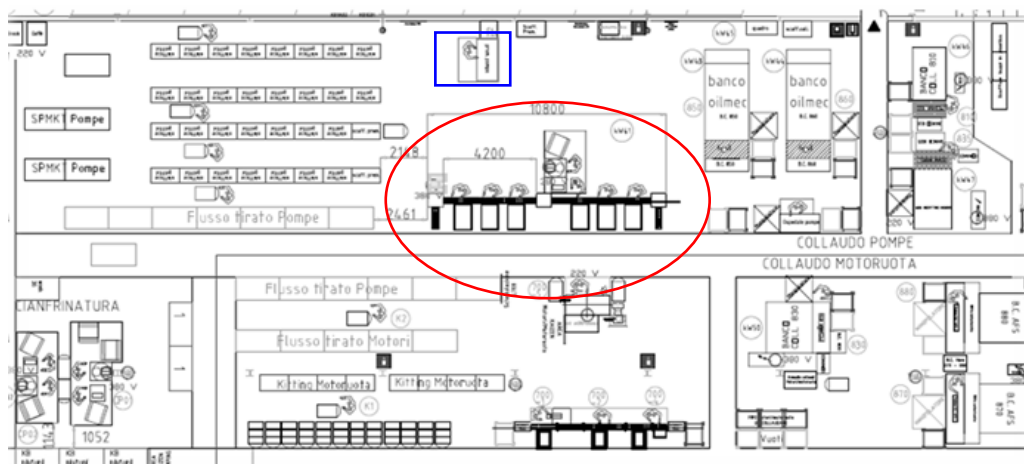


Figura 7.1- La linea di assemblaggio pompe a 6 postazioni.

In evidenza il reparto di assemblaggio delle pompe; in alto a sinistra si vede il banco di premontaggio (in quadrato blu), dove alcuni modelli devono subire degli step di assemblaggio di entrare nella stazione 1 di linea, in basso a sinistra, per ricevere alcune operazioni che non vengono eseguite, o per scelta dell'azienda, o per vincoli di processo, in linea. Per le pompe che, invece, non necessitano di premontaggio, i loro componenti entrano dal magazzino, direttamente in linea. Il flusso procede da sinistra verso destra, e, come si può vedere, la linea è suddivisa in 6 equidistanziate a gruppi di 3, ed è a layout rettilineo.

Da qui in poi, le postazioni saranno sempre individuate con i numeri naturali da 1 a 6, secondo l'ordine in cui le incontrano i prodotti.

Il numero delle postazioni scaturisce da considerazioni relative al takt time massimo in relazione al codice più critico dei mix produttivi, e alla produttività richiesta, all'esigenza di avere alcune attrezzature in posizioni di sequenza definite, abbinate quindi a postazioni definite, ad esigenze di flessibilità rispetto a tutte le varianti produttive.

## **7.2 Analisi preliminare del sistema produttivo.**

Il lavoro ha avuto inizio, con l'acquisizione e l'analisi dei dati relativi alla linea pompe. Questi dati, e sono organizzati in un foglio di lavoro Excel, che di fatto è un piano di produzione annuale, e riporta al variare delle righe tutte

le tipologie di prodotto, al variare delle colonne le informazioni relative a ciascuna di esse. Tali informazioni sono, nell'ordine di lettura:

- Famiglia.
- Numero di codice.
- Tipologia di comando.
- Optionals installati.
- Quantità annua prodotta.
- Tempi medi necessari per ogni singola operazione di premontaggio.
- Tempi medi per ogni singola operazione della stazione  $j$ ,  $1 \leq j \leq 6$ .

### **7.2.1 Analisi dei tempi.**

È stato necessario effettuare qualche valutazione sui dati relativi ai tempi di esecuzione delle singole operazioni, per valutare in ottica MTM,, come poterli considerare, come poter definire l'eventualità di qualche legge che ne descriva l'andamento al variare della tipologia di prodotto (che si ricorda, essere univocamente determinata dalla sequenza ordinata famiglia – codice – comando – optionals installati).

È emerso che i valori temporali su foglio di calcolo corrispondono alla media tra gli operatori, e sono da assumersi, risultato di un'analisi tempi e metodi già svolta all'interno dell'azienda, come tempi standard o valori centrali delle distribuzioni aleatorie di esecuzione. È risultato, a valle di queste osservazioni, accettabile per tutti i tempi di esecuzione poter considerare distribuzioni di probabilità triangolari quasi simmetriche, con valore modale uguale a quello riportato sul foglio di calcolo, e risultando gli altri due valori estremi della distribuzione a definire un range di variabilità pari almeno al 15% del valore modale.

La distribuzione triangolare, come altri casi la normale, e quella lognormale, risulta spesso nelle analisi dei tempi, e ben rappresenta la variabilità di tempi dell'attività manuale umana, con tempi di esecuzione minimi, non riducibili e occasionali, tendenza a esecuzioni più frequenti intorno al valore di moda, e tendenza a esecuzioni con tempi esecutivi

maggiori più discosti rispetto a quelli più anticipati, ma anch'essi occasionali e rari. Per questa distribuzione devono essere noti: valore di maggior frequenza, range con minimo e massimo. Una funzione distribuzione di probabilità triangolare (di cui si vede un esempio in Figura 7.2) è, infatti, caratterizzata dai seguenti parametri.

- *Valore modale*, ascissa corrispondente al vertice del triangolo, ovvero lì cade il maggior numero di casi (ordinata massima); è il valore più probabile tra tutti quelli che l'output può assumere.
- *Estremi inferiore e superiore* (Lower ed Upper, L ed U), in corrispondenza di cui ci sono gli altri due vertici del triangolo e rappresentano i valori estremi che l'output può assumere, con frequenza (ordinata) che tende a zero.
- *Range di variabilità*, differenza tra i due estremi.

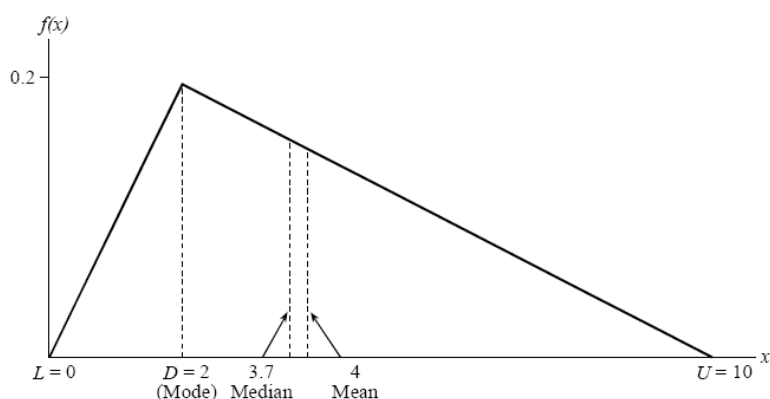


Figura 7.2 – Distribuzione di probabilità triangolare con range 10 e valore modale 2.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{b-a} \frac{x-a}{c-a} & x \in [a, c] \\ \frac{2}{b-a} \frac{b-x}{b-c} & x \in [b, c] \end{cases}$$

Se a, b, c rappresentano in ordine, il valore minimo, il valore di moda, e il valore massimo.

Analizzando la variazione dei tempi dei singoli tasks al variare della famiglia di pompa, troviamo che, a parte una sola eccezione, evidenziata in

arancione in Tabella 7.2, all'interno di ciascuna famiglia i tempi per eseguire una data operazione sono costanti; se è indicato zero, significa che quell'operazione non deve essere eseguita su quel prodotto nella postazione.

La variazione dei singoli tempi con la dimensione non assume una legge ben definita: alcuni tempi diminuiscono, altri crescono; altri, la maggior parte, presentano un andamento assolutamente irregolare. E', invece, abbastanza evidente, dall'osservazione del foglio, l'aumento del lead time totale con la dimensione, considerando anche il premontaggio. L'importanza percentuale del premontaggio, infatti, cresce notevolmente per le famiglie più grandi, che presentano tempi delle 6 stazioni di linea simili a quelli delle piccole, ma tempi di premontaggio paragonabili, come ordine di grandezza, al lead time di linea, cioè circa sei volte il tack time. Tale operazione, però, non deve essere considerata alla stessa stregua di un'operazione di linea, ma va supposto che ci sia un buffer interoperazionale tra postazione di premontaggio e postazione 1 di linea, che consenta di non curarsi del premontaggio e modellare la linea come priva di esso.

Si riportano in Tabella 7.2 i tempi dei tasks per famiglia, parametrizzati rispetto al task che presenta fra i sei il tempo maggiore, evidenziato in rosso; in verde, invece, sono evidenziati per ogni montaggio i tasks che presentano tempi compresi tra il 70% ed il 99% rispetto al maggiore.

Tabella 7.2 – Tempi necessari ai singoli tasks, fatto 100 il maggiore della riga.

attività\famiglia	V0	V1	V250	V450	V650
postazione 1					
operazione 1	0	0	0	100	0
2	0	0	100	93	0
3	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	100
5	51	100	43	35	0
postazione 2					
1	50	62	92	100	92
2	100	0	100	100	100
3	33	51	90	100	90
4	0	100	0	0	0
postazione 3					
1	100	100	0	0	0
2	78	78	100	0	0
3	0	0	0	100	0
4	0	0	100	0	0
5	0	0	73	100	73
6	0	0	100	0	0
7	0	0	0	100	0
postazione 4					

1	100	100	100	100	100
2	59	59	100	100	100
postazione 5					
1	78	78	100	100	100
2	100	100	81	0	0
3	100	100	0	0	0
4	100	100	90	51	90
5	83	83	100	100	100
postazione 6					
1	100	100	100	100	100
2	80	80	100	100	100
3	58	0	90	100	90
4	0	0	50	50 con un 100	50
5	100	100	100	100	100
6	100	100	0	0	0
7	100	100	100	100	100
8	100	100	0	0	0
9	0	0	100	100	100
10	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100

### 7.2.2 Analisi dei volumi produttivi.

Dall'analisi dell'andamento della produzione negli ultimi tre anni, è emerso chiaramente che la famiglia di gran lunga più venduta è la V0, e c'è una certa tendenza, non esprimibile mediante una legge semplice, di diminuzione delle unità vendute al crescere della dimensione.

I dati relativi alle V100 non sono stati considerati, poiché tale famiglia non compare nel foglio che riporta i tempi delle operazioni, quindi non si è in possesso degli strumenti per analizzarla: ci si è limitati a considerare la produzione come costituita unicamente dalle altre 5 famiglie. Dai grafici e dalle tabelle riassuntive dei trend commerciali si ricavano totali di vendite annue pre – crisi intorno alle x unità, mentre la somma delle quantità per singola tipologia del foglio tempi si attesta a circa  $(26/17)^* x$  unità. Confermato il rapporto di quantità tra produzione ordinaria e sotto produzione in periodo crisi, si sono moltiplicati i dati di ciascun prodotto per un fattore di  $17/26$ , arrotondando all'unità. D'ora in poi, tutte le quantità riportate saranno da considerarsi già ridotte di tale fattore.

### 7.2.3 Analisi dei vincoli.

Nel sistema reale sono emersi alcuni vincoli da non poter discutere, che hanno circoscritto il campo di indagine. Questi si dividono in vincoli dovuti alla disponibilità di attrezzature, difficili oppure onerose da modificare, vincoli di vario tipo.

*Vincoli di disponibilità di attrezzature:*

- Solo in postazione 4 c'è la macchina per la cianfrinatura.
- Solo in postazione 5 c'è l'avvitatore.
- Solo in postazione 6 c'è la macchina per la prova dell'aria.

*Vincoli decisi dalla politica aziendale:*

La logica di messa in produzione, come già detto, deve in generale essere la FIFO. L'unica eccezione ammissibile è il variare il criterio di schedulazione all'interno di finestre temporali molto ridotte, al massimo le 2 settimane che in genere intercorrono tra il recepimento dell'ordine e la data concordata di consegna DD.

Gli operatori sono schedulati per operare a intensità quasi piena, al limite limitandone i turni settimanali (devono essere massimizzati i loro coefficienti di utilizzazione).

La linea di produzione deve rimanere una, e la sua configurazione deve rimanere con l'attuale layout, vedere Figura , a causa della recentissima implementazione di un sistema di ritorno automatico dei pallet a gravità che, per non presentare complicazioni e costi eccessivi, richiede una linea dritta.

Si cerca di mantenere l'ultima postazione più scarica delle altre, per poter fronteggiare eventuali ritardi nelle prime postazioni, grazie all'operatore dell'ultima stazione che, se libero, può aggiungersi agli addetti alle postazioni di inizio linea, per aiutarli.

### **7.3 Costruzione del modello a risorse fisse.**

Avendo preso contatto, ed analizzato, i dati ed i processi fondamentali della linea di assemblaggio, si è cominciato a costruirne un modello mediante AutoMod.

L'elaborazione del modello è un processo che richiede continue modifiche, dovute o ad integrazioni, per ampliarne realismo e flessibilità, o alla correzione di veri e propri errori. Il modello ha pertanto assunto, durante il suo sviluppo, una grandissima quantità di configurazioni diverse. Per tale fase si è così deciso di illustrare solo il modello a numero di risorse fissato definitivo, e la sua evoluzione, quello a numero di risorse variabile e gestibile tramite foglio di lettura esterno. Di seguito viene descritto il primo.

#### **7.3.1 Sistemi Static e Conveyor.**

Si è partiti a modellare da questi due sottosistemi, perché sono quelli che presentano la minore esigenza di essere aggiornati al crescere della complessità del modello, in quanto rappresentano entità fisiche note e definite.

Con riferimento alla planimetria della linea fornita da Comer, si è innanzitutto costruito un sottosistema Conveyor, denominato "conv". Esso è costituito da due tratti raccordati, uno che va dalla stazione di premontaggio alla linea principale, ed uno corrispondente a quest'ultima. Le due sezioni sono di lunghezza (in *feet*) equivalente alle quote planimetriche; la velocità di trasferimento è alta per tener conto che i tempi di spostamento dei prodotti sulla linea sono già inclusi nei tempi medi forniti, quindi in trasferimento deve essere pressoché istantaneo. Le postazioni di lavoro sono modellate come stazioni di conveyor, una di premontaggio e sei in linea.

In Figura 7.3 e 7.4 si possono vedere, rispettivamente, le rappresentazioni grafiche dei sistemi Static e Conveyor, che sono rimasti invariati tranne nel caso di doppia linea.

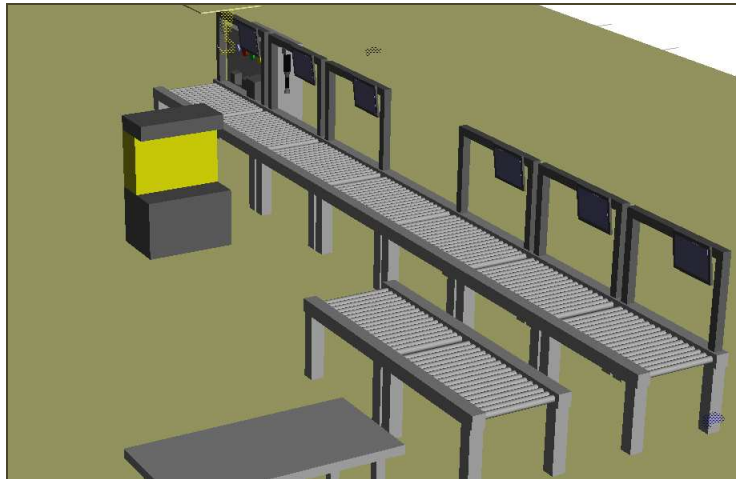


Figura 7.3 – Sistema Static.

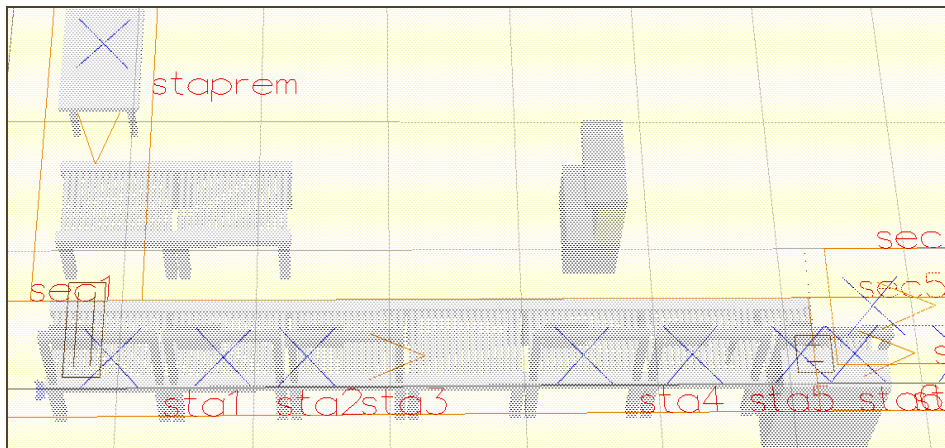


Figura 7.4 – Sistema Conveyor.

### 7.3.2 Sistema principale.

Il modello è stato è in grado di effettuare la lettura dei dati di tempo da file esterno <nome\_file>.CSV; il sistema Kinematics è dotato di animazioni ed assegnazione fissa dell'operatore alla stazione, per il modello del sistema reale attuale nella configurazione di regime, a 6 risorse.

Non è stata prevista all'interno del modello la possibilità di variare l'associazione dei tasks alle stazioni senza dover intervenire sulla struttura del modello stesso.

La lettura dei dati da file esterno conferisce al modello la flessibilità e possibilità di riconfigurare le operazioni ed i loro tempi direttamente sul file, o facendo caricare file diversi, con dati variati. In questo modo si ottiene una configurazione di simulazione diversa, che verifica l'opportunità di tale

modifica, senza, però, che sia cambiato nulla nel modello stesso. In pratica, si rende la struttura del modello indipendente dai dati che gli si forniscono in input.

Ogni valore numerico che viene letto sul foglio di testo è interpretato dal modello come valore di un *Load Attribute*, ovvero il modello acquisisce come valori caratteristici del load, che emula un item da produrre, i valori rappresentati in ognuna delle righe; tali valori, che rappresentano informazioni sulle caratteristiche dello specifico oggetto da produrre, verranno opportunamente impiegati nel processamento del load secondo i percorsi definiti nella logica del modello; tali percorsi variano in relazione alle caratteristiche indicate dai valori acquisiti in lettura.

Infatti, ad esempio, il load utilizza le risorse per un tempo che dipende dal valore numerico memorizzato nel corrispondente attributo, tempo necessario al completamento di quell'operazione. Sono stati definiti tanti attributi, quante sono le colonne di parametri necessari ad ogni simulazione, ad esempio, esiste un attributo di testo in cui viene stoccata l'informazione degli optionals da installare, seguito da un attributo di tempo per la prima operazione di premontaggio, e così via.

Le distribuzioni triangolari di probabilità sono più estese a destra che a sinistra, essendo tipica l'eventualità che un ritardo può essere anche ingente, mentre difficilmente si può essere molto in anticipo sul previsto; il valore di lettura del tempo definisce il valore modale della distribuzione, mentre il LBV (Lower Bond Value) si definisce il valore modale moltiplicato per 0,925 (decremento del 7,5%, come dai dati aziendali), e come UBV (Upper Bond Value) si definisce il valore modale moltiplicato per 1,15 (incremento del 15%, un po' più elevato rispetto a quello osservato in azienda).

Il modello è costituito dalle seguenti entità, riferite nel codice sorgente "logic.m":

*Risorse:*

- *R\_prem*: risorsa di premontaggio.
- *R*: risorsa di linea (array di 6).

*Code:*

- *Q\_in* (array di 2, una per l'ingresso in premontaggio, l'altra per l'ingresso in postazione 1): coda di ingresso in linea, a capacità infinita.
- *Q* (array di 6): coda di linea a capacità 2 carichi.
- *Q\_interop*: coda di bufferaggio tra premontaggio e postazione 1, a capacità infinita.

*Carichi:*

- *L\_V0*: carico reale corrispondente alla famiglia V0.
- *L\_V1*: carico reale corrispondente alla famiglia V1.
- *L\_V100*: carico reale corrispondente alla famiglia V100 (per futuri sviluppi, ma non utilizzato).
- *L\_V250*: carico reale corrispondente alla famiglia V250.
- *L\_V450*: carico reale corrispondente alla famiglia V450.
- *L\_V650*: carico reale corrispondente alla famiglia V650.
- *L\_dummy\_read* : carico fittizio che esegue il processo di lettura attributi.
- *L\_dummy\_pause*: carico fittizio che esegue la logica di pausa.
- *L\_dummy\_hook*: carico fittizio a forma di gancio per simulare il paranco.

I carichi presentano i seguenti attributi, riportati nell'ordine:

- *A\_nr*: attributo numerico che corrisponde al numero di pompe della riga da produrre.
- *A\_family*: attributo di testo che ha il nome di uno dei 6 carichi reali.
- *A\_code*: attributo numerico uguale al codice numerico della tipologia.
- *A\_comand*: attributo di testo che indica il tipo di comando della tipologia.
- *A\_optional*: attributo di testo che indica gli optionals della tipologia.
- *A\_nomedeltask*: tanti attributi di tempo, denominati ognuno con il nome abbreviato dell'operazione corrispondente.
- *A\_premtime*: attributo di tempo, somma dei tempi dei task del premontaggio.

- *A\_sta j time*: attributo di tempo, somma dei tempi dei task della stazione j.
- *A\_totalltime*: attributo di tempo, somma di tutti i tempi dei task; corrisponde al lead time teorico  $L_0$  della tipologia.

*Processi:*

- *model initialization function*: processo-funzione di avvio del modello;
- *P\_read*: processo di lettura dati e definizione attributi;
- *P\_prem*: processo di premontaggio (per eventuali sviluppi futuri, attualmente inibito, come detto, per assenza di carico che lo esegua);
- *P\_sta j*: processo di assemblaggio in stazione j,  $1 \leq j \leq 6$ ;
- *P\_hook*: processo di azionamento paranco a fine montaggio per V450 e V650;
- *P\_pause*: processo di pausa.

*Variabili:*

- *V\_endofdata*: variabile che indica la fine lettura dati quando settata su 1 anziché 0;
- *V\_toproducnr*: variabile che indica il numero totale di pompe da completare durante la simulazione, è la sommatoria di tutti gli *A\_nr*;
- *V\_productnr*: variabile che indica il numero totale di pompe completate dall'inizio della simulazione;
- *V\_day*: variabile che indica il giorno della settimana in cui ci si trova;
- *V\_productiontime*: variabile che corrisponde ad *ac*, *absolute clock*, tempo di simulazione.

I processi *P\_read*, *P\_hook* e *P\_pause* sono eseguiti dai rispettivi dummy loads, mentre gli altri sono eseguiti dai carichi effettivi, quelli corrispondenti ad una famiglia di pompe.

Durante il processo *P\_read*, il dummy load si carica degli attributi, tra cui *A\_family*, che stabilisce in che famiglia il dummy si deve trasformare; da *P\_read* escono tanti carichi di un tipo, quanti definiti da *A\_nr*. Quando il file di lettura si esaurisce, *V\_endofdata* viene settata su un valore che inibisce il ripetersi del ciclo di lettura.

Il processo P\_pause definisce il ciclo di pausa, che considera 10 turni settimanali, su 5 giorni, da 4 ore ciascuno, per un totale di 40 ore lavorative. Dopo 4 ore dall'inizio della simulazione, la linea si arresta per 1 ora e 30 min, pausa pranzo, per poi ripartire, e fermarsi di nuovo, dopo 4 ore, fino alle 24 ore dall'inizio della simulazione. La variabile V\_day, che parte da 1, aumenta di 1 ed il ciclo ricomincia, finchè V\_day = 6 (sabato): la linea si ferma per 2 giorni, finchè V\_day < 8; poi il ciclo della settimana ricomincia, con V\_day resettato ad 1. Infine, quando V\_productnr = V\_toproducentr, la simulazione termina.

### 7.3.3 Sistema Kinematics

Il sistema Kinematics, denominato "kin", è stato costruito con l'operatore ACE visibile nell'esempio in Figura , di cui sono state importate nel modello 7 copie (array a 7 dimensioni), che simulano i 6 operatori di linea, più l'addetto al premontaggio. Data la dispendiosità, in termini di tempo, della programmazione del sistema Kinematics, e non rilevanza per le osservazioni da realizzare, ci si è limitati a movimentazioni elementari.



Figura 7.5 – Operatore ACE, vehicle del sistema Kinematics

Per questo oggetto sono state definite un totale di 6 coppie cinematiche e 6 gradi di libertà: 3 di rotazione dell'intera figura attorno agli assi cartesiani x, y e z, e 3 di traslazione dell'intera figura lungo gli stessi assi. Non sono, quindi, disponibili movimentazioni interne all'operatore; in compenso, esso si muove con la massima libertà possibile come corpo rigido.

Sono state definite per tale operatore ACE, sulla base dell'osservazione delle movimentazioni degli operatori reali condotta in azienda, 5 configurazioni di base, denominate "Config i",  $1 \leq i \leq 5$ ; ad ogni "Config i" corrisponde la

stazione Kinematics “kin.sta i(k)”, dove k è il numero di array dell'operatore che si trova nella configurazione i. Ognuno dei 7 operatori dell'array può liberamente assumere tutte e 5 le configurazioni.

Queste sono:

- *Config1*: configurazione di riposo, operatore girato verso la linea e vicino alla stazione conveyor.
- *Config2*: operatore ruotato di 180° attorno all'asse verticale e traslato avanti rispetto alla Config1.
- *Config4*: operatore ruotato di 180° attorno all'asse verticale e traslato a sinistra rispetto alla Config1.
- *Config5*: operatore ruotato di 90° in senso antiorario attorno all'asse verticale e traslato indietro ed a sinistra rispetto alla Config1.
- *Config6*: operatore traslato avanti ed a sinistra rispetto alla Config1.

Nella movimentazione, l'entità vehicle che rappresenta l'addetto ad una determinata stazione assume solo le configurazioni necessarie alla simulazione della movimentazione in quella stazione. In particolare, l'operatore di premontaggio rimane fermo in Config1.

Gli operatori delle postazioni 1 e 2 rototraslano tra la Config1 e la Config2 per lavorare i loads anche dietro la linea (path bidirezionale tra 2 configurazioni); l'operatore della postazione 3 rimane fermo in Config1, così come quello della 6; l'operatore della 4 rototrasla, in doppio verso, fra la Config1, la Config4 e la Config5, per portare il carico sulla macchina per la cianfrinatura; infine, l'addetto alla 5 avanza dalla Config1 alla Config6 per arrivare all'avvitatore, poi torna indietro (2 configurazioni, path bidirezionale di pura traslazione).

I vehicles sono attivati dai carichi reali, mediante i comandi del codice sorgente che si riferiscono alle stazioni Kinematics.

#### **7.4 Definizione di piani di produzione con bilanciamento a risorse ridotte.**

A questo punto, avendo a disposizione un semplice modello, da utilizzare per lo studio della configurazione attuale della linea e di possibili interventi su di essa, è stato possibile, sulla base delle informazioni a disposizione, individuare le possibili strade di analisi e sviluppo.

In questa prima fase si è deciso di ottimizzare la linea tramite un bilanciamento, *sul numero di risorse*.

Eventuali scelte relative ad un *Bilanciamento sui contenuti di lavoro* (eventualmente applicando il metodo di Kottas – Lau), avrebbero obbligato alla ridefinizione dei processi, con un'attribuzione dinamica delle operazioni da svolgere nelle stazioni. Queste, infatti, diventerebbero funzione del carico che attraversa il sistema, dato che, come si è visto, i tempi di ciascuna postazione sono attualmente molto variabili a seconda della tipologia di pompa, per cui, in generale, ogni riga richiede uno studio ed un'ottimizzazione a sé.

La modalità di bilanciamento basata sulle risorse, è in parte analoga alla prima, se si considera di far variare non le operazioni assegnate alle stazioni, ma piuttosto gli operatori nell'implementazione, nel modello, dell'assegnazione dinamica alle stazioni. Anche in questo caso, quindi, occorre uno studio tipologia per tipologia.

Il *Bilanciamento sulla schedulazione*, prevede lo studio e l'ottimizzazione della sequenza delle righe del piano di produzione, nel tentativo, rompendo la limitazione di realizzare una unità alla volta in stazione, di far avanzare misti disponibile inizialmente in una configurazione con raggruppamenti per famiglia, e distribuite, all'interno di ciascuna famiglia, in modo casuale. Occorre, per far questo, mettere in discussione la logica di schedulazione FIFO all'interno delle 2 settimane.

In ogni caso, occorre utilizzare il modello come strumento di verifica finale di scelte di ottimizzazione effettuate fuori da esso, cioè sui fogli Excel e di testo dei piani di produzione.

### **7.4.1 Definizione delle priorità e scelta dell'intervento migliorativo.**

A causa della recente crisi, si è deciso nel primo modello di verificare una strategia di bilanciamento basata sulle risorse, per un livello produttivo ridotto.

Era risultato che la linea fosse spesso sovradimensionata rispetto alle esigenze reali, costringendo la produzione a funzionare, per mantenere un ritmo pieno, solo per tre giorni lavorativi settimanali.

Si è valutata la potenziale alternativa di schedulare la linea su una settimana intera, ma decrementando l'intensità del lavoro, o diminuendo il numero di operatori (risorse) chiamati al lavoro, o schedulandoli tutti, ma occupandoli meno del normale, con turni più brevi.

Quest'ultima ipotesi è quella che presenta la minore efficienza di processo, tant'è che, la sua esclusione è tra i vincoli aziendali. In ogni caso, la problematica di maggior urgenza è stata chiaramente identificata dal referente aziendale nell'analisi della linea sottoposta agli attuali carichi, ridotti.

Quindi si è voluto seguire, innanzitutto, la prospettiva di schedulare su settimana intera un numero di risorse ridotto, rimandando a successivi modelli le altre possibili modalità.

Si è deciso, cioè, di incentrare il lavoro sul bilanciamento delle risorse, nel caso che queste siano in numero inferiore a quello standard, e di procedere nel seguente modo.

Elaborazione di vari piani di produzione (scenari), che si distinguono tra loro per il numero di risorse impiegate ed i volumi produttivi; all'interno di ciascuno di essi, ottimizzazione dell'assegnazione delle risorse alle stazioni;

Parallelamente, implementazione di un modello capace di gestire la schedulazione dinamica delle risorse;

Disponendo sia dei piani di produzione, sia del modello, esecuzione di una simulazione per ciascuno scenario, per collezionarne dati significativi sui parametri fondamentali;

Infine, confronto dei vari piani con quello a volumi e risorse piene, per verificare l'effettiva convenienza del bilanciamento.

Il numero totale standard di risorse umane, sarebbe 7 includendo anche l'operatore al premontaggio; questo, sempre e comunque presente, non è considerato come facente parte della linea; di qui in avanti, ci si riferirà sempre al numero  $r$  di risorse come a quello degli operatori schedati in linea, dando per scontata la presenza, in premontaggio, di un ulteriore addetto.

Il presente Paragrafo tratta della definizione dei piani di produzione, rimandando al prossimo per la descrizione dello sviluppo del modello, e a successivi per l'analisi ed il commento dell'esecuzione delle simulazioni, e per il confronto e la verifica dei risultati.

#### **7.4.2 Scelta dei campioni di tempo e prodotti.**

Non essendo necessario studiare e bilanciare l'intero piano produttivo annuale, oltretutto, rappresentativo della situazione antecedente la crisi, si è scelto di circoscrivere l'ambito di indagine ad un mix produttivo ed ad orizzonti temporali ridotti rispetto ai globali, ma ugualmente significativi.

A tal fine si sono estratti dall'insieme di tipologie di pompe quelle rispondenti ai criteri della rilevanza del volume produttivo e dello sbilanciamento, e simulare di mandare in produzione solo queste, nella quantità necessaria a saturare un mese di calendario (22 giorni lavorativi).

Si sono dunque scelti i prodotti da inserire nel piano di produzione, e da studiare, secondo i seguenti criteri:

- Pompe prodotte in numero non inferiore alle 700 unità annue;
- Pompe con coefficiente di sbilanciamento, rapporto tra il tempo impiegato nella stazione più veloce e quello impiegato nella stazione più lenta, non superiore a 0,2.

Secondo questi criteri, le tipologie selezionate sono risultate essere le seguenti (i tempi reali sono moltiplicati, per riservatezza, per uno stesso fattore non riportato, ed espressi in secondi).

Tabella 7.3 – Prodotti selezionati per l'analisi della linea.

unità prod. annue	famiglia	Codice	comando	optionals	tempo post 1	tempo post 2	tempo post 3	tempo post 4	tempo post 5	tempo post 6	coeff. di sbil.	tempo di uscita
700	V0	11	MECCANICO	no optional	277	118	0	355	407	216	0,29	407
767	V0	8	RITORNO A ZERO	by pass leva	277	118	219	355	407	298	0,29	407
930	V0	1	MECCANICO	by pass leva/P.I.	277	118	0	355	407	378	0,29	407
1029	V0	9	RITORNO A ZERO	tandem	277	118	219	355	407	266	0,29	407
1145	V0	2	RITORNO A ZERO	by pass man/P.I.	277	118	219	355	407	342	0,29	407
2053	V0	5	MECCANICO	P.I.	277	118	0	355	407	296	0,29	407
2564	V0	18	RITORNO A ZERO	tandem/P.I.	277	118	219	355	407	346	0,29	407
1	V650	1	SERVO ELETTRICO	filtro	65	257	101	383	331	422	0,15	422
1	V650	1	SERVO ELETTRICO	filtro/valv. scambio	65	257	101	383	331	422	0,15	422
1	V650	1	SERVO MECCANICO	filtro/microinterr	65	257	101	383	331	422	0,15	422
1	V650	1	SERVO IDRAULICO	P.I.	65	257	0	383	331	419	0,16	419
1	V650	1	SERVO IDRAULICO	P.I./taglio press/valv.scambio	65	257	0	383	331	476	0,14	476
1	V650	1	SERVO IDRAULICO	tandem/P.I./valv.scambio	65	257	0	383	331	469	0,14	469
3	V650	1	SERVO MECCANICO	microinterr/valv.scambio	65	257	101	383	331	319	0,17	383
4	V650	1	SERVO MECCANICO	filtro/valv.scambio	65	257	0	383	331	422	0,15	422
7	V650	2	SERVO IDRAULICO	filtro/valv.scambio	65	257	0	383	331	422	0,15	422
8	V650	2	SERVO MECCANICO	valv.scambio	65	257	0	383	331	319	0,17	383
9	V650	1	SERVO IDRAULICO	taglio press/valv.scambio	65	257	0	383	331	376	0,17	383
10	V650	1	SERVO IDRAULICO	filtro	65	257	0	383	331	422	0,15	422
10	V650	2	SERVO IDRAULICO	tandem	65	257	0	383	331	369	0,17	383
11	V650	2	SERVO ELETTRICO	no optional	65	257	101	383	331	319	0,17	383
11	V650	2	SERVO	no optional	65	257	0	383	331	319	0,17	383

			IDRAULICO									
20	V650	1	SERVO IDRAULICO	tandem/filtro/P.I	65	257	0	383	331	572	0,11	572
29	V650	5	SERVO MECCANICO	no optional	65	257	0	383	331	319	0,17	383
90	V650	1	SERVO ELETTRICO	valv.scambio	65	257	101	383	331	319	0,17	383

Come si può notare dalla tabella, in cui sono evidenziati in rosso i valori dei parametri che rispondono ai criteri di selezione, non sono risultate presenti tipologie che rispondessero contemporaneamente ad entrambi i criteri di selezione. Le prime, su sfondo azzurro, si caratterizzano, infatti, solo per i volumi produttivi elevati, le altre, su sfondo verde, solo per i bassi coefficienti di sbilanciamento. Le 7 più vendute, inoltre, sono tutte V0, mentre le 18 più sbilanciate sono tutte V650; si può così assumere, visto che sono presenti rappresentanti delle due famiglie estremi, per dimensioni, complessità e tempi, della gamma, che la porzione di mix produttivo (25 tipi su 127) così estrapolata rappresenti abbastanza bene l'intera gamma.

### 7.4.3 Criteri di accorpamento delle stazioni.

Selezionate le tipologie più rilevanti, si sono cercati criteri per assegnare più stazioni ad una determinata risorsa (operatore), nel caso di linea operante a ridotto numero di risorse, in modo da massimizzare la saturazione degli operatori.

Data la grande varietà di casi, non è stato possibile individuare un unico, efficace, criterio di bilanciamento, ma se ne sono definiti due, applicabili, alternativamente, a seconda del valore assunto dal rapporto fra tempo totale assegnazione task dall'assegnazione per operatore di attività relative a più stazioni, ed il tempo di uscita originario.

I parametri di riferimento per il bilanciamento a risorse ridotte sono il tempo di uscita ed il tack time, che si ricordano essere rispettivamente il tempo necessario alla stazione più lenta, e quello ottenuto dividendo il tempo di attraversamento teorico per il numero di stazioni.

Si sono individuate le seguenti situazioni.

- Nel caso in cui siano presenti due o più stazioni particolarmente veloci, in modo tale che la somma dei loro tempi, da qui in poi indicata come *tempo somma*, sia superiore di poco, non più del 20%, od addirittura inferiore, al tempo di uscita della configurazione a risorse complete, si accorpano queste due o più stazioni. In questo modo, la linea mantiene, se il tempo somma è inferiore, la cadenza originaria; se tale tempo è, invece, di poco superiore, la cadenza aumenta leggermente (al limite, del 20%), ma si lavora con una risorsa in meno, e, quindi, quelle presenti denoteranno presumibilmente coefficienti di utilizzazione incrementati.
- Nel caso in cui il numero di risorse sia ridotto rispetto a quello completo da risultare impossibile assegnare allo stesso operatore attività relative a stazioni diverse in modo che tutti i tempi somma rimangano inferiori o di poco superiori al tempo di uscita, si deve considerare, come nuovo parametro di riferimento per l'accorpamento delle attività, il tack time ottenuto dividendo il lead time teorico per il numero, minore dello standard, di risorse disponibili. Si cerca di far sì che i tempi sommati si avvicinino il più possibile ad esso, accoppiando la stazione più veloce con quella più lenta, poi la seconda più veloce con la seconda più lenta, e così via.

Nel caso specifico della linea in esame, è risultato tendenzialmente opportuno, data la presenza, si veda la Tabella 7.4, di stazioni fortemente sotto-caricate, applicare il primo metodo alla schedulazione a 5 risorse ed anche a quella a 4, mentre è risultato più frequentemente adeguato il secondo per gli scenari a 3 ed a 2 risorse, basandosi sui valori di confronto dei tack time ricalcolati.

Con riferimento all'ordine della Tabella 7.4 per quanto riguarda le tipologie campione, la loro sequenza ed i loro tempi nelle 6 postazioni standard, l'analisi dei tempi delle attività nelle singole postazioni ha suggerito l'accorpamento delle stazioni, secondo i criteri già esposti. Di cui non riportiamo, in tale trattazione, tutte le tabelle, ma solo a titolo di esempio quella a 4 risorse.

Tabella 7.4 – Risultato dell'unione di più postazioni nel caso a 5 risorse.

tempo 2+3	tempo 1+3	nuovo tempo di uscita
118		407
337		407
118		407
337		407
337		407
118		407
337		407
	166	422
	166	422
	166	419
	65	476
	65	469
	65	422
	166	383
	65	422
	65	422
	65	383
	65	383
	65	422
	65	383
	166	383
	65	383
	65	572
	65	383
	166	383

Tabella 7.5 – Risultato dell'unione di più postazioni nel caso a 4 risorse.

tempo 1+3	tempo 2+4	tempo 2+6	tempo 1+2	tempo 3+6	tempo 1+2+3	tempo 2+3	tempo 1+5	tempo 1+6	nuovo tempo di uscita
277		334							407
496		416							496
277	473								473

			395	485					485
496		460							496
			395	296					407
496		464							496
						358	396		422
						358	396		422
						358	396		422
					322				419
					322				476
					322				469
						358		384	384
					322				422
					322				422
					322				383
					322				383
					322				422
					322				383
						358		384	384
					322				383
					322				572
					322				383
						358		384	384

#### 7.4.4 Determinazione dei volumi produttivi nel tempo di riferimento.

Si è calcolato il numero di pompe da produrre per saturare un mese nel seguente modo.

Noto il quantitativo annuale di ciascun tipo, lo si è diviso per i 220 giorni lavorativi annui, ottenendo, così, il numero medio di pompe di quel tipo prodotte in un giorno lavorativo.

Questo risultato è stato moltiplicato per il tempo di uscita del prodotto della configurazione standard a 6 risorse, trovando il tempo medio giornaliero dedicato alla produzione di quel tipo.

Sommando tutti i tempi giornalieri medi dei 25 tipi studiati, si è ottenuto il tempo medio giornaliero dedicato alla produzione del piano di partenza delle selezionate secondo i criteri scelti.

A questo punto, è bastato moltiplicare le singole quantità giornaliere per il rapporto (ore lavorative totali mensili / ore medie giornaliere dell'intero piano), per determinare le singole quantità mensili secondo le proporzioni di produttività annuale.

Si sono poi moltiplicati i numeri così ottenuti per i rapporti 5/6, 4/6, 3/6, 2/6, corrispondenti ad una riduzione di produzione proporzionale all'incrementale riduzione di risorse, e che, in percentuale, risultano pari a circa 83%, 67%, 50% e 33%. Tali risultati (necessariamente arrotondati all'unità) costituiscono i volumi produttivi scelti per confrontare gli scenari a risorse ridotte con quelli a risorse piene. Infatti, se i tempi di uscita crescessero, come in teoria, linearmente al calare del numero di risorse, il tempo impiegato per produrre N pompe con 6 risorse dovrebbe essere uguale a quello impiegato dalla medesima linea a produrre  $N \cdot (r/6)$  pompe con r risorse.

In questo modo, si sono determinate le seguenti quantità mensili.

Tabella 7.6 – Numeri di pompe per saturare un mese a 6 risorse, e loro sottomultipli.

famiglia	codice	comando	optionals	q.tà	q.tà	q.tà	q.tà	q.tà
				mensili	mensili	mensili	mensili	mensili
				100%	83%	67%	50%	33%
V0	11	MECCANICO	no optional	126	105	84	64	42
V0	8	RITORNO A ZERO	by pass leva	138	115	92	69	46
V0	1	MECCANICO	by pass leva/P.I.	168	140	112	84	56
V0	9	RITORNO A ZERO	tandem	186	155	124	93	62
V0	2	RITORNO A ZERO	by pass man/P.I.	206	172	137	103	69
V0	5	MECCANICO	P.I.	370	308	247	185	123
V0	18	RITORNO A ZERO	tandem/P.I.	463	386	309	232	154

V650	1	SERVO ELETTRICO	filtro	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO ELETTRICO	filtro/valv.scambio	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO MECCANICO	filtro/microinterr	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO IDRAULICO	P.I.	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO IDRAULICO	P.I./taglio press/valv.scambio	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO IDRAULICO	tandem/P.I./valv.scambio	0	0	0	0	0
V650	1	SERVO MECCANICO	microinterr/valv.scambio	1	1	1	1	0
V650	1	SERVO MECCANICO	filtro/valv.scambio	1	1	1	1	0
V650	2	SERVO IDRAULICO	filtro/valv.scambio	1	1	1	1	0
V650	2	SERVO MECCANICO	valv.scambio	1	1	1	1	0
V650	1	SERVO IDRAULICO	taglio press/valv.scambio	2	2	1	1	1
V650	1	SERVO IDRAULICO	filtro	2	2	1	1	1
V650	2	SERVO IDRAULICO	tandem	2	2	1	1	1
V650	2	SERVO ELETTRICO	no optional	2	2	1	1	1
V650	2	SERVO IDRAULICO	no optional	2	2	1	1	1
V650	1	SERVO IDRAULICO	tandem/filtro/P.I.	2	2	1	1	1
V650	5	SERVO MECCANICO	no optional	5	4	3	3	2
V650	1	SERVO ELETTRICO	valv.scambio	16	13	11	8	5
totale pompe mensili				1694	1414	1129	851	565

Pertanto, sono stati in tutto definiti 9 piani di produzione, facendo variare il numero di risorse e le quantità mensili di ciascuna tipologia. I piani di produzione così ottenuti si riferiscono ai seguenti scenari.

*Scenari a risorse piene*

6 risorse:

produzione al 100% (*configurazione di riferimento o standard*);

produzione all'83%;

produzione al 67%;

produzione al 50%;  
produzione al 33%.

*Scenari a risorse ridotte*

5 risorse e produzione all'83%;  
4 risorse e produzione al 67%;  
3 risorse e produzione al 50%;  
2 risorse e produzione al 33%.

I confronti di verifica si svolgeranno, come si vedrà nel Paragrafo 4.7, tra scenari a pari percentuale di produzione.

## **7.5 Costruzione del modello a risorse variabili.**

Come precedentemente descritto, il lavoro si è articolato sullo sviluppo parallelo di piani di produzione bilanciati, trattati nello scorso Paragrafo, da un lato, e di un ampliamento del modello per renderlo maggiormente flessibile, in quanto capace di simulare un'attribuzione dinamica degli operatori alle stazioni, dall'altro. Il presente Paragrafo descrive l'implementazione delle modifiche al modello a risorse fisse, o *modello base*.

### **7.5.1 Integrazioni effettuate.**

Si è intervenuti sulla preesistente struttura del modello a risorse fisse, mantenendo tutte le entità descritte nel Paragrafo 4.3, ed introducendo nuovi processi di controllo e movimentazione, e variabili ad essi associate, che non risultavano necessari nel modello base.

*Sistema di identificazione operatori*

Per favorire la logica di assegnazione degli operatori alle stazioni nello sviluppo del modello, è stata, innanzitutto, introdotta la seguente convenzione di denominazione. Ogni operatore è individuato da un numero

naturale  $k$ , in sequenza completa a partire da 1: se si definisce  $r$  il numero di risorse ( $r \leq 6$ ), ci sono  $r$  operatori, i cui numeri identificativi vanno da 1 ad  $r$  in ordine: se si simula, ad esempio, uno scenario a 2 risorse, non potranno lavorare sulle 6 stazioni gli operatori 2 e 5, o qualsiasi altra combinazione, ma solo l'1 ed il 2, anche se la stazione 2 dovesse essere già assegnata all'1. Una stazione identificata dal numero naturale  $j$  può essere associata solo ad operatori con numero  $k \leq j$ .

Alla stazione 1, quindi, non può che corrispondere l'operatore 1; alla 2 possono andare solo l'1 ed il 2, e così via fino alla postazione 6, che invece li può ricevere tutti.

#### *Interventi sul sistema Kinematics*

Sulla base della convenzione appena esposta, si è provveduto a garantire la possibilità ad ogni operatore  $k$  di spostarsi in tutte le stazioni  $j$ , con  $k \leq j \leq 6$ . Dapprima si è introdotta la *Config3*, che precedentemente non si era descritta. Essa corrisponde all'allontanamento dell'operatore a grande distanza, e simula l'operatore  $k$ , addetto alla stazione  $j = k$  nel caso standard, quando si deve spostare, praticamente uscendo dal sistema, perché non schedato, ovvero rimpiazzato, a risorse ridotte, da un altro operatore  $k'$ ,  $k' < j$ , e non chiamato in nessun'altra stazione (si ricordi che la denominazione degli operatori implica, a risorse ridotte, la corrispondenza non con il progressivo di stazione, ma solo con l'ordine nel gruppo degli operatori schedati).

Si sono, poi, introdotte molte nuove configurazioni dell'operatore ACE, ottenute traslando, rispetto alla configurazione di riposo, ovvero le 6 di base, di una distanza pari a quella che separa le stazioni.

Se le 6 configurazioni erano in origine identificate dai numeri da 1 a 6, ora si introduce nella classificazione una seconda cifra decimale che appoggia l'indicazione del numero di posti di cui l'operatore trasla rispetto alla sua stazione di riferimento. Ad esempio, se l'operatore 4 deve andare a lavorare, in uno scenario a 4 risorse, in postazione 6, dovrà spostarsi nella posizione che è definita dalla sua *Config21*, è corrispondente e sovrapposta alla

Config1 dell'operatore 6, ed è traslata di 2 stazioni rispetto alla Config1 dell'operatore 4. Il salto di valore della seconda cifra (2), quella delle decine, è doppio tra le stazioni 3 e 4, perché, la distanza tra loro è praticamente doppia rispetto a quella standard.

*Interventi sul sistema principale*

Garantite le definizioni di stati di movimento agli operatori, si è passati a definire processi che le attuassero.

In primis, è stato necessario aggiungere tra gli attributi di ciascun load l'informazione relativa all'operatore da utilizzare in ogni stazione; per appoggiare questa informazione di schedulazione si è definito un vettore riga di numeri interi, definiti secondo il sistema di numerazione di cui sopra, array a 7 dimensioni dell'attributo numerico semplice denominato "A\_op\_in\_sta". Quest'operazione ha richiesto la definizione nel piano di produzione Excel delle 6 colonne contenenti numeri che designano gli operatori da utilizzare nella stazione di premontaggio ed in quelle da 2 a 6, essendo scontata la presenza, in postazione 1, dell'addetto 1. Queste celle aggiuntive sono riportate in Tabella 7.7, sempre con riferimento alla Tabella 7.6 per le informazioni sulla tipologia a cui si riferisce ogni riga.

Tabella 7.7 – Vettori riga di attributi A\_op\_in\_sta inseriti nei piani di produzione.

5						4					
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	2	3	4
7	2	2	3	4	5	7	1	2	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	1	2	3	4	2
7	2	2	3	4	5	7	2	1	3	4	2
7	2	1	3	4	5	7	2	2	3	1	4
7	2	1	3	4	5	7	2	2	3	1	4
7	2	1	3	4	5	7	2	2	3	1	4
7	2	1	3	4	5	7	2	2	3	1	4
7	2	1	3	4	5	7	1	1	2	3	4

7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5
7	2	1	3	4	5

7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	2	2	3	4	1
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	2	2	3	4	1
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	1	1	2	3	4
7	2	2	3	4	1
7	2	2	3	4	1

3

7	2	3	2	3	1
7	2	3	2	3	1
7	2	3	3	2	1
7	2	3	1	3	2
7	2	3	3	2	1
7	2	3	3	2	1
7	2	3	2	3	1
7	2	3	3	2	1
7	2	3	3	2	1
7	2	3	3	2	1
7	2	3	1	2	3
7	2	3	1	2	3
7	2	3	1	2	3
7	2	3	1	3	2
7	2	3	1	2	3
7	2	3	1	2	3
7	2	3	3	1	2
7	2	3	3	2	1
7	2	3	1	2	3
7	1	3	3	2	1

2

7	2	1	2	1	2
7	2	1	2	1	2
7	2	1	1	2	2
7	1	2	1	2	2
7	1	2	2	1	2
7	2	1	1	2	2
7	1	2	1	2	2
7	2	1	1	2	2
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
7	1	2	2	1	2
7	1	2	2	2	1
7	1	2	1	2	2
7	1	2	2	2	1

7	2	3	1	3	2
7	2	3	3	1	2
7	2	3	1	2	3
7	2	3	3	1	2
7	2	3	1	3	2
7	2	3	1	3	2
7	2	3	1	3	2
7	2	2	1	2	1
7	1	2	2	1	2
7	2	2	1	1	2
7	1	2	2	1	2
7	2	2	1	2	1
7	2	2	1	2	1

Le pompe effettive relative al piano di produzione sono le 25 comprese tra le due linee nere a tutta larghezza; le righe iniziali e quelle finali, esterne alle linee, sono dovute alle esigenze, rispettivamente di definire il numero di risorse da tenere disponibili, e di terminare il ciclo di lettura.

La prima esigenza è dovuta al fatto che, nel lanciare un piano di produzione, od una sua parte, per la quale il numero di risorse impiegate rimanga costante, il primo carico della serie deve portare con sé l'informazione di quante risorse servono a quel lotto, in modo renderle disponibili, a parità di modello generale, e non falsare le statistiche. Per questo si è conferito ad ogni load l'attributo numerico "A\_delta\_R\_nr", diverso da 0 per il primo e 0 per gli altri, che indica la differenza tra le risorse necessarie a quel load e quelle necessarie al precedente; il modello assume sempre come configurazione di riferimento quella a 6 risorse.

Quindi, ad esempio, in un piano che presenta un lotto a 4 risorse ed uno a 5, il primo carico avrà  $A\_delta\_R\_nr = -2$ , tutti gli altri della prima serie avranno tale attributo nullo, finché non arriva il primo del secondo lotto con  $A\_delta\_R\_nr = 1$ , poi ancora tutti 0.

Il modello è in questo modo capace di gestire variazioni di numero di risorse impiegate anche all'interno di una singola simulazione. Comunque, non si è sfruttata questa possibilità, perché i piani di produzione costruiti sono tutti a numero di risorse costante: pertanto, nella definizione dei piani di produzione, l'unico carico con  $A\_delta\_R\_nr < 0$  è il primo, che è stato estratto dalla prima riga del piano effettivo, proprio per l'esigenza del modello di definire la variazione di risorse rispetto al caso standard; la quantità che gli viene attribuita è unitaria, ed il valore di  $A\_delta\_R\_nr$  risulta, nei piani di

produzione qui definiti, minore di zero, e pari alla differenza tra il numero di risorse schedare nello scenario da testare e 6.

Questo valore costituisce, quindi, l'inizializzazione delle risorse da impiegare nello scenario corrente.

La seconda esigenza consiste nell'inserire a fine tabella un carico qualsiasi che debba esser prodotto in 0 unità, per assicurarsi che il modello non rischi di continuare a replicare, come a volte accade, i loads dell'ultima riga all'infinito, e non terminare così la simulazione.

Si esamina ora la complessa logica che si attiva ad ogni postazione. Il carico, nell'arrivare alla stazione  $j$ , è sottoposto ad una verifica del valore dell'attributo  $A_{op\_in\_sta}(j)$ ; in base al valore  $k$  di quest'attributo, si avvierà un processo di chiamata dell'operatore  $k$  a lavorare in stazione  $j$ . Tale chiamata si completa solo se l'operatore  $k$  non è già impegnato in qualche altra stazione, quindi occorre attivare un controllo sullo stato del vehicle desiderato.

Se  $k < j$ , l'addetto selezionato  $k$  deve andare in una stazione che in configurazione standard a 6 risorse non è sua: bisogna allontanare l'operatore  $j$  dalla propria stazione, mandandolo nella sua Config3, a meno che l'operatore  $j$  non sia già lontano dalla propria stazione; tutto ciò richiede un processo di controllo. Quando, poi, l'operatore  $k$  è libero, bisogna andarlo a richiamare dalla posizione in cui si trova, che può essere la stazione  $j$  stessa, una stazione  $j' \neq j$ , oppure la sua Config3; se  $k$  non era già in postazione  $j$ , la deve raggiungere, il che richiede un certo tempo, durante il quale il vehicle deve risultare per altri carichi come occupato, per non essere intercettato da eventuali chiamate da parte di altri load, contemporaneamente presenti in linea, che lo reclamino.

Attuati tutti questi processi, l'operatore  $k$  è finalmente pronto per lavorare nella postazione  $j$ , e dovrà restare occupato per tutto il tempo dell'esecuzione dei tasks, dopodiché dovrà essere di nuovo libero. Se  $k < j$ , durante il lavoro del vehicle  $k$  dovrà comparire attiva la risorsa associata all'operatore, cioè la  $k$ , e dovrà risultare non schedata la risorsa  $j$ , quella associata, in configurazione a risorse piene, alla stazione  $j$  stessa. Quest'ultima risorsa

può, però, essere riattivata, durante la permanenza dell'operatore  $k$ , se richiamata in modo analogo da parte di una postazione  $j' > j$  in cui sta lavorando un operatore  $k' = j$ .

Per realizzare questa serie di controlli sono stati introdotti i processi e le variabili di cui al seguito.

### 7.5.2 Modello finale

Per l'esecuzione dei processi relativi a logiche di controllo, per gli operatori, per il processo di lettura, per la definizione di turni di lavoro e pause, eccetera, si sono introdotti i seguenti dummy loads.

- *L\_dummy\_hide*: carico fittizio che esegue l'allontanamento ed il riavvicinamento alla linea degli operatori, "salendo" su di essi.
- *L\_dummy\_call*: carico fittizio che esegue i processi di chiamata dell'operatore necessario in una certa stazione.
- *L\_dummy\_delta*: carico fittizio che esegue i processi di variazione del numero di risorse disponibili.

Per la attivazione delle logiche di controllo, si sono introdotti i seguenti processi.

- *P<sub>j</sub><sub>k</sub>*: processo, attuato dal carico reale, cioè la specifica pompa, che definisce le operazioni che devono essere svolte sul load stesso che attiva il processo, in stazione  $j$  dall'operatore  $k$  ( $1 \leq k \leq r$ ;  $1 \leq j \leq 6$ ; si ricorda  $r$  essere il numero di risorse, fino a 6, e  $n = 6$  il numero di postazioni); prima che possa esser completato, devono avvenire i due processi seguenti, per i quali viene creato un *L\_dummy\_call*.
- *P<sub>call</sub> j<sub>k</sub>*: processo, attuato da *L\_dummy\_call*, che chiama l'operatore  $k$  in stazione  $j$ ; occorre distinguere le operazioni successive sulla base dell'ultima posizione occupata dall'operatore  $k$  (definita dalla variabile  $V_{ls\_op}(k)$ ); un controllo manda il dummy al prossimo processo di indice  $j'$  adeguato.

- $P_{kin\ k_j'j}$ : processo, attuato da  $L\_dummy\_call$ , che sposta il vehicle  $k$  dalla stazione Kinematics corrispondente alla stazione  $j'$ , a quella della stazione  $j$  in cui è atteso.
- $P_{hideop\ k} / P_{recallop\ k}$ : processi, attuati da  $L\_dummy\_hide$ , che, rispettivamente, portano l'operatore  $k$  nella sua Config3, qualora non sia necessario a nessuna postazione, e da lì lo richiamano.
- $P_{deltaup} / P_{deltadown}$ : processi, attuati da  $L\_dummy\_delta$ , rispettivamente di incremento e decremento del numero di risorse disponibili.

Si sono introdotte le seguenti variabili.

- $V_{ctrl\_op}(k)$ : variabile che assume valore 1 quando l'operatore  $k$  è impegnato a spostarsi o a lavorare un load in una postazione, 0 altrimenti.
- $V_{ctrl\_R\_call}(k)$ : variabile che assume valore 1 quando è in corso la chiamata dell'operatore  $k$  da parte di una certa postazione, 0 altrimenti.
- $V_{ctrl\_hide\_op}(k)$ : variabile che assume valore 1 quando l'operatore  $k$  è nella sua Config3, ovvero in  $kin.sta3(k)$ , 0 altrimenti.
- $V_{ls\_op\ k}$ : variabile che assume il valore  $j$  dell'ultima postazione (last station,  $ls$ ) occupata dall'operatore  $k$ .
- $V_{op\_in\_sta}(j)$ : variabile che assume il valore  $k$  del vehicle presente in postazione  $j$ .
- $V_{R\_nr}$ : variabile che indica il numero di risorse utilizzate  $r$ , ed è variata o mantenuta costante a seconda del valore non nullo o nullo dell'attributo  $A\_delta\_R\_nr$ .

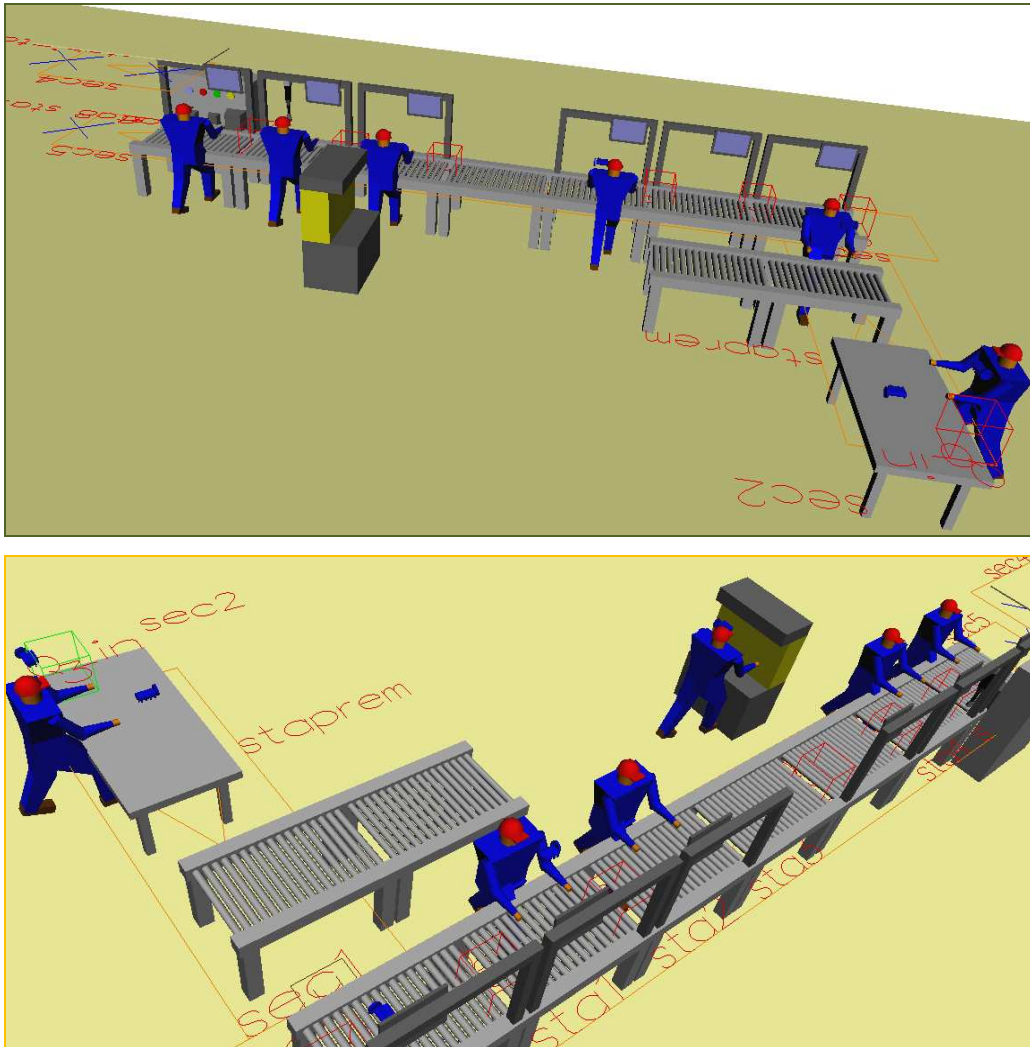


Figura 7.6 – Immagini del modello AutoMod finale della linea.

### **7.6 Simulazione di produzione mensile.**

Completati i piani di produzione ed il modello a risorse variabili, di cui si è trattato nei due precedenti paragrafi, si è utilizzato il modello come strumento di verifica dell'effettiva convenienza dei piani di produzione a risorse ridotte e bilanciate rispetto a quelli a 6 risorse, che per forza di cose presentano le stesse irregolarità già fatte notare in precedenza nell'analisi dei tempi.

### 7.6.1 Definizione dei parametri e dell'analisi AutoStat.

Per la valutazione dell'efficienza di una configurazione di linea si sono considerati i coefficienti di utilizzazione delle risorse,  $U_j$ , che si ricorda essere definiti come il tempo di attività di una risorsa diviso per il suo tempo di disponibilità, mentre il tack time di linea, ovviamente aumenta al diminuire delle risorse schedulate, ma come di fatto ci si aspettava e desiderava. Per poter confrontare configurazioni a numero di risorse differente, si è definito un parametro sintetico, il parametro *efficienza di linea*,  $E$ , di una configurazione a  $r$  risorse, definito come il rapporto tra la sommatoria dei tempi totali di lavoro degli operatori (somma degli  $r$  coefficienti di utilizzazione, tutti moltiplicati per il tempo di produzione effettivo,  $T_E$ ), e la sommatoria dei tempi totali su cui calcolare le retribuzioni, quelli di presenza in reparto (numero  $r$  degli operatori moltiplicato per il tempo totale pianificato,  $T_S$ ).

Il tempo totale pianificato è uguale, in ore, al multiplo di 4 (essendo il singolo turno di 4 ore) appena superiore a  $T_E$ ; l'analista, infatti, dopo aver eseguito la simulazione e visto  $T_E$ , imposta un numero di ore di schedulazione/convocazione degli operatori,  $T_S$ , che copra l'intera simulazione, ma che comunque risulti pari ad un numero intero di turni.

In simboli:

- *Tempo di produzione effettivo (corrispondente all'absolute clock di simulazione):*  $T_E$ .
- *Tempo totale pianificato (schedulato):*  $T_S$ .
- *Efficienza di linea:*  $E = T_E * (\sum_{j=1}^r U_j) / (T_S * r)$ .

L'efficienza di linea quantifica, in sostanza, la parte del lavoro schedulato, e per il quale gli operatori sono stati chiamati, effettivamente tradottasi in lavoro sui prodotti.

I risultati riportati nei prossimi sottoparagrafi sono stati ottenuti con AutoStat. Si è impostata l'analisi *Single Scenario*, perché tra una simulazione e l'altra a

variare è il piano di produzione, quindi un fattore esterno al modello, ed in ogni simulazione i fattori interni al modello rimangono costanti, e le sole entità che variano tra i runs sono i numeri impiegati come valori assunti da ogni parametro statistico per campionamento degli stessi dalle loro distribuzioni (i tempi di esecuzione delle attività di linea da parte degli operatori, rappresentati con le distribuzioni triangolari). Si sono eseguiti 100 runs per ogni scenario e si sono impostate come risposte del modello (*AutoMod Responses*) i 6 coefficienti di utilizzazione delle risorse di linea, il tempo totale effettivo di produzione  $T_E$  ed il numero di prodotti. Il software ha calcolato i parametri delle distribuzioni statistiche di tutte le Responses, e li ha riportati sia in forma tabulare, sia in forma grafica.

Tali risultati sono visibili nelle Tabelle dalla 11 alla 19, dove, per gli U e per  $T_E$ , compaiono, nell'ordine: media, deviazione standard  $\sigma$ , valore minimo e massimo assunti durante la simulazione, mediana, estremi inferiore e superiore dell'intervallo di confidenza, ovvero dell'intervallo all'interno del quale si ha il 99% di probabilità di trovare il valore del parametro. Nei grafici dei coefficienti di utilizzazione, si fa riferimento ai valori medi.

Il tempo di produzione  $T_E$  è calcolato come tempo di effettivo lavoro della linea, ovvero si è condotta la simulazione inibendo il ciclo di pausa ed accostando senza sosta tutti i vari turni di 4 ore ciascuno. Il tempo necessario alla produzione, se espresso in giorni lavorativi o giorni di calendario, è quindi molto maggiore, e si può agevolmente ricavare da  $T_E$ .

Comunque, ai fini del confronto tra le configurazioni interessa il rapporto tra i loro  $T_E$ , e non i valori assoluti. È stato, peraltro, inevitabile dover procedere in questo modo, poiché il software, nel calcolare i coefficienti di utilizzazione, non divide il tempo di attività per il tempo di disponibilità, ma per  $T_E$ : se si fossero lasciate le pause, gli U sarebbero stati fortemente sottostimati.

L'efficienza di linea è stata valutata non dal modello, ma in post processing da foglio di calcolo, utilizzando i valori medi degli U e di  $T_E$ ; pur contenendo al suo interno parametri con distribuzione statistica, quindi, E assume un valore singolo per ogni configurazione.

Si riportano i risultati prima degli scenari a 6 risorse, sequenziali a livello produttivo decrescente, poi di quelli a risorse e livello produttivo ridotti, anch'essi in ordine decrescente.

### 7.6.2 Piani a 6 risorse.

*Produzione mensile completa (100%)*

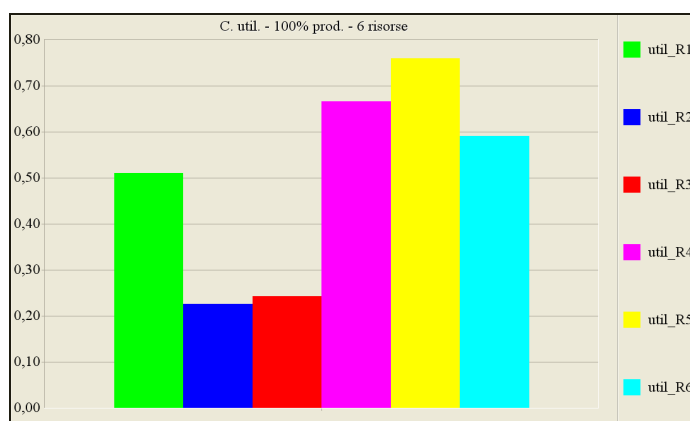


Figura 7.7 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 6 risorse e produzione al 100%.

Tabella 7.8 – Statistiche dei parametri di linea - 6 risorse e produzione al 100%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	555252,1	0,511	0,227	0,243	0,6673	0,7605	0,592
Deviaz. Std.	171,3678	0,000558	0,000171	0,000413	0,000596	0,000611	0,00
Min	554754,9	0,51	0,227	0,242	0,666	0,759	0,592
Max	555700,2	0,512	0,228	0,244	0,668	0,762	0,592
Mediana	555488,7	0,5115	0,2275	0,2435	0,6675	0,761	0,592
Inf IC	555207,1	0,510853	0,226955	0,242892	0,667143	0,760339	0,592000
Sup IC	555297,1	0,511146	0,227045	0,243109	0,667456	0,760661	0,592000

Parametri semplici			
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: $T_S$ [h]	EFFICIENZA DI LINEA: $E$
1694	154,2367	156	0,4945

*Produzione all'83%*

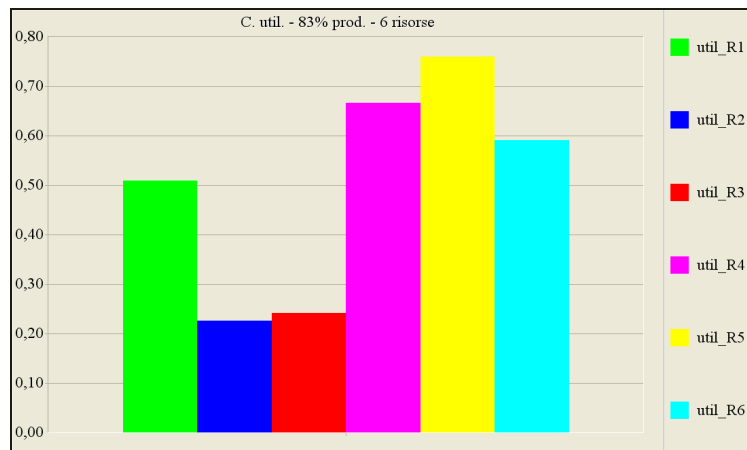


Figura 7.8 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 6 risorse e produzione all'83%.

Tabella 7.9 – Statistiche dei parametri di linea - 6 risorse e produzione all'83%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	463717,8	0,5101	0,2272	0,2427	0,667	0,7599	0,592
Deviaz. Std.	160,4940	0,000649	0,000416	0,000489	0,000858	0,000544	0,00
Min	463338,0	0,509	0,227	0,242	0,665	0,759	0,592
Max	464074,4	0,512	0,228	0,244	0,669	0,761	0,592
Mediana	463859,6	0,511	0,2275	0,2435	0,668	0,7605	0,592
Inf IC	463675,6	0,509929	0,227090	0,242571	0,666774	0,759757	0,592
Sup IC	463760,0	0,510270	0,227309	0,242828	0,667225	0,760043	0,592

Parametri semplici			
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]	EFFICIENZA DI LINEA: E
1414	128,8105	132	0,4877

*Produzione al 67%*

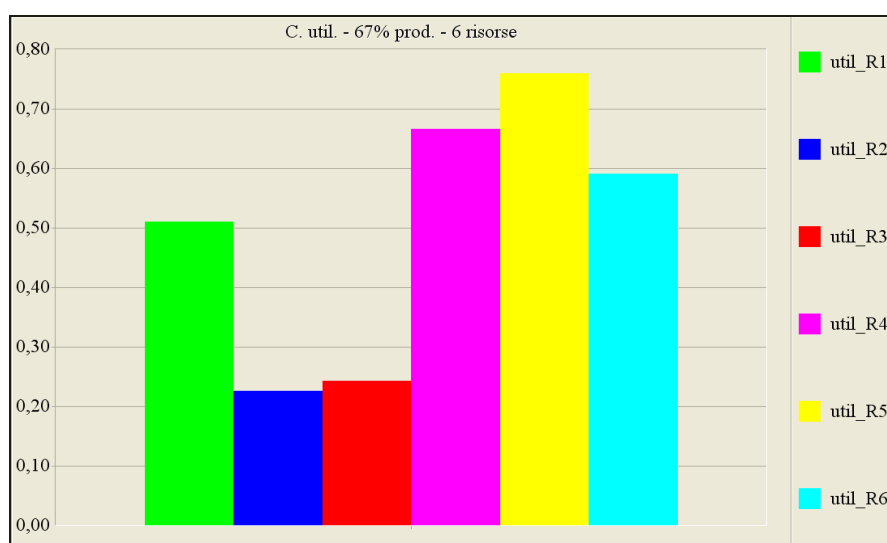


Figura 7.9 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 6 risorse e produzione al 67%.

Tabella 7.10 – Statistiche dei parametri di linea - 6 risorse e produzione al 67%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	370228,3	0,511	0,2269	0,243	0,667	0,7603	0,5914
Deviaz. Std.	140,1589	0,000666	0,000272	0,000531	0,000803	0,000725	0,000496
Min	369880,7	0,51	0,226	0,242	0,665	0,759	0,591
Max	370518,5	0,512	0,227	0,244	0,669	0,762	0,592
Mediana	370361,4	0,5115	0,227	0,2435	0,668	0,761	0,5915

Inf IC	370191,5 09	0,510825	0,226828 38	0,242860 4	0,666789	0,760109 5	0,59127
Sup IC	370265,1 31	0,511175	0,226971 62	0,243139 6	0,667211	0,760490 5	0,59153
<b>Parametri semplici</b>							
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]		TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]		EFFICIENZA DI LINEA: E		
1129	102,8412		104		0,4944		

Produzione al 50%

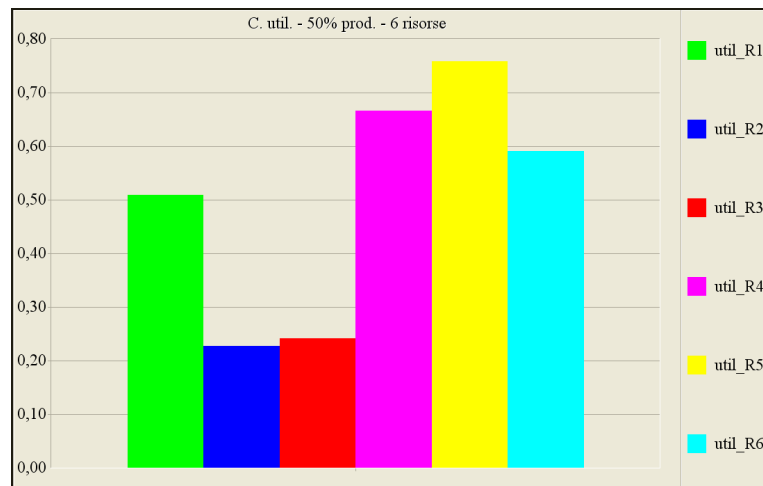


Figura 7.10 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 6 risorse e produzione al 50%.

Tabella 7.11 – Statistiche dei parametri di linea - 6 risorse e produzione al 50%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	279305,9 2	0,5093	0,2276	0,2418	0,6664	0,7591	0,5911
Deviaz. Std.	136,8280 8	0,000776 6	0,000514 3	0,000545 3	0,000952 3	0,000737 1	0,000287 6
Min	278914,4	0,507	0,227	0,241	0,664	0,757	0,591
Max	279678,4	0,511	0,229	0,243	0,668	0,761	0,592
Mediana	279497,6	0,51	0,228	0,2425	0,667	0,76	0,5915

Inf IC	279269,9 83	0,509096	0,227464 9	0,241656 8	0,666149 9	0,758906 4	0,591024 46
Sup IC	279341,8 57	0,509504	0,227735 1	0,241943 2	0,666650 1	0,759293 6	0,591175 54
<b>Parametri semplici</b>							
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]		TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]		EFFICIENZA DI LINEA: E		
851	77,5850		80		0,4841		

*Produzione al 33%*

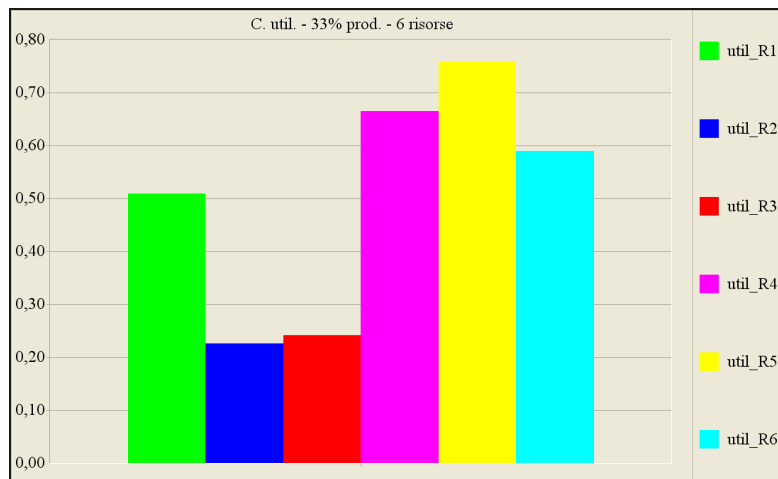


Figura 7.11 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 6 risorse e produzione al 33%.

Tabella 7.12 – Statistiche dei parametri di linea - 6 risorse e produzione al 33%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	185991,9 5	0,5093	0,2269	0,2416	0,6657	0,7585	0,5904
Deviaz. Std.	99,32276 1	0,000839 1	0,000345 1	0,000749 1	0,001298 5	0,000869 5	0,000479 4
Min	185769,4 6	0,507	0,226	0,24	0,662	0,756	0,59
Max	186265,1 8	0,512	0,228	0,243	0,669	0,761	0,591

Mediana	186127,2 85	0,51	0,227	0,2425	0,6675	0,7595	0,5905
Inf IC	185965,8 64	0,509079 6	0,226809 36	0,241403 3	0,665359 1	0,758271 6	0,590274 1
Sup IC	186018,0 36	0,509520 4	0,226990 64	0,241796 7	0,666040 9	0,758728 4	0,590525 9
<b>Parametri semplici</b>							
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]		TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]		EFFICIENZA DI LINEA: E		
565	51,6644		52		0,4955		

### 7.6.3 Piano a 5 risorse.

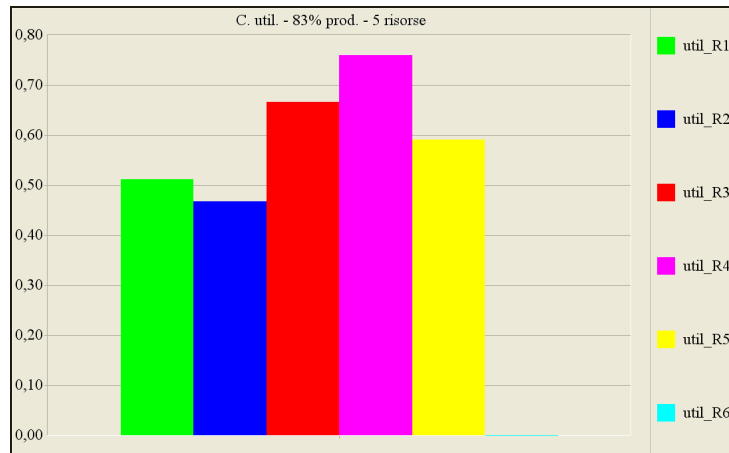


Figura 7.12 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 5 risorse e produzione all'83%.

Tabella 7.13 – Statistiche dei parametri di linea - 5 risorse e produzione all'83%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	463717,2	0,5123	0,4679	0,667	0,7599	0,592	0,00
Deviaz. Std.	160,2237	0,000647	0,000506	0,000846	0,000565	0,00	0,00
Min	463340	0,511	0,467	0,665	0,758	0,592	0,00
Max	464065,4	0,514	0,469	0,669	0,761	0,592	0,00

Mediana	463862,7	0,513	0,4685	0,668	0,7605	0,592	0,00
Inf IC	463675,1	0,51213	0,467767	0,666778	0,759752	0,592	0,00
Sup IC	463759,3	0,51247	0,468033	0,667222	0,760049	0,592	0,00
Parametri semplici							
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]		TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]		EFFICIENZA LINEA: E		DI
1414	128,8103		132		0,5853		

### 7.6.4 Piano a 4 risorse.

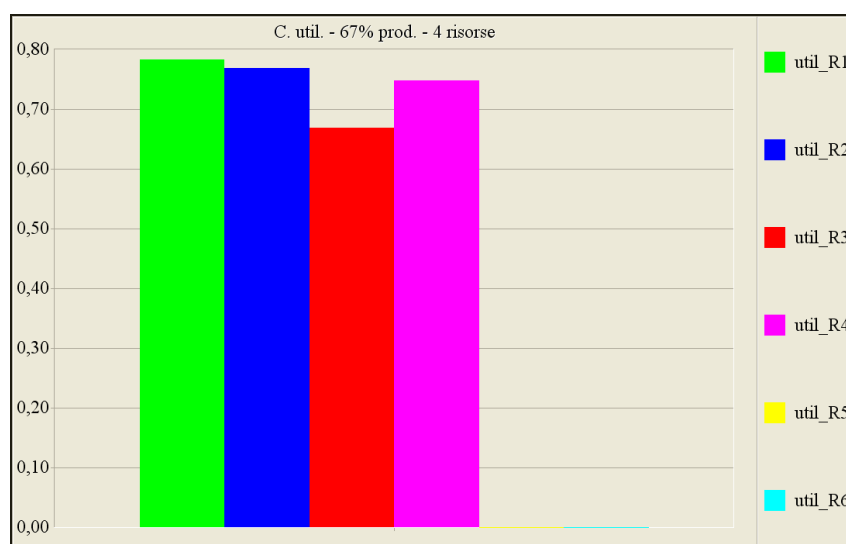


Figura 7.13 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 4 risorse e produzione al 67%.

Tabella 7.14 – Statistiche dei parametri di linea - 4 risorse e produzione al 67%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	373748,8	0,7837	0,7698	0,6692	0,7487	0,00	0,00
Deviaz. Std.	355,0022	0,001175	0,000863	0,000983	0,000879	0,00	0,00
Min	372608,4	0,781	0,768	0,667	0,746	0,00	0,00
Max	374639,6	0,786	0,772	0,671	0,751	0,00	0,00
Mediana	374068,5	0,785	0,771	0,67	0,75	0,00	0,00

Inf IC	373655,6	0,783391	0,769573	0,668942	0,748469	0,00	0,00
Sup IC	373842	0,784009	0,770027	0,669458	0,748931	0,00	0,00
Parametri semplici							
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: $T_S$	EFFICIENZA LINEA: E	DI		
1129	103,8191	104		0,7416			

### 7.6.5 Piano a 3 risorse.

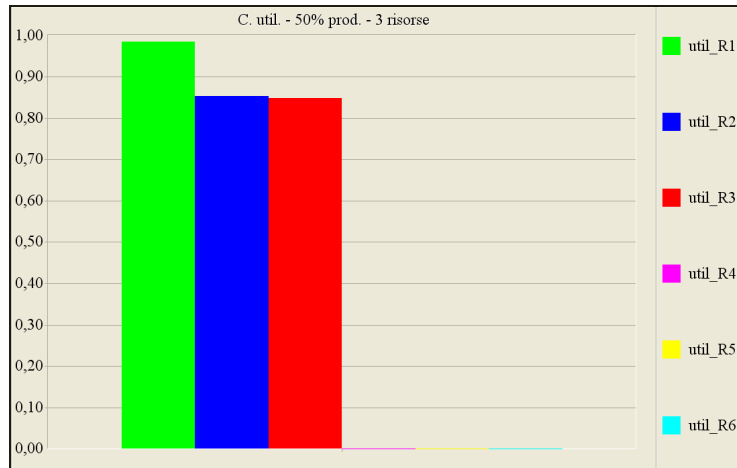


Figura 7.14 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 3 risorse e produzione al 50%.

Tabella 7.15 – Statistiche dei parametri di linea - 3 risorse e produzione al 50%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	311647,2	0,9839	0,853	0,8478	0,00	0,00	0,00
Deviaz. Std.	278,226	0,00062	0,000989	0,000878	0,00	0,00	0,00
Min	310986	0,982	0,851	0,845	0,00	0,00	0,00
Max	312270,8	0,985	0,855	0,85	0,00	0,00	0,00
Mediana	311954,6	0,9845	0,854	0,8485	0,00	0,00	0,00
Inf IC	311574,1	0,983737	0,85274	0,84757	0,00	0,00	0,00
Sup IC	311720,3	0,984063	0,85326	0,848031	0,00	0,00	0,00

Parametri semplici			
NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h] $T_S$	EFFICIENZA DI LINEA: E
851	86,5687	88	0,8803

### 7.6.6 Piano a 2 risorse.

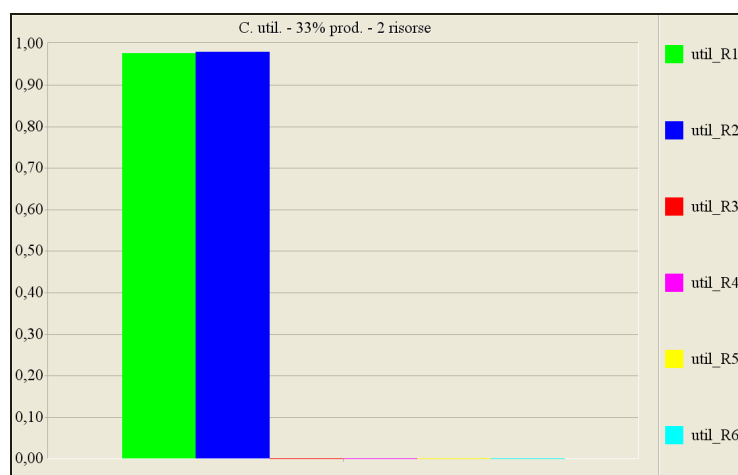


Figura 7.15 – Coefficienti di utilizzazione in configurazione a 2 risorse e produzione al 33%.

Tabella 7.16 – Statistiche dei parametri di linea - 2 risorse e produzione al 33%.

Parametri con distribuzione statistica							
	$T_e$ [s]	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$
Media	284651,4	0,9759	0,9791	0,00	0,00	0,00	0,00
Deviaz. Std.	322,2428	0,001179	0,000971	0,00	0,00	0,00	0,00
Min	283985,1	0,973	0,977	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	285498,4	0,979	0,982	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana	285072,3	0,977	0,9805	0,00	0,00	0,00	0,00
Inf IC	284566,7	0,97559	0,978845	0,00	0,00	0,00	0,00
Sup IC	284736	0,97621	0,979355	0,00	0,00	0,00	0,00
Parametri semplici							

NUMERO DI POMPE PRODOTTE	TEMPO TOT. DI PROD. EFFETTIVO: $T_E$ [h]	TEMPO TOT. DI PROD. SCHEDULATO: [h]	DI $T_S$	EFFICIENZA DI LINEA: E
565	79,0698	80		0,9661

### 7.6.7 Confronto tra risultati.

Ottenuti i risultati riportati nelle pagine precedenti, si sono analizzati e confrontati per estrarre indicazioni utili all'interpretazione del comportamento della linea. I valori utilizzati sono, nel caso dei parametri soggetti ad analisi statistica (i coefficienti di utilizzazione ed il tempo di produzione), quelli medi, avendo verificato il fatto che gli intervalli di confidenza sono così esigui da non intersecarsi tra valori diversi dello stesso parametro.

#### Configurazione a 6 risorse al variare delle quantità prodotte

Tabella 7.17 – I parametri di linea nei 5 scenari a 6 risorse.

	produzione al 100%	produzione all'83%	produzione al 67%	produzione al 50%	produzione al 33%
Numero di pompe prodotte	1694	1414	1129	851	565
$T_E$ [s]	555252	463718	370228	279306	185992
$U_1$	0,511	0,510	0,511	0,509	0,509
$U_2$	0,227	0,227	0,227	0,228	0,227
$U_3$	0,243	0,243	0,243	0,242	0,242
$U_4$	0,667	0,667	0,667	0,666	0,666
$U_5$	0,761	0,760	0,760	0,759	0,759
$U_6$	0,592	0,592	0,591	0,591	0,590
E	0,495	0,488	0,494	0,484	0,496

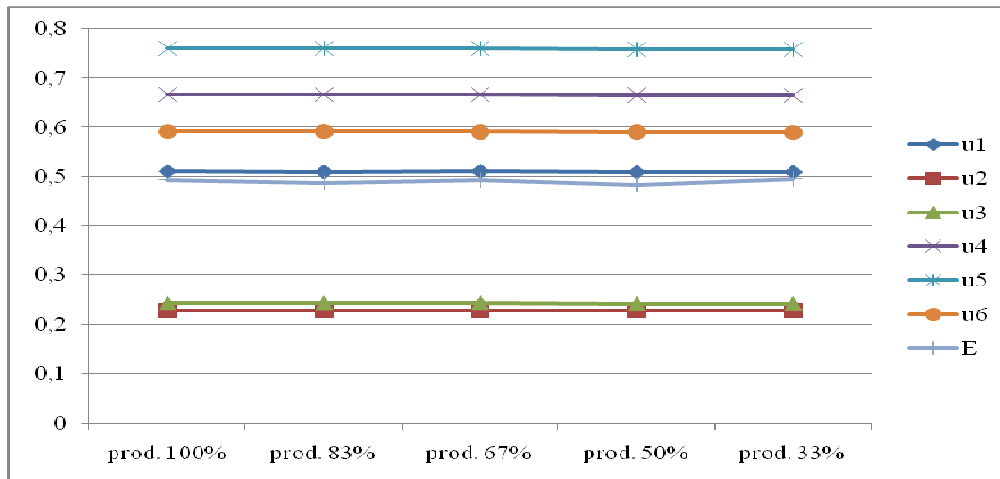


Figura 7.16 – Andamento dei parametri al variare del volume produttivo, nel caso a 6 risorse.

Si nota in Figura 7.16 come i 7 parametri esaminati risultino praticamente insensibili al carico produttivo. Ciò è facilmente intuibile, se si pensa che sono proprietà intensive, e produrre più o meno significa nient'altro che replicare lo stesso processo modulare un certo numero di volte.

*Produzione all'83%: confronto tra configurazioni a 6 e 5 risorse per 1414 pompe prodotte*

Tabella 7.18 – I parametri di linea nei 2 scenari all'83% della produzione.

	6 risorse	5 risorse
$T_E$ [s]	463718	463717
$U_1$	0,510	0,512
$U_2$	0,227	0,468
$U_3$	0,243	0,667
$U_4$	0,667	0,760
$U_5$	0,760	0,592
$U_6$	0,592	0,000
$E$	0,488	0,585

Il tempo di produzione rimane costante, perché l'accorpamento delle postazioni non ha prodotto, incrementi del tempo di uscita; si lavora, però, con una risorsa in meno, a parità di carico di lavoro: quelle rimaste presentano, quindi, coefficienti di utilizzazione superiori; anche l'efficienza di linea aumenta, ad indicare un miglioramento del processo.

*Produzione al 67%: confronto tra configurazioni a 6 e 4 risorse 1129 pompe prodotte*

Tabella 7.19 – I parametri di linea nei 2 scenari al 67% della produzione.

	6 risorse	4 risorse
$T_E$ [s]	370228	373749
$U_1$	0,511	0,784
$U_2$	0,227	0,770
$U_3$	0,243	0,669
$U_4$	0,667	0,749
$U_5$	0,760	0,000
$U_6$	0,591	0,000
E	0,494	0,742

Il tempo totale effettivo di produzione aumenta leggermente, a causa del leggero aumento del tempo di uscita per alcune tipologie; in compenso, aumentano significativamente gli U ed E.

*Produzione al 50%: confronto tra configurazioni a 6 e 3 risorse 851 pompe prodotte*

Tabella 7.20 – I parametri di linea nei 2 scenari al 50% della produzione.

	6 risorse	3 risorse
$T_E$ [s]	279306	311647
$U_1$	0,509	0,984
$U_2$	0,228	0,853
$U_3$	0,242	0,848
$U_4$	0,666	0,000
$U_5$	0,759	0,000
$U_6$	0,591	0,000
E	0,484	0,880

Valgono, amplificate, le considerazioni svolte nel caso precedente, per quanto riguarda sia il tempo effettivo di produzione, sia i parametri di efficienza, gli U ed E.

*Produzione al 33%: confronto tra configurazioni a 6 e 2 risorse 565 pompe prodotte*

Tabella 7.21 – I parametri di linea nei 2 scenari al 33% della produzione.

	6 risorse	2 risorse
$T_E$ [s]	185992	284651
$U_1$	0,509	0,976
$U_2$	0,227	0,979
$U_3$	0,242	0,000
$U_4$	0,666	0,000
$U_5$	0,759	0,000
$U_6$	0,590	0,000
E	0,496	0,966

Valgono, amplificate, le considerazioni svolte nei due casi precedenti, per quanto riguarda sia il tempo effettivo di produzione, sia i parametri di efficienza, gli U ed E.

*Considerazioni sintetiche sugli effetti della variazione di r.*

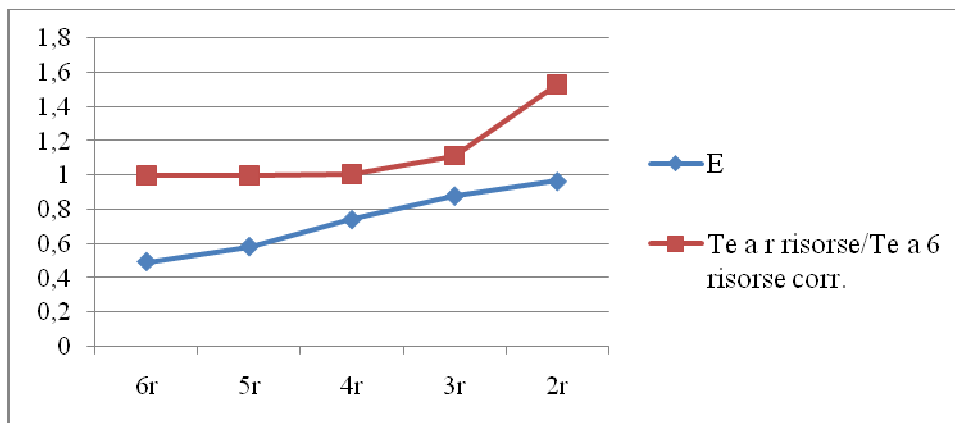


Figura 7.22 – Andamento di E e di  $(T_E / T_E \text{ standard a 6 risorse})$  al diminuire di r.

In definitiva, si può dire che si riscontra un netto miglioramento dell'efficienza produttiva al diminuire di r, qualora si utilizzino, come in questo caso, i criteri di bilanciamento delle risorse presentati in precedenza.

I tempi di produzione, diminuendo r a parità di carico, ovviamente crescono, ma, almeno fino al caso a 3 risorse, con ritmo inferiore a quella con cui crescono gli U ed E. Nell'ultimo grafico si è utilizzato, per correttezza di

confronto tra scenari a volumi diversi, il tempo effettivo di produzione di una configurazione a  $r$  risorse, parametrizzato al  $T_E$  della configurazione a 6 risorse e volume produttivo corrispondente.

### **7.7 Analisi dei vincoli.**

Passiamo adesso ad analizzare i vincoli esistenti nella logica di produzione.

Anche in questo caso si farà riferimento alle stazioni numerandole da 1 a 6, seguendo quindi il verso di percorrenza dell'assemblaggio, a cui verrà associato in prima istanza un singolo operatore identificato dallo stesso numero della postazione che occupa.

Ulteriormente:

- Gli operatori devono lavorare ad un'intensità più piena possibile, senza avere situazioni di personale sovraccaricato o situazioni di tempi morti in cui l'operatore deve aspettare il compimento delle operazioni della stazione precedente.
- Come precedentemente detto, il layout della linea, il numero delle stazioni presenti, i macchinari e gli utensili presenti devono rimanere tali e non possono essere modificati.
- Avendone la possibilità si cerca di mantenere l'ultima postazione più scarica delle altre per far fronte ad eventuali ritardi delle precedenti.

Come già considerato, avendo un mix produttivo elevato pari a 127 codici diversi, da realizzare su un sistema definito, ognuna richiedibile in numero variabile su commessa, la linea dovrà essere in grado di poter assorbire un susseguirsi di tipi diversi di schedulazioni in relazione a tempi e esistenza o meno di task da eseguire, che dovranno essere assegnate alle varie stazioni.

Si introducono ora i seguenti parametri per la trattazione che segue:

- Numero di stazioni  $k \in [1, 6]$
- Numero di operazioni  $n \in [1, 34]$
- Numero operazioni assegnate alla stazione  $k$   $i \in [1, h]$
- Tempo operazioni  $T_{op}$  [min/100]
- Tempo Stazione  $T_{stat} = \sum T_{op}$  [min/100]
- Tempo di attraversamento  $T_a = \sum T_{stat}$  [min/100]
- Tacktime linea  $T_m = \max(T_{stat})$  [min/100]
- Tacktime medio od ideale  $T_{medio} = \frac{\sum_n T_{op}}{k}$
- Coefficiente sbilanciamento operazione  $CS_{Op} = \frac{T_{op}}{T_{medio}}$
- Coefficiente sbilanciamento stazione  $CS_{Stat} = \sum_{i=1,k} CS_{Op} = \frac{\sum_{i=1,k} T_{Op}}{T_{medio}}$
- Sbilanciamento stazione  $S_{Stat} = |T_{Medio} - T_{Stat}|$  [min/100]
- Efficienza linea  $E_{Linea} = \frac{\sum_{i=1,k} CS_{Stat}}{\sum_{i=1,k} S_{Stat}} \%$

*Tabella tempi aggregati delle stazioni situazione iniziale*

Di seguito viene riportata prima la tabella con definizione del numero di task da assegnare ad ogni stazione, come effettuata e decisa sia nel sistema reale, sia nella modellazione precedente, con piano di produzione ridotto, per la verifica di politiche di schedulazione a risorse ridotte.

Successivamente, è presentata una tabella che riporta i tempi modali dei task di cui sono costituiti ognuno dei tipi di assemblaggio possibili, e di seguito, la schedulazione dei task nelle 6 stazioni e dei tempi aggregati delle stazioni, conseguente alla scelta predefinita appena descritta.



Tabella 7.23 – Suddivisione operazioni e tempi aggregati delle stazioni caso iniziale.

Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Temp tot	Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Temp tot
Mod. 1	277	118	219	355	407	346	1722	Mod. 65	482	185	327	355	407	216	1972
Mod. 2	277	118	0	355	407	296	1453	Mod. 66	350	257	421	383	370	422	2203
Mod. 3	277	118	219	355	407	342	1718	Mod. 67	380	281	235	383	366	433	2078
Mod. 4	277	118	219	355	407	266	1642	Mod. 68	277	118	327	355	407	298	1782
Mod. 5	277	118	0	355	407	378	1535	Mod. 69	277	118	327	355	407	390	1874
Mod. 6	277	118	219	355	407	298	1674	Mod. 70	277	118	327	355	407	362	1846
Mod. 7	277	118	0	355	407	216	1373	Mod. 71	350	257	522	383	370	369	2251
Mod. 8	277	118	219	355	407	296	1672	Mod. 72	350	257	313	383	370	319	1992
Mod. 9	277	118	219	355	407	216	1592	Mod. 73	65	257	101	383	331	319	1456
Mod. 10	277	118	219	355	407	354	1730	Mod. 74	65	257	0	383	331	319	1355
Mod. 11	277	118	219	355	407	362	1738	Mod. 75	350	257	421	383	370	472	2253
Mod. 12	277	118	327	355	407	266	1750	Mod. 76	65	257	0	383	331	422	1458
Mod. 13	350	257	421	383	370	319	2100	Mod. 77	65	257	0	383	331	369	1405
Mod. 14	380	281	374	383	366	376	2160	Mod. 78	277	118	219	355	407	378	1754
Mod. 15	380	281	374	383	366	319	2103	Mod. 79	380	281	235	383	366	376	2021
Mod. 16	277	118	327	355	407	216	1700	Mod. 80	277	118	219	355	407	298	1674
Mod. 17	482	185	219	355	407	342	1990	Mod. 81	482	185	0	355	407	266	1695
Mod. 18	277	118	0	355	407	342	1499	Mod. 82	277	118	219	355	407	262	1638
Mod. 19	380	281	235	383	366	319	1964	Mod. 83	277	118	327	355	407	216	1700
Mod. 20	277	118	219	355	407	408	1784	Mod. 84	65	257	0	383	331	376	1412
Mod. 21	277	118	0	355	407	282	1439	Mod. 85	380	281	235	383	366	369	2014
Mod. 22	277	118	219	355	407	428	1804	Mod. 86	380	281	235	383	366	469	2114
Mod. 23	277	118	219	355	407	262	1638	Mod. 87	65	257	0	383	331	319	1355
Mod. 24	350	257	421	383	370	522	2303	Mod. 88	350	257	421	383	370	476	2257
Mod. 25	482	185	327	355	407	262	2018	Mod. 89	65	257	0	383	331	422	1458
Mod. 26	482	185	219	355	407	216	1864	Mod. 90	277	118	0	355	407	348	1505
Mod. 27	482	185	219	355	407	266	1914	Mod. 91	277	118	327	355	407	282	1766
Mod. 28	482	185	0	355	407	216	1645	Mod. 92	482	185	0	355	407	388	1817
Mod. 29	482	185	0	355	407	378	1807	Mod. 93	482	185	0	355	407	308	1737
Mod. 30	350	257	421	383	370	426	2207	Mod. 94	380	281	374	383	366	319	2103
Mod. 31	482	185	0	355	407	346	1775	Mod. 95	350	257	421	383	370	476	2257
Mod. 32	350	257	421	383	370	526	2307	Mod. 96	350	257	421	383	370	422	2203
Mod. 33	65	257	101	383	331	319	1456	Mod. 97	65	257	0	383	331	422	1458
Mod. 34	277	118	327	355	407	346	1830	Mod. 98	482	185	0	355	407	296	1725
Mod. 35	350	257	421	383	370	319	2100	Mod. 99	350	257	522	383	370	419	2301
Mod. 36	277	118	219	355	407	328	1704	Mod. 100	380	281	265	383	366	376	2051
Mod. 37	350	257	421	383	370	369	2150	Mod. 101	65	257	101	383	331	319	1456
Mod. 38	350	257	421	383	370	319	2100	Mod. 102	482	185	0	355	407	298	1727
Mod. 39	277	118	327	355	407	328	1812	Mod. 103	350	257	421	383	370	376	2157
Mod. 40	277	118	219	355	407	216	1592	Mod. 104	350	257	421	383	370	472	2253
Mod. 41	277	118	219	355	407	308	1684	Mod. 105	277	118	219	355	407	282	1658
Mod. 42	482	185	0	355	407	296	1725	Mod. 106	482	185	0	355	407	262	1691
Mod. 43	482	185	327	355	407	346	2102	Mod. 107	380	281	265	383	366	319	1994
Mod. 44	380	281	235	383	366	319	1964	Mod. 108	277	118	219	355	407	266	1642
Mod. 45	277	118	0	355	407	378	1535	Mod. 109	277	118	327	355	407	378	1862
Mod. 46	277	118	327	355	407	266	1750	Mod. 110	482	185	219	355	407	346	1994
Mod. 47	350	257	522	383	370	319	2201	Mod. 111	350	257	522	383	370	469	2351
Mod. 48	277	118	327	355	407	358	1842	Mod. 112	350	257	421	383	370	469	2250
Mod. 49	350	257	522	383	370	319	2201	Mod. 113	350	257	421	383	370	479	2260
Mod. 50	482	185	0	355	407	216	1645	Mod. 114	380	281	235	383	366	433	2078
Mod. 51	65	257	0	383	331	319	1355	Mod. 115	65	257	0	383	331	476	1512
Mod. 52	277	118	327	355	407	308	1792	Mod. 116	65	257	0	383	331	469	1505
Mod. 53	380	281	235	383	366	490	2135	Mod. 117	65	257	101	383	331	422	1559
Mod. 54	277	118	327	355	407	346	1830	Mod. 118	482	185	0	355	407	342	1771
Mod. 55	380	281	265	383	366	433	2108	Mod. 119	482	185	219	355	407	216	1864
Mod. 56	380	281	235	383	366	369	2014	Mod. 120	482	185	327	355	407	296	2052
Mod. 57	380	281	235	383	366	433	2078	Mod. 121	350	257	313	383	370	319	1992
Mod. 58	65	257	0	383	331	572	1608	Mod. 122	350	257	421	383	370	419	2200
Mod. 59	380	281	235	383	366	319	1964	Mod. 123	350	257	421	383	370	376	2157
Mod. 60	380	281	235	383	366	419	2064	Mod. 124	380	281	235	383	366	533	2178
Mod. 61	482	185	219	355	407	262	1910	Mod. 125	65	257	101	383	331	422	1559
Mod. 62	380	281	235	383	366	376	2021	Mod. 126	65	257	101	383	331	422	1559
Mod. 63	350	257	421	383	370	422	2203	Mod. 127	65	257	0	383	331	419	1455
Mod. 64	277	118	327	355	407	328	1812								

A partire dalla tabella dei tempi assoluti, in centesimi di minuto, viene poi definita la tabella dei coefficienti di sbilanciamento, calcolata per ogni riga, rispetto al tempo massimo della stazione più caricata, variabile riga per riga.

Tabella Coefficienti di sbilanciamento Stazioni e Tacktime Situazione iniziale

Tabella 7.23 – Coefficienti Sbilanciamento delle stazioni nella situazione iniziale.

Pompa	Cs Stat 1	Cs Stat 2	Cs Stat 3	Cs Stat 4	Cs Stat 5	Cs Stat 6	Ttm(minv 100)	Pompa	Cs Stat 1	Cs Stat 2	Cs Stat 3	Cs Stat 4	Cs Stat 5	Cs Stat 6	Ttm(minv 100)
Mod. 1	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,85	407	Mod. 65	1,00	0,38	0,68	0,74	0,84	0,45	482
Mod. 2	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,73	407	Mod. 66	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	1,00	422
Mod. 3	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,84	407	Mod. 67	0,88	0,65	0,54	0,88	0,85	1,00	433
Mod. 4	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,65	407	Mod. 68	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,73	407
Mod. 5	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,93	407	Mod. 69	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,96	407
Mod. 6	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,73	407	Mod. 70	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,89	407
Mod. 7	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,53	407	Mod. 71	0,67	0,49	1,00	0,73	0,71	0,71	522
Mod. 8	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,73	407	Mod. 72	0,91	0,67	0,82	1,00	0,97	0,83	383
Mod. 9	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,53	407	Mod. 73	0,17	0,67	0,26	1,00	0,86	0,83	383
Mod. 10	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,87	407	Mod. 74	0,17	0,67	0,00	1,00	0,86	0,83	383
Mod. 11	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,89	407	Mod. 75	0,74	0,54	0,89	0,81	0,78	1,00	472
Mod. 12	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,65	407	Mod. 76	0,15	0,61	0,00	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 13	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,76	421	Mod. 77	0,17	0,67	0,00	1,00	0,86	0,96	383
Mod. 14	0,99	0,73	0,98	1,00	0,96	0,98	383	Mod. 78	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,93	407
Mod. 15	0,99	0,73	0,98	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 79	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,98	383
Mod. 16	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,53	407	Mod. 80	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,73	407
Mod. 17	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,71	482	Mod. 81	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,55	482
Mod. 18	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,84	407	Mod. 82	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,64	407
Mod. 19	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 83	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,53	407
Mod. 20	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	1,00	408	Mod. 84	0,17	0,67	0,00	1,00	0,86	0,98	383
Mod. 21	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,69	407	Mod. 85	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,96	383
Mod. 22	0,65	0,28	0,51	0,83	0,95	1,00	428	Mod. 86	0,81	0,60	0,50	0,82	0,78	1,00	469
Mod. 23	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,64	407	Mod. 87	0,17	0,67	0,00	1,00	0,86	0,83	383
Mod. 24	0,67	0,49	0,81	0,73	0,71	1,00	522	Mod. 88	0,74	0,54	0,88	0,80	0,78	1,00	476
Mod. 25	1,00	0,38	0,68	0,74	0,84	0,54	482	Mod. 89	0,15	0,61	0,00	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 26	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,45	482	Mod. 90	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,86	407
Mod. 27	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,55	482	Mod. 91	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,69	407
Mod. 28	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,45	482	Mod. 92	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,80	482
Mod. 29	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,78	482	Mod. 93	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,64	482
Mod. 30	0,82	0,60	0,99	0,90	0,87	1,00	426	Mod. 94	0,99	0,73	0,98	1,00	0,96	0,83	383
Mod. 31	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,72	482	Mod. 95	0,74	0,54	0,88	0,80	0,78	1,00	476
Mod. 32	0,67	0,49	0,80	0,73	0,70	1,00	526	Mod. 96	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	1,00	422
Mod. 33	0,17	0,67	0,26	1,00	0,86	0,83	383	Mod. 97	0,15	0,61	0,00	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 34	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,85	407	Mod. 98	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,61	482
Mod. 35	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,76	421	Mod. 99	0,67	0,49	1,00	0,73	0,71	0,80	522
Mod. 36	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,81	407	Mod. 100	0,99	0,73	0,69	1,00	0,96	0,98	383
Mod. 37	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,88	421	Mod. 101	0,17	0,67	0,26	1,00	0,86	0,83	383
Mod. 38	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,76	421	Mod. 102	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,62	482
Mod. 39	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,81	407	Mod. 103	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,89	421
Mod. 40	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,53	407	Mod. 104	0,74	0,54	0,89	0,81	0,78	1,00	472
Mod. 41	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,76	407	Mod. 105	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,69	407
Mod. 42	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,61	482	Mod. 106	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,54	482
Mod. 43	1,00	0,38	0,68	0,74	0,84	0,72	482	Mod. 107	0,99	0,73	0,69	1,00	0,96	0,83	383
Mod. 44	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 108	0,68	0,29	0,54	0,87	1,00	0,65	407
Mod. 45	0,68	0,29	0,00	0,87	1,00	0,93	407	Mod. 109	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,93	407
Mod. 46	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,65	407	Mod. 110	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,72	482
Mod. 47	0,67	0,49	1,00	0,73	0,71	0,61	522	Mod. 111	0,67	0,49	1,00	0,73	0,71	0,90	522
Mod. 48	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,88	407	Mod. 112	0,75	0,55	0,90	0,82	0,79	1,00	469
Mod. 49	0,67	0,49	1,00	0,73	0,71	0,61	522	Mod. 113	0,73	0,54	0,88	0,80	0,77	1,00	479
Mod. 50	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,45	482	Mod. 114	0,88	0,65	0,54	0,88	0,85	1,00	433
Mod. 51	0,17	0,67	0,00	1,00	0,86	0,83	383	Mod. 115	0,14	0,54	0,00	0,80	0,70	1,00	476
Mod. 52	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,76	407	Mod. 116	0,14	0,55	0,00	0,82	0,71	1,00	469
Mod. 53	0,78	0,57	0,48	0,78	0,75	1,00	490	Mod. 117	0,15	0,61	0,24	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 54	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,85	407	Mod. 118	1,00	0,38	0,00	0,74	0,84	0,71	482
Mod. 55	0,88	0,65	0,61	0,88	0,85	1,00	433	Mod. 119	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,45	482
Mod. 56	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,96	383	Mod. 120	1,00	0,38	0,68	0,74	0,84	0,61	482
Mod. 57	0,88	0,65	0,54	0,88	0,85	1,00	433	Mod. 121	0,91	0,67	0,82	1,00	0,97	0,83	383
Mod. 58	0,11	0,45	0,00	0,67	0,58	1,00	572	Mod. 122	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	1,00	421
Mod. 59	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 123	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	0,89	421
Mod. 60	0,91	0,67	0,56	0,91	0,87	1,00	419	Mod. 124	0,71	0,53	0,44	0,72	0,69	1,00	533
Mod. 61	1,00	0,38	0,45	0,74	0,84	0,54	482	Mod. 125	0,15	0,61	0,24	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 62	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,98	383	Mod. 126	0,15	0,61	0,24	0,91	0,78	1,00	422
Mod. 63	0,83	0,61	1,00	0,91	0,88	1,00	422	Mod. 127	0,16	0,61	0,00	0,91	0,79	1,00	419
Mod. 64	0,68	0,29	0,80	0,87	1,00	0,81	407								

7.7.1 Considerazioni sui dati.

Si può notare dai dati in possesso, in maniera più specifica rispetto a quanto già detto, che:

- I task hanno durate molto variabili dal 5% fino al 70% del tacktime, ovvero del tempo della stazione più lenta.
- Sono presenti 3 operazioni vincolate ad altrettante stazioni:

- L'operazione 17 alla stazione 4 (cianfrinatura).
- L'operazione 19 alla stazione 5 (avvitamento).
- L'operazione 33 alla stazione 6 (prova aria).
- La stazione 5 risulta essere quasi sempre la stazione più caricata che determina il takttime della linea.
- Le stazioni 1, 2, 4 e 5 risultano essere ugualmente caricate per famiglia di pompe.
- La stazione 6 è la stazione con i tempi più variabili, maggiormente dipendenti dagli optional scelti.
- La stazione 3 a seconda dei modelli o degli optional scelti può risultare superflua.
- La stazione 2 risulta quasi sempre notevolmente sottocaricata rispetto alle altre.

## **7.8 Individuazione del problema e valutazione miglioramenti e approcci possibili.**

### **7.8.1 Il bilanciamento MALBP**

Visti i risultati ottenuti dall'analisi dei tempi e della loro attuale distribuzione, i cui esiti sono stati rappresentati in tabella, può essere necessario elaborare un algoritmo per ri-schedulare le singole operazioni nelle varie stazioni cercando di mantenere un livello di bilanciamento il più equilibrato possibile tra tutte le stazioni.

I metodi di bilanciamento delle linee di assemblaggio manuali possono basarsi su vari aspetti a seconda delle necessità, delle politiche aziendali e delle priorità nella messa in produzioni di determinati prodotti.

Vista la produzione mista del caso esaminato, dobbiamo affrontare un bilanciamento di tipo *MALBP* (Mixed Model Assembly Line Balancing Problem), che ha come fondamenti gli stessi principi del più semplice *SALBP* (Simple Assembly Line Balancing Problem):

- L'assemblaggio di ogni modello richiede l'esecuzione di una serie di attività rappresentate nel diagramma di precedenza, e tale diagramma esiste per ogni prodotto.
- Vi è un sotto insieme di operazioni comuni a tutti i modelli.
- Operazioni comuni a più modelli sono svolte all'interno della stessa stazione, anche se con parametri dei tempi ciclo differenti.
- 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.

Come più specificatamente spiegato nei capitoli precedenti, esistono varie versioni del MALBP, la situazione esaminata risponde alla situazione del MALBP-2, cioè per un dato numero di stazioni  $K$ , la funzione obiettivo mira a minimizzare il tempo ciclo  $Tm$ .

Il problema è formulato in maniera equivalente massimizzando la produzione totale  $D$  nel periodo  $PT$  dato.

Una volta individuata la famiglia di appartenenza della soluzione si possono prendere in considerazione diverse possibilità, avendo in parte già effettuato, nelle condizioni descritte di produzione ridotta, un bilanciamento basato sul numero di risorse, in questa fase si proverà a effettuare un Bilanciamento sui contenuti di lavoro, cioè si tenterà e verificherà una attribuzione dinamica delle operazioni da svolgere nelle stazioni con l'obiettivo di innalzare l'efficienza e la saturazione sia di stazione che per gli operatori, ma in una configurazione di riferimento a sei operatori.

Il carico, e il numero di task, da assegnare ad ogni stazione, non sarà definito a priori, ma verrà dinamicamente definito in relazione alle configurazioni di tempo di ogni tipo di assemblaggio, dato che, i tempi di ciascuna postazione sono molto variabili a seconda della tipologia di pompa, per cui, in generale, ogni riga richiede uno studio ed un'ottimizzazione a sé.

Tutte queste possibilità generiche, possono essere prese in considerazione, anche solo parzialmente, contemporaneamente, cercando così di ottimizzare al meglio la soluzione, adattandola meglio al problema specifico.

Considerando quindi inizialmente gli operatori vincolati staticamente alla propria stazione, si bilancerà la linea, sui contenuti di lavoro, sviluppando un algoritmo che come obiettivo di ridistribuire i singoli task alle stazioni:

l'obiettivo sarà dunque quello di minimizzare lo sbilanciamento della linea (SL) cioè aumentare la sua efficienza che è uguale alla somma degli sbilanciamenti delle singole stazioni ( $S_{Stat}$ ) diviso il numero totale di stazioni.

$$\text{Min SL} = \sum_i S_{stat} \text{ [min/100]} \quad \text{oppure} \quad \text{Max } E_{linea} = \frac{\sum_i CS_{stat}}{\sum_i S} \%$$

cioè significa minimizzare lo sbilanciamento di ogni stazione:

$$\text{Min } S_{stat} = |T_m - T_{stat}| \text{ [min/100]}$$

ovvero di cercare di portare all'unità il coefficiente di sbilanciamento percentuale

$$CS_{stat} = \frac{T_{stat}}{T_m} \rightarrow 1.$$

### 7.8.2 Il metodo COMSOAL.

Si può dunque nel tentativo di raggiungere questo traguardo applicare l'euristica **COMSOAL** (**CO**mputerized **M**ethod for **S**equencing **O**perations on **A**ssembly **L**ines) che consiste in una serie di iterazioni dell'algoritmo in modo da determinare l'insieme di tutti i task che potrebbero essere assegnati ad una stazione j senza violare il vincolo imposto dal carico  $T_m$  di questa.

Un task viene quindi scelto in maniera random, essendo ad ognuno dei task associata la medesima probabilità di selezione.

Questo metodo semplifica complessi problemi di bilanciamento, è facile da capire e implementare, è più veloce, facile e accurato del calcolo manuale, si possono definire obiettivi multipli, la qualità del risultato può essere migliorata iterando il processo

Il **COMOSAL** opera nel seguente modo:

- **Step 1:** per ogni task si identificano quelli che lo seguono in ordine di precedenza.
- **Step 2:** si seleziona un task in maniera random e si costituisce un insieme A di tutti quelli che lo precedono immediatamente prima nel diagramma delle precedenze.
- **Step 3:** dall'insieme A si costruisce un sottoinsieme B composto dai task che non hanno predecessori, o tali che questi siano già schedulati; se terminano task non assegnati si conclude.
- **Step 4:** dall'insieme B si crea un sottoinsieme C composto dai task il cui tempo non eccede il takttime massimo scelto, che identifica il massimo carico attribuibile ad una stazione, se questo insieme C risulta vuoto si apre una nuova stazione e ripete lo step 4.
- **Step 5:** si seleziona random dall'insieme C un task da assegnare alla stazione.
- **Step 6:** si aggiorna il tempo delle operazioni assegnate alla stazione e l'insieme B per riflettere il tempo consumato e il completamento dell'assegnazione dei task precedenti, se l'insieme B è vuoto, si aggiorna l'insieme A e si ritorna allo step 3 altrimenti si ritorna allo step 4.

Questo metodo, combinatoriale, permette di trovare diverse possibilità di soluzione.

Per ottenere una soluzione univoca necessaria, a causa degli ulteriori vincoli presenti nel modello in studio, si modifica lo Step 4, evitando una selezione random dei task e scegliendo arbitrariamente la prima operazione da assegnare, infatti nel caso specifico esaminato l'unica operazione che presenta tutti le precedenti assegnati o assenti è la prima e man mano le altre in sequenza ogni volta che quella presa in considerazione viene assegnata, quindi non si otterrà una combinazione di casi, ma direttamente l'unico caso possibile che identifica anche il bilanciamento ottimale possibile nel rispetto dei vincoli.

Diagramma combinatoriale delle possibili sequenze di operazioni per svolgere i vari modelli di pompe:

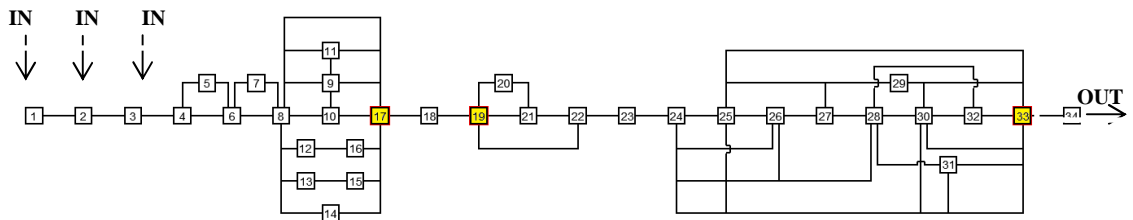


Figura 7.23 – Diagramma combinatoriale delle sequenze.

Ogni modello di pompa segue un unico percorso fra quelli possibili nel diagramma combinatoriale delle sequenze, e per ogni pompa è specifico e differente, che non necessariamente deve cominciare dall'operazione 1, infatti la numerazione delle operazioni individua solo la specifica operazione e non la loro successione, che comunque vedrà le operazioni susseguirsi con un numero crescente ma non necessariamente consecutivo. Alcune operazioni, come si può vedere, non sono quindi necessarie per tutti i modelli, mentre quelle evidenziate, l'operazione 17, l'operazione 19 e l'operazione 33, sono quelle, come già evidenziato, che a causa della struttura della linea sono vincolate ad una postazione fissa.

Tutte le altre possono essere assegnate nella postazione più consona al bilanciamento della linea.

Nella stesura del modello iterativo si dovranno utilizzare i seguenti parametri:

- $T_m$  = takttime di riferimento, è il tempo minimo, espresso in centesimi di minuto, necessario per la definizione del carico massimo da assegnare alle stazioni, definito come il valore maggiore, tra il takttime medio o ideale ( $T_{m_{ideale}}$ ) sulle sei stazioni e i takttime parziali ( $T_{m_{vincolato}}$ ) delle stazioni comprese tra 2 operazioni vincolate;  $T_m$ , espresso percentualmente, rappresenta il 100% del tempo di lavoro che può essere assegnato ad una stazione.

$$T_m = \max \left( T_{m_{medio}} = \frac{\sum_i Op}{\sum_k Stat} ; T_{m_{vincolato}} = \frac{\sum_i Op}{\sum_A Stat} \right) [\text{min}/100]$$

$$T_m \rightarrow 100\% \quad Tm_{rel} = 1$$

➤  $Cs_{Op}$  = coefficiente di sbilanciamento task,

è un valore adimensionale definito come il peso percentuale di ogni operazione in base al tempo di esecuzione rispetto al takttime medio di riferimento utilizzato come valore di carico massimo per la linea.

$$Cs_{Op} = \frac{T_{Op}}{T_m} \quad Cs_{Op}\% = Cs_{Op} * 100$$

➤  $Cs_{Stat}$  = coefficiente di sbilanciamento della stazione,

è un valore adimensionale percentuale ed è definito come la sommatoria dei coefficienti di sbilanciamento delle n operazioni assegnate alle stazioni, il cui valore dovrà essere minore o uguale a quello del takttime che assume il valore dell'intero (100%). Un bilanciamento ottimale, irraggiungibile nella pratica, avrebbe tutti i  $Cs_{Stat}$  delle stazioni uguali a 1.

$$Cs_{Stat} = \sum_n Cs_{Op} = \frac{\sum_n T_{Op}}{T_m} \leq Tm_{rel} = 1$$

$$Cs_{Stat}\% = Cs_{Stat} * 100 \leq 100\%$$

➤  $T_{stat}$  = tempo stazione,

è espresso in centesimi di minuto e rappresenta l'effettiva durata del totale delle operazioni assegnate alla stazione.

$$T_{stat} = Cs_{Stat} * T_m = \sum_n T_{Op} \quad [\text{min}/100]$$

➤  $T_a$  = tempo di attraversamento,

espresso in centesimi di minuto, è il tempo effettivo che passa da quando un prodotto entra nella linea alla stazione 1 ed esce dopo essere stato completato passando per tutte le stazioni.

$$T_a = \sum_K T_{stat} \quad [\text{min}/100]$$

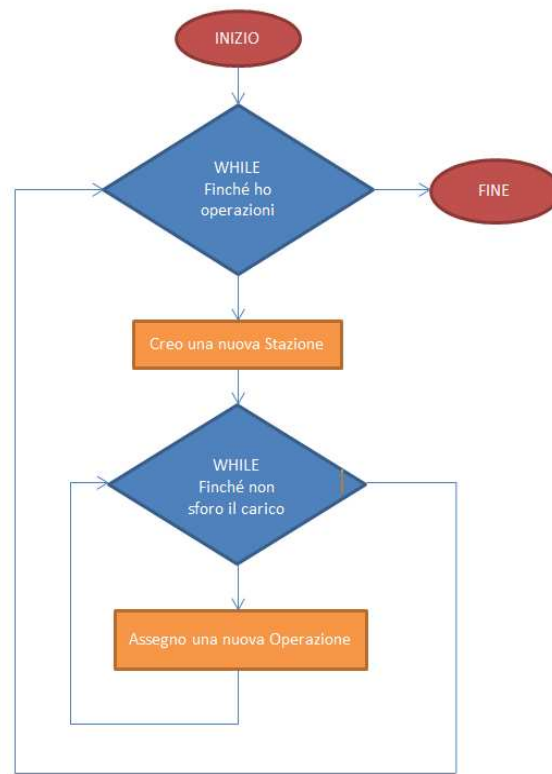


Figura 7.24 – Flowchart COMSOAL.

Flowchart rappresentante invece la sequenza logica necessaria per la linea presa in esame considerando i vincoli e le tipologie di problemi presenti.

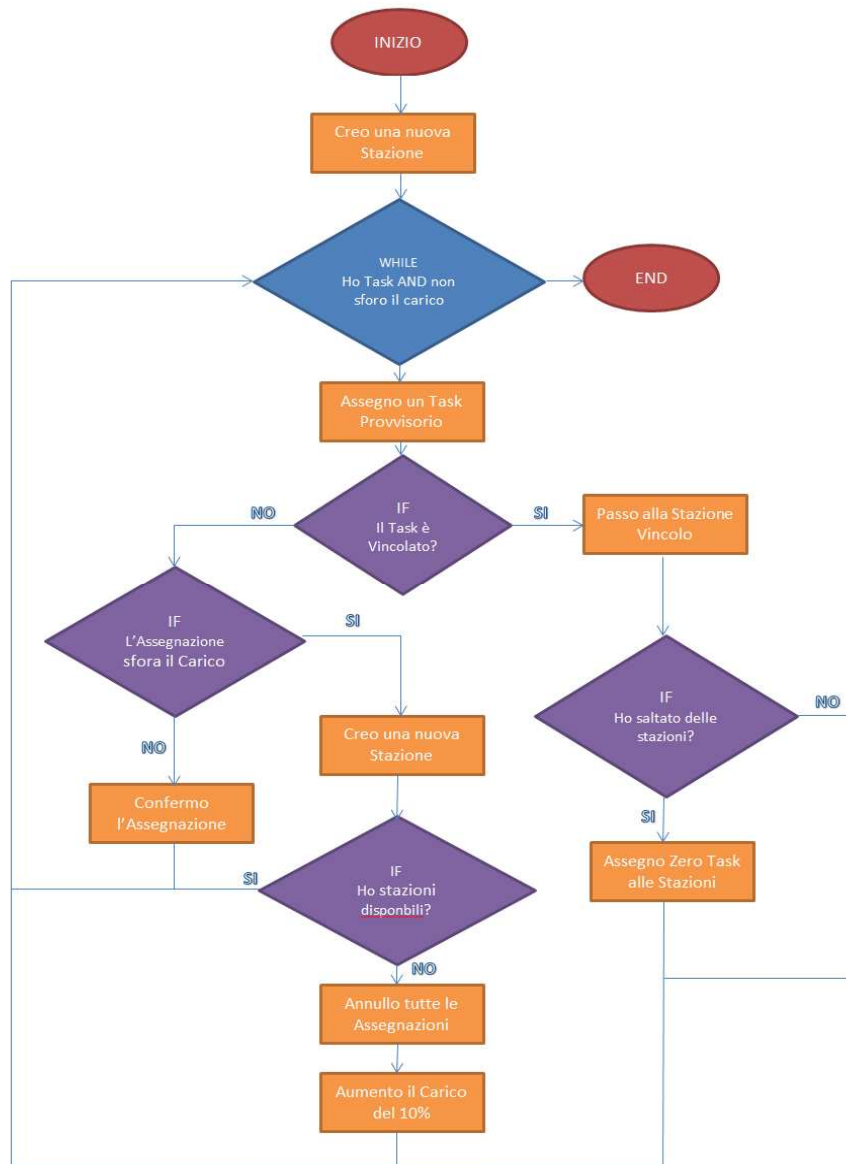


Figura 7.25 – Flowchart problema in esame.

Infatti oltre al vincolo limite di non superare il carico massimo scelto per le stazioni e la presenza di ulteriori operazioni da assegnare, essendo alcune di queste vincolate è necessario un sistema di controllo per verificare l'eventuale obbligo di dover assegnare l'operazione ad una determinata stazione, con la conseguente chiusura della stazione corrente, comunque anche se non si era verificata la condizione di chiusura precedente e più generale, e l'assegnazione di zero operazioni a tutte le stazioni comprese tra la corrente e quella a cui andrà assegnata l'operazione vincolata.

Un altro problema che si è dovuto affrontare è stato la dimensione molto variabile dei carichi dei singoli task, alcuni dei quali possono avere un'incidenza molto elevata sul takttime totale della stazione, che può causare uno slittamento all'assegnazione del task alla stazione successiva, infatti non essendo sottomultipli del carico totale scelto, l'accumulo delle operazioni assegnate può sfiorare leggermente il takttime scelto con la conseguente assegnazione alla stazione successiva dell'operazione; questo fenomeno, abbinato ad un takt time di riferimento non troppo ridondante, nei primi step, si può propagare di stazione in stazione, conseguendo nella non assegnazione di alcuni task, rischiando di far sfiorare l'intera linea; i coefficienti di sbilanciamento, in tal caso, potrebbero risultare bassi, e per alcune stazioni, anche in relazione ai vincoli, pari a zero, e la schedulazione della linea non risolta.

Per evitare questo problema è stato necessario inserire un sistema di controllo che in caso si veda presentare la richiesta di un numero di stazioni maggiore rispetto al disponibile, riassetta l'assegnazione a tutte le stazioni e fa ri eseguire la logica, ma con un incremento percentualmente definito del valore di riferimento per il takt time di riferimento per le stazioni in modo da contenere piccole maggiorazioni dovute a questa irregolarità nelle dimensioni dei task.

Per verificare la correttezza dell'algoritmo proposto, verrà definito nel codice di simulazione un modello in due parti, una che costituisce l'algoritmo di schedulazione, a valle della lettura dei carichi, dei vincoli, e di tutti i dati necessari; ed una seconda parte che acquisisce la schedulazione così ottenuta per impiegarla nel modello del sistema linea e verificare la schedulazione, con il calcolo dei parametri di output della linea produttiva, quali takttime, sbilanciamenti, coefficienti di sbilanciamento ecc. Per l'esecuzione dei run effettuati verrà impiegato il modulo grazie ancora ad Autostat, per verificare gli intervalli di confidenza e la significatività dei valori di output.

## **7.9 Costruzione del modello su automod.**

Una volta stabilito il flowchart che individua l'algoritmo risolutivo della costruzione del modello, si passa alla costruzione di quest'ultimo utilizzando il software Automod, per poter poi avere un riscontro effettivo sulla sua efficacia. Si utilizza sempre come base su cui costruire il modello, quello precedente sviluppato per una soluzione a risorse ridotte, apportando comunque sostanziali modifiche alla compilazione.

Si implementerà la scrittura del programma importando i dati, da una file .csv ricavato dal foglio di calcolo impiegato per ricavare tutte le informazioni statiche possibili, che permetterà di acquisire tutti i dati sensibili necessari, quali, i tempi dei task, la famiglia, il numero, il tipo di pompa, gli optional, il numero di stazioni e i coefficienti di sbilanciamento, definiti nel modello come attributi, variabili, carichi o processi. Questo attribuisce al modello maggiore versatilità rispetto alla variazione delle configurazioni.

### **7.9.1 Sistema principale per la distribuzione dei task**

Come "struttura" del modello, cioè configurazione dimensionale linea, stazioni, operatori, eccetera, si poteva impiegare quella già definita nella fase precedente. Anche molte porzioni di codice si sono utilizzate così come definite precedentemente, o adattate, modificate ed integrate allo sviluppo attuale.

Rispetto però alla situazione precedente, si è definito nel codice, prima della parte di emulazione della vera e propria linea, una parte di codice che realizzasse la schedulazione vera e propria, da impiegare come configurazione per l'emulazione del processo di assemblaggio.

Pertanto, avendo uno svariato numero di modelli possibili, con combinazioni di task molto differenti, un numero di task molto elevato, e per poter mantenere la soluzione espandibile ad un numero N di task su un numero K di stazioni generiche, quindi applicabile ad un qualsiasi problema di bilanciamento di linee produttive manuali a layout fisso, che può essere inquadrato in questa tipologia, sono effettuate una serie di operazioni a

“tempo zero”, cioè che non faranno scorrere del tempo nella simulazione costituendo operazioni di configurazione, inizializzazione o calcolo, che consisteranno nel distribuire i task nelle varie stazioni. Questa parte di codice, effettuerà la lettura dei dati, delle configurazioni, e determinerà l’attribuzione dinamica dei task per qualsiasi item, per qualsiasi oggetto che deve andare in produzione, permettendo l’ottimale bilanciamento della linea per ciascun prodotto di volta in volta che si presenta richiesto nel piano produttivo, permettendo quindi la possibilità di un susseguirsi modelli anche totalmente differenti, nel rispetto dei vincoli di esecuzione di operazioni vincolate presso stazioni.

```

1 /*****
2
3
4 begin model initialization function /*azioni preliminari, eseguite prima di far partire il modello*/
5
6 create 1 load of type L_dummy_pause to P_pause
7 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op1
8 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op2
9 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op3
10 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op4
11 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op5
12 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op6
13 create 1 load of type L_dummy_reconfig to P_op7
14 create 1 load of type LT_Thread to P_read /*load fittizio per richiamare il programma*/
15 return true
16
17 end
18
19
20
21 /* kinematic */
22
23 begin P_op1 arriving
24
25 move into kin.sta36(1)
26 travel to kin.stal(1)
27 move into kin.stal(1)
28 send to die
29
30 end
31
32 begin P_op2 arriving
33
34 move into kin.sta25(2)

```

Figura 7.26 – Screenshot linguaggio inizio modello.

```

AutoMod Editor - [mmmm-]
File Edit Search View Window Help
88
89 /* lettura dati */
90
91
92 begin P_read arriving
93
94   set V_read = 1
95   set V_riga = 0
96
97   while V_read = 1 do begin
98
99     read A_coef Op1, A_coef Op2, A_coef Op3, A_coef Op4, A_coef Op5, A_coef Op6,
100     A_coef Op7, A_coef Op8, A_coef Op9, A_coef Op10, A_coef Op11, A_coef Op12,
101     A_coef Op13, A_coef Op14, A_coef Op15, A_coef Op16, A_coef Op17, A_coef Op18,
102     A_coef Op19, A_coef Op20, A_coef Op21, A_coef Op22, A_coef Op23, A_coef Op24,
103     A_coef Op25, A_coef Op26, A_coef Op27, A_coef Op28, A_coef Op29, A_coef Op30,
104     A_coef Op31, A_coef Op32, A_coef Op33, A_coef Op34 from "arc/operazionimatricepiubasso.txt"
105     with delimiter "\t"
106
107     read A_numOp, A_numStat, A_OpVin1, A_OpVin2, A_OpVin3, A_StatVin1,
108     A_StatVin2, A_StatVin3 from "arc/vincolinimatrice.txt" with delimiter "\t"
109     read A_tacktime from "arc/tacktimeimatrice.txt" with delimiter "\t"
110
111
112   at end
113   begin
114     set V_read = 2
115   end
116
117   increment V_riga by 1
118
119   /* print "A_coef Op3 = " A_coef Op3 to message
120   print "A_coef Op34 = " A_coef Op34 to message
121   print "A_numOp = " A_numOp to message */ /*scrittura di controllo della lettura */
122
123   set V_array_coef Op(V_riga, 1) to A_coef Op1 /* (V_k) oppure (V_cont_numOp) assegno gli attributi all'array*/
124   set V_array_coef Op(V_riga, 2) to A_coef Op2
125   set V_array_coef Op(V_riga, 3) to A_coef Op3
126   set V_array_coef Op(V_riga, 4) to A_coef Op4
127   set V_array_coef Op(V_riga, 5) to A_coef Op5
128   set V_array_coef Op(V_riga, 6) to A_coef Op6
129   set V_array_coef Op(V_riga, 7) to A_coef Op7
130   set V_array_coef Op(V_riga, 8) to A_coef Op8
131   set V_array_coef Op(V_riga, 9) to A_coef Op9
132   set V_array_coef Op(V_riga, 10) to A_coef Op10
133   set V_array_coef Op(V_riga, 11) to A_coef Op11
134   set V_array_coef Op(V_riga, 12) to A_coef Op12
135   set V_array_coef Op(V_riga, 13) to A_coef Op13
136   set V_array_coef Op(V_riga, 14) to A_coef Op14
137   set V_array_coef Op(V_riga, 15) to A_coef Op15
138   set V_array_coef Op(V_riga, 16) to A_coef Op16
139   set V_array_coef Op(V_riga, 17) to A_coef Op17
140   set V_array_coef Op(V_riga, 18) to A_coef Op18
141   set V_array_coef Op(V_riga, 19) to A_coef Op19
142   set V_array_coef Op(V_riga, 20) to A_coef Op20
143   set V_array_coef Op(V_riga, 21) to A_coef Op21
144   set V_array_coef Op(V_riga, 22) to A_coef Op22
145   set V_array_coef Op(V_riga, 23) to A_coef Op23
146   set V_array_coef Op(V_riga, 24) to A_coef Op24
147   set V_array_coef Op(V_riga, 25) to A_coef Op25
148   set V_array_coef Op(V_riga, 26) to A_coef Op26
149   set V_array_coef Op(V_riga, 27) to A_coef Op27
150   set V_array_coef Op(V_riga, 28) to A_coef Op28
151   set V_array_coef Op(V_riga, 29) to A_coef Op29
152   set V_array_coef Op(V_riga, 30) to A_coef Op30
153   set V_array_coef Op(V_riga, 31) to A_coef Op31
154   set V_array_coef Op(V_riga, 32) to A_coef Op32
155   set V_array_coef Op(V_riga, 33) to A_coef Op33
156   set V_array_coef Op(V_riga, 34) to A_coef Op34
157   /*set A_array_coef Op(35) to 0*/
158
159   /*print "A_array_coef Op(3) = " A_array_coef Op(3) to message
160   print "A_array_coef Op(33) = " A_array_coef Op(33) to message
161   print "A_array_coef Op(34) = " A_array_coef Op(34) to message*/ /*scrittura per verificare l'assegnazione all'array*/
162
163   set V_arrayVin(V_riga, 1,1) to A_OpVin1 /* (1,V,v) assegnazione dell'operazioni vincolate all'array dei vincoli,
164   vincolo 100 fittizio per non fare dare l'errore quando finisco i vincoli*/
165   set V_arrayVin(V_riga, 1,2) to A_OpVin2
166   set V_arrayVin(V_riga, 1,3) to A_OpVin3
167   set V_arrayVin(V_riga, 1,4) to 100
168
169
170   /*print "V_arrayVin(1,2) = " V_arrayVin(1,2) to message*/ /*scrittura per verificare l'assegnazione all'array*/
171
172   set V_arrayVin(V_riga, 2,1) to A_StatVin1 /* (2,V,v) assegnazione alle stazioni delle operazioni vincolate */
173   set V_arrayVin(V_riga, 2,2) to A_StatVin2
174   set V_arrayVin(V_riga, 2,3) to A_StatVin3
175
176   set V_tacktime(V_riga) to A_tacktime /*trasferimento attributi a variabili per il programma*/
177   set V_numOpTot(V_riga) to A_numOp
178
179   /*print "V_cont_numOpTot " V_cont_numOpTot to message
180   print "V_tacktime " V_tacktime to message*/ /*scrittura di verifica*/
181   /*print "V_arrayVin(2,3) = " V_arrayVin(2,3) to message*/
182
183 end /*fine while*/
184 /*print V_array_coef Op(2, 3) to message*/
185
186 /* set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 1) to 5
187 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 2) to 4
188 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 3) to 7
189 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 4) to 2
190 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 5) to 5
191 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, 6) to 11*/
192
193
194 create 1 load of type LT_Thread to P_assegnazione /*load fittizio per richiamare il programma*/
195
196 end
197
198
199

```

Figura 7.27 – Screenshot lettura dati.

Il programma di attribuzione dei task inizia con il processo “P\_read” che si occupa di leggere e caricare le informazioni dai file esterni, “operazioni.txt”, “vincoli.txt” e “tacktime.txt” in cui sono contenute rispettivamente le informazioni riguardanti:

- I coefficienti di sbilanciamento delle singole operazioni calcolate su foglio excel mediante il tacktime preso in considerazione che vengono salvati come attributi di tipo reale:

A\_coeff\_OpN

- numero di operazioni totale che vengono salvati come attributi di tipo intero:

A\_numOp

- numero di stazioni che vengono salvati come attributi di tipo intero:

A\_numStat

- operazioni vincolate che vengono salvati come attributi di tipo intero:

A\_OpVinN

- stazione assegnate alla operazioni vincolate che vengono salvati come attributi di tipo intero:

A\_StatVinN

- tacktime che vengono salvati come attributi di tipo intero:

A\_tacktime

Il programma legge le informazioni tramite un ciclo “while” iterativo, che consente di memorizzare poi ogni riga che corrisponde al diverso modello di pompa su delle variabili array a più dimensioni che consentono di richiamare i dati ogni qual volta necessario: ogni attributo viene quindi poi identificato univocamente nella matrice su cui è caricata:

- A\_coeff\_OpN diventa V\_array\_coeff\_Op(V\_riga, N), variabile array a 2 dimensioni 127x34.
- A\_OpVinN e A\_StatVinN diventano V\_arrayVin(V\_riga, K, M), variabile array a 3 dimensioni 127x3x3.

Acquisite tutte le informazioni e caricate sulle variabili inizia il processo “P\_assegnazione” che consiste nella logica di attribuzione dei task alle varie stazioni, in tale processo sono presenti diversi cicli iterativi e possibili alternative per tenere conto di ogni eventualità. Viene eseguito all’inizio un primo ciclo “while” iterativo che si occupa del reiterare il processo per ognuna delle 127 combinazioni possibili nel quale ogni volta vengono inizializzati a zero le variabili array  $V\_array\_tacktime(V\_riga, Stat)$ , che terranno conto della somma dei coefficienti di sbilanciamento delle operazioni assegnate alla stazione in considerazione e altri contatori necessari per il funzionamento del programma.

```

197
198
199
200
201      /*Programma COMSOAL attribuzione task con tacktime minimo*/
202
203begin P_assegnazione arriving
204
205set V_riga to 1 /* parto dalla prima riga */
206
207  while (V_riga <= 127) do begin /* finchè ho righe*/
208
209      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 1) to 0 /* (V_stat) inizializzo a zero i tempi delle stazioni*/
210      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 2) to 0
211      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 3) to 0
212      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 4) to 0
213      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 5) to 0
214      set V_array_tacktimeStat(V_riga, 6) to 0
215
216
217      set V_cont_numOpTot to 1 /* contatore numero operazioni totali, non viene mai azzerato*/
218      set V_uscita to 1 /* variabile di controllo per uscire dal while se finisco le stazioni*/
219      set V_nuovotempo_provvisorio to 0 /* variabile di appoggio per controllare una volta aggiunta
220          l'operazione di non sfiorare il tacktime*/
221      set V_stat to 1 /* numero della stazioni a cui si stanno assegnando i task*/
222      /*set V_nuovotempo_provvisorioTot(V_stat) to 0 - tempo delle operazioni assegnate a quel momento alla stazione*/
223      set V_cont_opVin to 1 /* contatore operazioni vincolate*/
224      set V_cont_opAssegnate to 0 /* contatore operazioni assegnate alla stazione, azzerato ogni volta che ho
225          una stazione nuova*/
226
227
228
229
230

```

Figura 7.28 – Screenshot inizializzazione contatori.

Dopo di che inizia l’assegnazione della prima operazione alla prima stazione e si utilizza un ulteriore ciclo “while” iterativo che si occupa di controllare che la stazione in considerazione non sfiori il tacktime massimo previsto e la presenza di ulteriori operazioni da poter assegnare; in questo ciclo infatti vengono aggiunte una per volta le operazioni alla stazione, in cui dovranno essere effettuati diversi controlli per poterne accettare l’assegnazione. Infatti all’interno di questo ciclo viene controllato che l’operazione appena assegnata non causi uno sfioramento del tacktime assegnato e quindi confermare o meno l’assegnazione dell’operazione e il

controllo sull'eventuale vincolo ad una determinata stazione della operazione esaminata.

Nel primo caso, in cui l'operazione ecceda il takttime, il programma conclude l'assegnazione delle operazioni alla stazione considerata e passa alla stazione successiva; mentre nel secondo caso, il controllo del vincolo, se si è nella situazione in cui l'operazione in considerazione è vincolata ad una determinata stazione, verifica se la stazione a cui si stanno assegnando le operazioni è la medesima di quella a cui l'operazione vincolata deve essere assegnata e nel caso ne conferma l'assegnazione e procede con l'operazione successiva.

Nel caso invece in cui l'operazione è vincolata, ma non la si stia assegnando alla stazione associata, il programma termina l'assegnazione alla stazione in considerazione e passa automaticamente alla stazione a cui è vincolata l'operazione attribuendo direttamente a zero i task assegnati alle stazioni comprese tra quella appena conclusa e quella a cui è associata l'operazione vincolata appena iniziata. Nel caso risulti insufficiente il numero di stazioni disponibili, è presente un sistema di controllo che nell'eventualità riassegna a zero i valori dell'array `V_array_tacktimestat(V_riga, NumStat)` che contiene i tempi assegnati alle stazioni per quella determinata pompa e aumenta del 10% il valore di takttime di confronto, questa operazione viene reiterata finchè ci saranno operazioni che sfiorano il numero massimo di stazioni disponibili.

Questo sistema di attribuzione viene svolto per ogni tipologia di pompa fino alla completa assegnazione di tutti i task disponibili in modo da creare una distribuzione più equa possibile tra le stazioni rispettando però i vincoli presenti.

Ogni volta che conclude l'assegnazione di una tipologia di pompa, il programma salva i dati ottenuti, cioè il numero di operazioni assegnate e i takttime associati alla somma delle operazioni attribuite ad ognuna delle stazioni, in una matrice formata da una variabile array a 2 dimensioni `127x6 V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat)`, indicizzata per tipologia di pompa (riga) e stazione (colonna), in modo da essere poi richiamati dal programma

di simulazione della produzione ogni qual volta quella determinata tipologia di pompa viene schedulata nel piano di produzione.

```

230
231
232
233 while ((V_cont_numOpTot <= V_cont_numOpTot or */ V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) <= V_tacktime(V_riga))
234 and (V_uscita = 1)) do begin /* se il numero delle operazioni a quel momento
235 è minore di quelle totali o il tempo di quella
236 stazione è minore del tacktime e se ho ancora
237 stazioni disponibili(V_uscita
238 variabile di controllo)*/
239
240 set V_nuovotempo_provvisorio to (V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) + V_array_coef Op(V_riga, V_cont_numOpTot))
241 /* variabile di appoggio del tempo è uguale al tempo
242 della stazione a quel momento più la nuova operazione*/
243
244 /*2a*/ if ((V_cont_numOpTot < V_arrayVin(V_riga, 1,V_cont_OpVin)) or
245 (V_cont_numOpTot = V_arrayVin(V_riga, 1,V_cont_OpVin) and V_stat = V_arrayVin(V_riga, 2,V_cont_OpVin)))
246 /* se il numero dell'operazione è minore di quella vincolata (operazione non vincolata) o
247 sono nella stazione di quella vincolata*/
248
249 then begin
250 /*1a*/ if (V_nuovotempo_provvisorio <= V_tacktime(V_riga)) /*se la variabile del tempo di appoggio
251 con l'operazione in + è ancora minore del tacktime*/
252
253 then begin
254 set V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) to V_nuovotempo_provvisorio
255 /* il tempo di appoggio diventa il tempo effettivo*/
256 increment V_cont_OpAssegnate by 1 /* aumento il contatore delle operazioni di quella stazione*/
257 increment V_cont_numOpTot by 1 /* aumento il contatore totale delle operazioni*/
258
259 if (V_cont_numOpTot = V_numOpTot(V_riga) + 1) /* se arrivo all'ultimo task*/
260 then begin
261 print "Tempo stazione " V_stat " e": " V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) to message
262 /* dichiaro il tempo della stazione appena conclusa*/
263 print "Numero operazioni della stazione " V_stat " sono: " V_cont_OpAssegnate to message
264 /* dichiaro il numero di operazioni della stazione*/
265 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat) to V_cont_OpAssegnate
266 /*salvo il valore assegnato a V_cont_OpAssegnate che verrà poi azzerato*/
267 set V_uscita to 2 /*per uscire dal while = operazioni finite*/
268 print " Tipo pompa eseguita numero: " V_riga " su 127 " to message
269 /* numero della pompa (riga) eseguita*/
270 increment V_riga by 1 /* incremento la riga */
271 end
272
273 if (V_cont_numOpTot = V_arrayVin(V_riga, 1,V_cont_OpVin)
274 and V_stat = V_arrayVin(V_riga, 2,V_cont_OpVin)) then
275 /* se sono nella stazione op vincolata, passo al confronto del vincolo successivo*/
276 begin
277 increment V_cont_OpVin by 1
278 end
279
280 /*1a*/ end
281 /*1b*/ else /* se invece sfioro il tempo*/
282 begin
283 print "Tempo stazione " V_stat " e": " V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) to message
284 /* dichiaro il tempo della stazione appena conclusa*/
285 print "Numero operazioni della stazione " V_stat " sono: " V_cont_OpAssegnate to message
286 /* dichiaro il numero di operazioni della stazione*/
287 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat) to V_cont_OpAssegnate
288 /*salvo il valore assegnato a V_cont_OpAssegnate che verrà poi azzerato*/
289 increment V_stat by 1 /* passo alla stazione successiva*/
290
291 if V_stat=7 then begin
292 print "e' stato necessario aumentare il tacktime" to message
293
294 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 1) to 0 /* (V_stat) inizializzo a zero i tempi delle stazioni*/
295 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 2) to 0
296 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 3) to 0
297 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 4) to 0
298 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 5) to 0
299 set V_array_tacktimeStat(V_riga, 6) to 0
300
301 set V_cont_numOpTot to 1 /* contatore numero operazioni totali, non viene mai azzerato*/
302 set V_nuovotempo_provvisorio to 0 /* variabile di appoggio per controllare
303 una volta aggiunta l'operazione di non sfiorare il tacktime*/
304 set V_stat to 1 /* numero della stazione a cui si stanno assegnando i task*/
305 /*set V_nuovotempo_provvisorioTot(V_stat) to 0 - tempo delle operazioni assegnate
306 a quel momento alla stazione*/
307 set V_cont_OpVin to 1 /* contatore operazioni vincolate*/
308 set V_cont_OpAssegnate to 0 /* contatore operazioni assegnate alla stazione,
309 azzerato ogni volta che ho una stazione nuova*/
310 set V_tacktime(V_riga) to (V_tacktime(V_riga) * 1.1)
311
312 end
313
314 set V_cont_OpAssegnate to 0 /* azzero il numero di operazioni per la nuova stazione*/
315 /*1b*/ end
316 /*2a*/ end
317 /*2b*/ else /* se l'operazione è vincolata*/
318 begin
319 print "Tempo stazione " V_stat " e": " V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) to message
320 /* dichiaro il tempo della stazione appena conclusa*/
321 print "Numero operazioni della stazione " V_stat " sono: " V_cont_OpAssegnate to message
322 /* dichiaro il numero di operazioni della stazione*/
323 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat) to V_cont_OpAssegnate
324 /*salvo il valore assegnato a V_cont_OpAssegnate che verrà poi azzerato*/
325
326 while (V_stat + 1 < V_arrayVin(V_riga, 2,V_cont_OpVin))do begin
327 /*se ho delle stazioni vuote che salto nel primo ciclo while le dichiaro vuote*/
328 increment V_stat by 1
329 print "Tempo stazione " V_stat " e": 0" to message
330 print "Numero operazioni della stazione " V_stat " sono: 0" to message
331 set V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat) to 0 /* salvo che non ho operazioni*/
332 set V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) to 0
333 end
334
335 set V_stat to V_arrayVin(V_riga, 2,V_cont_OpVin) /* vado alla stazione vincolata*/
336 set V_cont_OpAssegnate to 0 /* azzero il numero di operazioni per la nuova stazione*/
337 increment V_cont_OpVin by 1 /*passo a confrontare le operazioni con l'operazione vincolata successiva*/
338 /*2b*/ end
339
340 end /*chiusura while interno*/
341 /* print V_arrayNumOp to "arc/distribuzionezmatrice.txt" */
342 /* scrittura di controllo su file esterno txt*/
343 end /*chiusura while più esterno */
344 /*create 1 load of type LT_Thread to P_scritturadati*/
345
346 create 1 load of type LT_Thread to P_operatoriliberi
347
348
349
350 print V_arrayNumOpAssegnate to "arc/2distribuzioneoperazioni.txt"
351 print V_array_tacktimeStat to "arc/2tacktimestazioni.txt"
352 print V_tacktime to "arc/2tacktimeinnea.txt"
353end
354
355
356
357
358
359
360/*begin P_scritturadati arriving /*Verifica di aver salvato correttamente i dati delle assegnazioni*/
361set V_uscita to 1

```

Figura 7.29 – Screenshot logica assegnazione operazioni.

## 7.9.2 Sistema di simulazione della produzione.

```

823
824/*****PROCESSO PRODUZIONE*****/
825
826
827
828begin P_read2 arriving
829
830/*set V_Seat to stream0 sample integer%127+1*/ /*selezione random*/
831 set V_cont_PompeComplete to 0 /* inizializzazione contatore di pompe finali
832 viene aumentato alla fine della 6 stazioni per contare quante pompe sono state completate */
833 set V_riga to 1 /* conteggio delle righe*/
834 set V_uscita to 1 /* variabile di appoggio per uscire dal ciclo while subito qui sotto*/
835
836
837
838
839 /*2*/ while (V_riga < 128) do begin /* iterazione per tutte le righe*/
840
841     read V_tempoOp(V_riga, 1), V_tempoOp(V_riga, 2), V_tempoOp(V_riga,3),
842     V_tempoOp(V_riga, 4), V_tempoOp(V_riga, 5), V_tempoOp(V_riga, 6), V_tempoOp(V_riga, 7),
843     V_tempoOp(V_riga, 8), V_tempoOp(V_riga, 9), V_tempoOp(V_riga, 10), V_tempoOp(V_riga, 11),
844     V_tempoOp(V_riga, 12), V_tempoOp(V_riga, 13), V_tempoOp(V_riga, 14), V_tempoOp(V_riga, 15),
845     V_tempoOp(V_riga, 16), V_tempoOp(V_riga, 17), V_tempoOp(V_riga, 18), V_tempoOp(V_riga, 19),
846     V_tempoOp(V_riga, 20), V_tempoOp(V_riga, 21), V_tempoOp(V_riga, 22), V_tempoOp(V_riga, 23),
847     V_tempoOp(V_riga, 24), V_tempoOp(V_riga, 25), V_tempoOp(V_riga, 26), V_tempoOp(V_riga, 27),
848     V_tempoOp(V_riga, 28), V_tempoOp(V_riga, 29), V_tempoOp(V_riga, 30), V_tempoOp(V_riga, 31),
849     V_tempoOp(V_riga, 32), V_tempoOp(V_riga, 33),
850     V_tempoOp(V_riga, 34) from "arc/durataoperazioniproduzione.txt" with delimiter "\t"
851     /*deve essere un array 2 dimensioni 127x34, sono i tempi di ognuno dei 34 task indicizzati
852     per ogni riga*/
853     read V_numPompeStessoModello(V_riga) from "arc/numeroprovaiproduzione.txt" with delimiter "/"
854     /* numero di pompe da fare dello stesso tipo, file di una colonna*/
855
856     wait for 0.6 sec
    
```

Figura 7.30 – Screenshot lettura tempi.

Attribuiti i task alle varie stazioni, è stata finalmente prodotta la schedulazione secondo la logica decisa, e viene ora implementata la parte di codice che emulerà la realizzazione del piano di produzione appena elaborato e della messa in produzione dei prodotti: anche in questo caso i dati necessari all’elaborazione vengono importati tramite documento di testo, in più vengono utilizzati i risultati ottenuti dall’assegnazione precedentemente dei task che vengono letti e caricati sul programma a tempo zero ed associati a variabili o ad attributi dei load, in modo da poter essere richiamati ogni qual volta necessari. Il primo processo denominato “P\_read2” si occupa quindi dell’acquisizione dei dati, tramite un ciclo “while”, necessario a reiterare la lettura ad ogni riga del documento che corrisponde sempre ad ogni tipologia di pompa che può essere schedulata, quindi la lettura verrà eseguita per tutte le 127 righe, da 3 documenti di testo, “durataoperazioniproduzione.txt”, “premontaggio.txt”, “numeroprovaiproduzione.txt”, vengono rispettivamente caricati i dati riguardanti:

- Durata delle operazioni in centesimi di minuto vengono salvate in una variabile array a 2 dimensioni 127x34 di tipo intero, indicizzati per tipologia (riga) e numero del task (colonna):

V\_tempoOp(V\_riga, N)

- numero delle pompe dello stesso tipo da realizzare salvato in una variabile array a 1 dimensione di tipo intero, indicizzato per tipologia:  
V\_numPompeStessoModello(V\_riga)
- famiglia della pompa salvato in una variabile array a 1 dimensione di tipo stringa, indicizzato per tipologia:  
V\_family(V\_riga)
- codice delle pompa salvato in una variabile array a 1 dimensione di tipo stringa, indicizzato per tipologia:  
V\_code(V\_riga)
- comando di azionamento salvato in una variabile array a 1 dimensione di tipo stringa, indicizzato per tipologia:  
V\_comand(V\_riga)
- optional previsti salvato in una variabile array a 1 dimensione di tipo stringa, indicizzato per tipologia:  
V\_optional(V\_riga)
- durata delle operazioni di premontaggio in centesimi di minuto e la sua durata totale vengono salvate in una variabile array a 2 dimensioni 127x34 di tipo intero, indicizzati per tipologia (riga) e numero del task (colonna):  
V\_premontaggio(V\_riga, N)

Una volta caricati come array, tutte queste informazioni vengono associate ad attributi del load, in modo da poter essere richiamati ed essere disponibili simultaneamente quando viene mandato in produzione il determinato prodotto, nel programma viene caricata la variabile array in un corrispondente attributo del load, e viene persa l'indicizzazione che non è più necessaria per l'individuazione dei dati.

Ora si incontra un nuovo ciclo "while" iterativo, che si occupa di mandare in produzione ogni tipologia di pompa per il numero di volte per cui

è richiesta una pompa con quelle caratteristiche, al suo interno sono presenti poi 2 possibilità di avanzamento, cioè la necessità o meno del modello di dover passare per il premontaggio. Come già detto le operazioni di premontaggio non vengono tenute in considerazione in questa simulazione, perché non facenti parte della schedulazione della linea produttiva, ma viene comunque implementata nel programma la sua presenza con i relativi tempi e operatore al seguito per avere una più precisa e reale simulazione. Quindi in caso di premontaggio verrà clonato un load al processo “P\_prem” che una volta concluso invierà il load alla stazione 1, alla quale invece andrà direttamente in caso questo non sia presente.

```

AutoMod Editor - [mmmm.m-]
File Edit Search View Window Help
940
941/*****
942STAZIONE 1
943*****
944
945begin P_stal arriving
946
947  move into Q(1) /* vado alla fila 1 */
948
949  set V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) to 1
950 /*contatore operazioni, ricomincia da 1 ogni nuova pompa, cioè sia se cambio riga(tipo di pompa),
951 sia se faccio un'altra pompa della stessa riga*/
952
953      print "numero pompa" A_cont_PompeStessoModello to message/* /*scrittura di controllo*/
954  travel to conv.stal /*VA VERSO LA STAZIONE SUCCESSIVA*/
955  move into conv.stal /*AMBIENTE CONVEYOR*/
956  move into kin.stal(1) /* ambiente kinematic*/
957
958
959  while (V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) <= V_arrayNumOpAssegnate(A_riga, 1))
960 /* finché il numero di operazioni eseguite è minore o uguale di quelle da fare in questa stazione
961 faccio una nuova operazione */
962  do begin
963
964
965
966
967      set V_tempoEsecuzioneR1(A_riga, V_cont_OpEseguite( A_riga, A_cont_PompeStessoModello)) to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_
968
969
970
971
972      /*print "V_tempoEsecuzioneR1(A_riga, V_cont_OpEseguite( A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
973      " V_tempoEsecuzioneR1(A_riga, V_cont_OpEseguite( A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
974      to message*/ /*scrittura di controllo*/
975
976  if (V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) = 1)
977 /* fa muovere l'camino solo alla prima operazione che deve fare*/
978  then begin
979      travel to kin.sta2(1) /* lo gira di 180°*/
980
981      use R(1) for t V_tempoEsecuzioneR1*0.6*0.925, V_tempoEsecuzioneR1*0.6, V_tempoEsecuzioneR1*0.6*1.15
982 /*operazione che esegue l'operatore*/
983      print "tempo " V_tempoEsecuzioneR1(A_riga, V_cont_OpEseguite( A_riga, A_cont_PompeStessoModello)) to message
984
985      travel to kin.stal(1) /* posizione di partenza*/
986
987  end
988
989  else /* per tutte le operazioni tranne la prima */
990  begin
991      use R(1) for t V_tempoEsecuzioneR1*0.6*0.925, V_tempoEsecuzioneR1*0.6, V_tempoEsecuzioneR1*0.6*1.15
992 /*operazione che esegue l'operatore*/
993
994  end
995
996      /*print V_tOp(A_riga, V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello)) to message*/
997  increment V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) by 1 /* passo all'operazione successiva */
998
999  end /*esco dal while */ /*print V_tOp(A_riga, V_k) to message*/
1000
1001
1002      /* print "durata ultima operazione stazione 1 "
1003      V_tOp(A_riga, V_cont_OpEseguite(A_riga, A_cont_PompeStessoModello)) to message*/
1004      /*set V_kin1 to 1*/
1005
1006  move into Q(2) /* vado alla fila 2*/
1007
1008  travel to conv.sta2
1009  move into conv.sta2
1010
1011  send to P_sta2
1012
1013end
1014
1015/*****
1016STAZIONE 2

```

Figura 7.31 – Screenshot logica prima stazione.

Inviato alla stazione 1, il load arriva al processo “P\_sta1” e viene posizionato nella fila “Q(1)” della postazione, in attesa che l’operatore “R(1)” appena sia libero, inizi le operazioni di assemblaggio, infatti appena l’operatore è disponibile il load viene caricato sul primo tratto di conveyor “conv.sta1” e viene posizionato sulla stazione 1 “sta1” dove inizieranno le operazioni.

Nel programma avvengono quindi 2 modalità in parallelo, una sul sistema conveyor “conv.sta1”, che si occupa della movimentazione del load e una sul sistema kinematic “kin.sta1(1)”, che si occupa invece della movimentazione dell’operatore occupato alla realizzazione dei task assegnati. A causa del numero variabile e dinamico delle operazioni assegnate di volta in volta alla stazione è necessario utilizzare un ciclo iterativo “while”, che consenta all’operatore di eseguire ogni operazione a lui attribuita, che tenga conto quindi delle operazioni eseguite fino a quel momento e le confronti con il dato che contiene il numero di operazioni assegnato alla stazione. Come detto nel paragrafo in cui si trattava dell’acquisizione dei tempi, viene utilizzato un tipo di distribuzione statistica di tipo triangolare, per far fronte ad eventuale ritardi o contrattamenti molto comuni nelle operazioni eseguite da personale e non da sistemi robotizzati, il software infatti durante la simulazione si occupa anche del far variare, secondo la distribuzione scelta, i tempi di completamento delle operazione nel range assegnato dalla distribuzione, nella definizione infatti dell’operazione da svolgere vengono forniti i 3 valori necessari, il valore minimo, cioè il 7.5% in meno (valore medio \* 0.925), il valore medio e il valore massimo cioè il 15% in più (valore medio \* 1.15), riconvertiti in secondi (moltiplicati per 0.6). Una volta concluse le operazioni da effettuare nella stazione il load viene mandato alla stazione successiva struttura nel medesimo modo con l’aggiunta però del controllo dell’eventuale assenza di operazioni assegnate alla stazione, in questo caso il sistema conveyor manda il carico alla stazione successiva e il sistema kinematic allontana l’operatore, che quindi risulta libero, dalla linea produttiva: viene creato un load fittizio che permette l’attivazione del processo “P\_hideop” che si occupa

dell'operatore libero per poi richiamarlo in postazione appena è di nuovo necessaria la sua presenza.

Concluse le operazioni della stazione 6, l'ultima presente, in caso sia stato effettuato il montaggio di una pompa di tipo V650 o V450, che sono quelle di dimensioni maggiori, viene creato un load fittizio che permette l'attivazione del processo "P\_hook", che simula l'utilizzo del gancio di sollevamento e infine viene aumentato un contatore che tiene conto del numero di pompe assemblate.

### ***7.10 Valutazione di ulteriori interventi: la riassegnazione degli operatori.***

In seguito all'analisi dei risultati delle simulazioni con il modello costruito si è visto (verranno esaminati e confrontati i dati nel dettaglio successivamente) che in alcuni casi il bilanciamento è stato notevolmente migliorato, mentre in altri a causa delle dimensioni molto variabili dei task, risulti essere presente una stazione decisamente sotto-caricata rispetto alle altre, mentre in altri, stazioni totalmente scariche con il relativo operatore libero.

Si può quindi valutare nel caso di stazioni decisamente sotto-caricate, indicativamente con coefficiente di sbilanciamento con valori uguali o minori al 30% di inibire la stazione ridistribuendo i task alla stazione precedente, a scapito di un peggioramento lieve del takttime, ma bilanciando in modo più equo la linea, ovvero migliorando i coefficienti di saturazione. In tali casi, si ha la possibilità, come nel caso in cui la stazione è completamente scarica, di avere 1 o 2 operatori liberi da poter affiancare in aiuto alle altre postazioni. Si può, infatti, pensare di assegnare questi operatori alle stazioni con i coefficienti di sbilanciamento peggiori, o totalmente ad una singola stazione, o rendere questi operatori "jolly" in modo che possano contribuire a più stazioni, riuscendo così ad abbassare il takttime delle stazioni a cui vengono riassociati sia quello dell'intera linea, con un notevole risparmio di tempo.

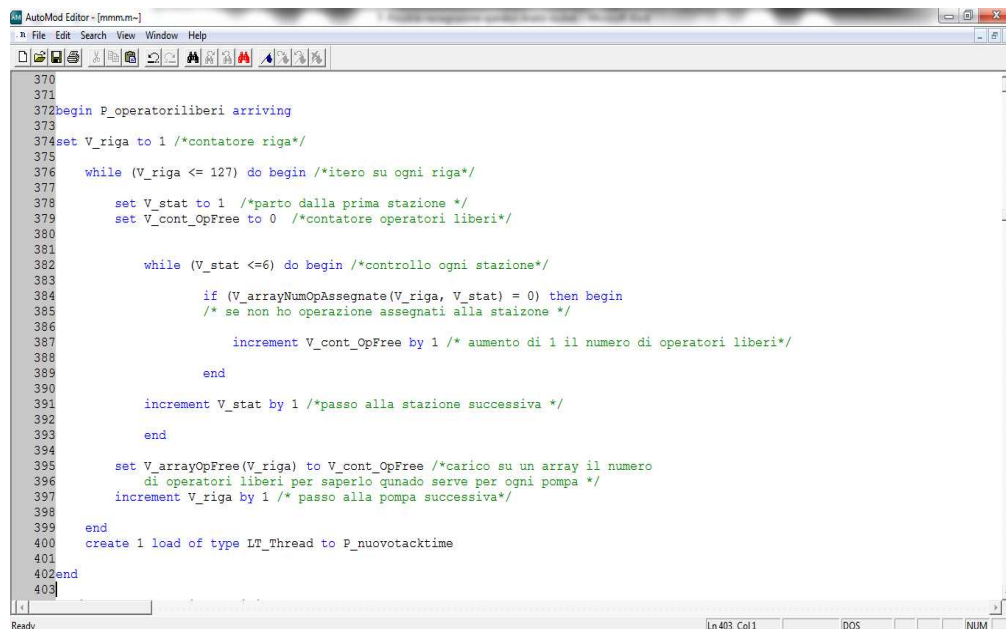
Data tale opportunità, è risultato ragionevole valutare un'ulteriore possibilità di miglioramento, scegliendo questa volta un opportuno nuovo

tacktime, di durata maggiore a quello precedentemente definito, dovendo risultare con più di un operatore assegnato un tempo disponibile maggiore.

Pertanto si cercherà nuovamente di suddividere i task nel modo più bilanciato possibile sempre con la medesima euristica precedente, ma configurando in tal caso il sistema con l'obbiettivo di avere un maggior numero possibile di operatori liberi da poter riassegnare a piacimento secondo le richieste della linea nelle stazioni maggiormente caricate.

Il primo step, risulta sicuramente peggiorativo rispetto alla soluzione precedente, in quanto viene appunto scelto un tacktime più alto con un conseguente aumento dei tempi medi di realizzazione dei prodotti, ma la successiva riassegnazione degli operatori avrà modo di poter abbassare fino ad un massimo del 30% il tacktime della linea e con l'apporto della simulazione si potrà verificare se questo porterà un miglioramento rispetto alla soluzione precedente.

### 7.10.1 Implemento del modello su Automod



```

370
371
372begin P_operatoriliberi arriving
373
374set V_riga to 1 /*contatore riga*/
375
376  while (V_riga <= 127) do begin /*itero su ogni riga*/
377
378    set V_stat to 1 /*parto dalla prima stazione */
379    set V_cont_OpFree to 0 /*contatore operatori liberi*/
380
381
382    while (V_stat <=6) do begin /*controllo ogni stazione*/
383
384      if (V_arrayNumOpAssegnate(V_riga, V_stat) = 0) then begin
385        /* se non ho operazione assegnati alla stazione */
386
387        increment V_cont_OpFree by 1 /* aumento di 1 il numero di operatori liberi*/
388
389      end
390
391      increment V_stat by 1 /*passo alla stazione successiva */
392
393    end
394
395    set V_arrayOpFree(V_riga) to V_cont_OpFree /*carico su un array il numero
396    di operatori liberi per saperlo quando serve per ogni pompa */
397    increment V_riga by 1 /* passo alla pompa successiva*/
398
399  end
400  create 1 load of type LT_Thread to P_nuovotacktime
401
402end
403

```

Figura 7.32 – Screenshot logica verifica presenza operatori liberi.

Come già detto la prima parte del programma sarà la medesima della precedente con l'unica modifica dei tempi dei tacktime di riferimento da utilizzare, sempre letti da file esterno.

Una volta ottenuta la suddivisione per massimizzare il numero di operatori liberi viene aggiunto il processo P\_operatoriliberi, in cui si verificherà per ogni modello di pompa la presenza di eventuali operatori liberi e il dato viene salvato sull'array V\_arrayOpFree(V\_riga).

```

403
404begin P_nuovotacktime arriving
405
406
407set V_riga to 1 /* parto dalla prima riga*/
408
409  while (V_riga <= 127) do begin /*itero su tutte le righe*/
410
411
412     set V_cont to 1 /* contatore per confrontare il numero di operatori liberi*/
413
414
415     while (V_cont <= V_arrayOpFree(V_riga)) do begin /* finchè ho operatori da riassegnare*/
416
417         set V_stat to 1 /* parto dalla prima stazione */
418         set V_tacktimeMax to V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) /* per il momento la prima
419 è la maggiore e la segno sulla variabile di appoggio */
420         set V_statMax to V_stat /* segno il numero della stazione che è maggiore
421 la segno su variabile di appoggio*/
422
423
424         while (V_stat < 6) do begin /* controllo tutte le stazioni*/
425
426             increment V_stat by 1 /* passo alla stazione successiva*/
427
428             if V_tacktimeMax < V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) then begin
429                 /* se la nuova stazione è maggiore*/
430                 set V_tacktimeMax to V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat)
431                 /* assegno alle variabili di appoggio la nuova stazione*/
432                 set V_statMax to V_stat
433             end
434
435         end
436
437         set V_array_tacktimeMax(V_riga) to V_tacktimeMax
438         /* assegno agli array la stazione che rappresenta il nuovo tacktime sotto coefficiente*/
439         set V_array_StatMax(V_riga) to V_statMax
440         set V_arrayappoggio(V_riga) = V_array_tacktimeStat(V_riga, V_statMax)*0.3
441         /*appoggio per calcolare il 30% con il nuovo operatore*/
442         decrement V_array_tacktimeStat(V_riga, V_statMax) by V_arrayappoggio(V_riga)
443         /* 30%*/ /*Tolgo il 30% dalla stazione + lente*/
444         set V_arrayStat2Op(V_riga, V_cont) to V_statMax
445         /*metto su array il numero identificativo delle stazioni che hanno 2 operatori */
446         increment V_cont by 1
447     end
448
449     if (V_arrayStat2Op(V_riga, 2) > 0) then begin
450         /* faccio in modo di avere il dato della stazione con 2 operatori nell'ordine
451 in cui si presentano le stazioni*/
452
453         if (V_arrayStat2Op(V_riga, 1) > V_arrayStat2Op(V_riga, 2)) then begin
454             set V_read to V_arrayStat2Op(V_riga, 1)
455             set V_arrayStat2Op(V_riga, 1) to V_arrayStat2Op(V_riga, 2)
456             set V_arrayStat2Op(V_riga, 2) to V_read
457         end
458     end
459
460     increment V_riga by 1
461
462
463
464     print V_arrayStat2Op to "arc/stazionicon2operatori.txt"
465
466     print V_array_tacktimeStat to "arc/nuovotacktime.txt"
467
468     print "1 stazioni -30% pompa 1: "V_arrayStat2Op(1, 1) to message
469     print "2 stazioni -30% pompa 1: "V_arrayStat2Op(1, 2) to message
470     print "1 stazioni -30% pompa 2: "V_arrayStat2Op(2, 1) to message
471     print "2 stazioni -30% pompa 2: "V_arrayStat2Op(2, 2) to message
472
473 wait for 0.001 sec
474
475 set V_riga to 1
476
477 while (V_riga <= 127) do begin /* programma per verificare qual è il nuovo tacktime dopo che ho riassegnato gli operatori*/
478
479     set V_stat to 1
480     set V_tacktimeMax to V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat)
481     set V_statMax to V_stat
482
483     while (V_stat < 6) do begin
484
485         increment V_stat by 1
486
487         if V_tacktimeMax < V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat) then begin
488             set V_tacktimeMax to V_array_tacktimeStat(V_riga, V_stat)
489             set V_statMax to V_stat
490         end
491     end
492
493     end
494
495 set V_array_tacktimeMax(V_riga) to V_tacktimeMax
496
497 increment V_riga by 1
498 end
499
500 print "1b stazioni -30% pompa 2: "V_arrayStat2Op(2, 1) to message
501 print "2b stazioni -30% pompa 2: "V_arrayStat2Op(2, 2) to message
502
503 print "stat 1: "V_array_tacktimeStat(2, 1) to message
504 print "stat 2: "V_array_tacktimeStat(2, 2) to message
505 print "stat 3: "V_array_tacktimeStat(2, 3) to message
506 print "stat 4: "V_array_tacktimeStat(2, 4) to message
507 print "stat 5: "V_array_tacktimeStat(2, 5) to message
508 print "stat 6: "V_array_tacktimeStat(2, 6) to message
509
510
511 create 1 load of type LT_Thread to P_coeff
512 end
513
514 /*.....*/

```

Figura 7.33 – Screenshot logica individuazione del nuovo tacktime.

Il passo successivo sarà quello di individuare le stazioni che presentano il tackingtime più alto a cui verranno assegnati gli operatori liberi: il processo P\_nuovotackingtime tramite una serie di cicli iterativi “while” confronta i tempi delle stazioni, per ogni modello di pompa, e alla maggiore assegna l'operatore libero decrementando il tempo della stazione del 30%, valore migliorativo del tempo di esecuzione definito sulla base del fatto che si condividono spazi ed attrezzature, dopo di che in caso della presenza di ulteriori operatori liberi, riconfronta nuovamente i tempi delle stazioni e assegna l'operatore sempre alla stazione che risulta essere più lenta, queste informazioni verranno salvate sull'array V\_arrayStat2Op(V\_riga, V\_cont) che individuerà le stazioni con 2 operatori.

Si potrà, poi, valutare la sensibilità del risultato rispetto alla variabilità sia del valore di ridondanza del Tack time di riferimento, sia rispetto al valore di riduzione del tempo della stazione a cui viene allocata una risorsa in più.

Conclusa questa serie di operazioni viene individuata la stazione con il tackingtime più elevato che quindi verrà utilizzato come tackingtime della linea che verrà salvato sull'array nell'elemento V\_ticktimeMax(V\_riga) e sul quale verranno nuovamente calcolati i coefficienti di sbilanciamento dei task tramite il processo P\_coeff in cui vengono caricati i tempi assoluti delle operazioni e salvati sull'array V\_array\_coeff\_Op(V\_riga, NumOp) che verranno utilizzati per la nuova schedulazione che seguirà lo stesso algoritmo utilizzato in precedenza.



```

1058end
1059
1060*****
1061STAZIONE 2
1062*****
1063
1064begin P_sta2 arriving
1065
1066 if ((A_arrayStat2Op1 = 2) or (A_arrayStat2Op2 = 2)) then begin
1067   set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1068   to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.7)
1069   /* variabile di appoggio per la funzione triangolare, corrisponde alla durata dell'operazione */
1070 end
1071 else begin
1072   set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1073   to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello)))
1074   /* variabile di appoggio per la funzione triangolare, corrisponde alla durata dell'operazione */
1075 end
1076
1077 set V_ctrl_hideop2 to 0
1078
1079 if (V_arrayNumOpAssegnate(A_riga, 2) <> 0) /* controlla se ha operazioni */
1080 then begin
1081   move into kin.sta1(2)
1082
1083   while (V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) <= (V_arrayNumOpAssegnate(A_riga, 1)
1084     + V_arrayNumOpAssegnate(A_riga, 2)))
1085   do begin
1086
1087     if ((A_arrayStat2Op1 = 2) or (A_arrayStat2Op2 = 2)) then begin
1088       set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1089       to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*0.7)
1090       /* variabile di appoggio per la funzione triangolare, corrisponde alla durata dell'operazione */
1091     end
1092     else begin
1093       set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1094       to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6)
1095       /* variabile di appoggio per la funzione triangolare, corrisponde alla durata dell'operazione */
1096     end
1097
1098     set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1099     to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6)
1100     /* variabile di appoggio per la funzione triangolare, corrisponde alla durata dell'operazione */
1101
1102     end
1103
1104     set V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))
1105     to (V_tempoOp(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6)
1106     if (V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) = (V_arrayNumOpAssegnate(A_riga, 1) + 1))
1107     then begin
1108       travel to kin.sta2(2)
1109
1110       use R(2) for V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*0.925,
1111         V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6
1112         V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*1.15
1113         /* use R(2) for t V_tempoEsecuzioneR2*0.6*0.925*A_alpha, V_tempoEsecuzioneR2*0.6*A_alpha, V_tempoEsecuzioneR2*0.6*1.
1114         */
1115       travel to kin.sta1(2)
1116     end
1117
1118     else
1119     begin
1120       use R(2) for V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*0.925,
1121         V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6
1122         V_tempoEsecuzioneR2(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*1.15
1123         /* use R(2) for t V_tempoEsecuzioneR1(A_riga, V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello))*0.6*0.
1124         */
1125     end
1126
1127     increment V_cont_OpEseguita(A_riga, A_cont_PompeStessoModello) by 1
1128
1129   end
1130 end
1131
1132 else /* se non ha operazioni lo manda via dalla linea */
1133 begin
1134   set V_ctrl_hideop2 to 1
1135   create 1 load of type L_dummy_hide to P_hideop2
1136 end
1137
1138 move into Q(3)
1139 travel to conv.sta3
1140 move into conv.sta3
1141 send to P_sta3
1142
1143 end
1144
1145 begin P_hideop2 arriving /* logica che allontana dalla linea l'operatore */
1146
1147   move into kin.sta1(2)
1148   travel to kin.sta3(2)
1149   wait until V_ctrl_hideop2 = 0
1150   travel to kin.sta1(2)
1151
1152   send to die
1153 end
1154
1155 *****
1156STAZIONE 3
1157*****
1158
1159

```

Figura 7.35 – Screenshot logica stazione 2 con verifica della presenza dell'operatore.

**7.11 I dati ottenuti.**

Nei grafici e nelle tabelle sono stati riportati i risultati ottenuti dalle varie simulazioni.

*Coefficienti Sbilanciamento Minimizzazione Tacktime*

Pompa	CsStat 1	CsStat 2	CsStat 3	CsStat 4	CsStat 5	CsStat 6	Tm(miv/100)	Pompa	CsStat 1	CsStat 2	CsStat 3	CsStat 4	CsStat 5	CsStat 6	Tm(miv/100)
Mod. 1	0,98	0,54	0,00	0,88	1,00	0,84	407	Mod. 65	1,00	0,39	0,68	0,74	0,98	0,33	479
Mod. 2	1,00	0,00	0,00	0,90	0,85	0,95	394	Mod. 66	1,00	0,41	0,98	0,90	1,00	0,85	428
Mod. 3	0,98	0,53	0,00	0,87	1,00	0,83	408	Mod. 67	1,00	0,48	0,53	0,86	0,96	0,85	447
Mod. 4	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,97	355	Mod. 68	1,00	0,83	0,00	0,90	0,85	0,95	394
Mod. 5	0,95	0,00	0,00	0,87	1,00	0,92	408	Mod. 69	0,95	0,80	0,00	0,86	1,00	0,95	410
Mod. 6	1,00	0,56	0,00	0,90	0,85	0,95	394	Mod. 70	0,97	0,80	0,00	0,87	1,00	0,90	408
Mod. 7	0,93	0,18	0,00	1,00	0,94	0,83	355	Mod. 71	0,99	0,40	0,96	0,95	1,00	0,85	437
Mod. 8	1,00	0,56	0,00	0,90	0,85	0,95	394	Mod. 72	0,92	0,67	0,82	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 9	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,83	355	Mod. 73	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,68	387
Mod. 10	0,99	0,54	0,00	0,88	1,00	0,87	407	Mod. 74	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,68	387
Mod. 11	0,97	0,54	0,00	0,87	1,00	0,90	408	Mod. 75	0,97	0,47	0,99	0,90	1,00	0,98	425
Mod. 12	0,93	0,18	0,92	1,00	0,94	0,97	355	Mod. 76	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 13	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,62	425	Mod. 77	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,81	387
Mod. 14	1,00	0,73	0,97	1,00	0,96	0,99	383	Mod. 78	0,95	0,54	0,00	0,87	1,00	0,92	408
Mod. 15	1,00	0,73	0,97	1,00	0,96	0,84	383	Mod. 79	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,99	383
Mod. 16	0,93	0,18	0,92	1,00	0,94	0,83	355	Mod. 80	1,00	0,56	0,00	0,90	0,85	0,95	394
Mod. 17	0,16	1,00	0,96	0,86	0,98	0,81	416	Mod. 81	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,64	415
Mod. 18	0,98	0,00	0,00	0,87	1,00	0,83	408	Mod. 82	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,96	355
Mod. 19	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,84	383	Mod. 83	0,93	0,18	0,92	1,00	0,94	0,83	355
Mod. 20	0,97	0,54	0,00	0,87	0,99	1,00	408	Mod. 84	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,83	387
Mod. 21	0,91	0,18	0,00	0,98	0,92	1,00	362	Mod. 85	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,97	383
Mod. 22	0,86	0,47	0,00	0,77	1,00	0,80	463	Mod. 86	0,90	0,66	0,55	0,89	1,00	0,97	426
Mod. 23	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,96	355	Mod. 87	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,68	387
Mod. 24	0,94	0,38	0,90	0,83	0,92	1,00	464	Mod. 88	1,00	0,41	0,99	0,89	0,99	0,98	427
Mod. 25	1,00	0,39	0,68	0,74	0,98	0,43	479	Mod. 89	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 26	0,15	1,00	0,98	0,85	0,99	0,52	415	Mod. 90	0,98	0,00	0,00	0,87	1,00	0,85	408
Mod. 27	0,15	1,00	0,98	0,85	0,99	0,64	415	Mod. 91	0,91	0,18	0,90	0,98	0,92	1,00	362
Mod. 28	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,52	415	Mod. 92	0,15	1,00	0,45	0,85	0,98	0,92	417
Mod. 29	0,15	1,00	0,44	0,85	0,98	0,91	416	Mod. 93	0,15	1,00	0,44	0,85	0,97	0,74	418
Mod. 30	1,00	0,41	0,98	0,89	0,99	0,86	430	Mod. 94	1,00	0,73	0,97	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 31	0,16	1,00	0,44	0,86	0,97	0,82	418	Mod. 95	1,00	0,41	0,99	0,89	0,99	0,98	427
Mod. 32	0,93	0,37	0,90	0,81	0,91	1,00	470	Mod. 96	1,00	0,41	0,98	0,90	1,00	0,85	428
Mod. 33	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,68	387	Mod. 97	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 34	0,98	0,81	0,00	0,88	1,00	0,84	407	Mod. 98	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,72	415
Mod. 35	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,62	425	Mod. 99	0,97	0,40	0,96	0,95	1,00	0,95	438
Mod. 36	0,98	0,55	0,00	0,88	1,00	0,82	404	Mod. 100	1,00	0,73	0,69	1,00	0,96	0,99	383
Mod. 37	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,74	425	Mod. 101	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,68	387
Mod. 38	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,62	425	Mod. 102	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,72	415
Mod. 39	0,98	0,81	0,00	0,88	1,00	0,82	404	Mod. 103	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,76	425
Mod. 40	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,83	355	Mod. 104	0,97	0,47	0,99	0,90	1,00	0,98	425
Mod. 41	1,00	0,55	0,00	0,90	0,84	0,98	393	Mod. 105	0,91	0,78	0,00	0,98	0,92	1,00	362
Mod. 42	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,72	415	Mod. 106	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,63	415
Mod. 43	1,00	0,38	0,67	0,74	0,95	0,59	486	Mod. 107	1,00	0,73	0,69	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 44	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,84	383	Mod. 108	0,93	0,80	0,00	1,00	0,94	0,97	355
Mod. 45	0,95	0,00	0,00	0,87	1,00	0,92	408	Mod. 109	0,95	0,80	0,00	0,87	1,00	0,92	408
Mod. 46	0,93	0,18	0,92	1,00	0,94	0,97	355	Mod. 110	0,16	1,00	0,96	0,86	0,97	0,82	418
Mod. 47	0,98	0,46	1,00	0,98	0,81	0,99	421	Mod. 111	0,90	0,37	0,87	1,00	0,88	0,86	482
Mod. 48	0,96	0,79	0,00	0,86	1,00	0,88	409	Mod. 112	0,98	0,47	0,99	0,90	1,00	0,98	424
Mod. 49	0,98	0,46	1,00	0,98	0,81	0,99	421	Mod. 113	1,00	0,41	0,98	0,89	0,98	0,98	429
Mod. 50	0,15	1,00	0,45	0,85	0,99	0,52	415	Mod. 114	1,00	0,48	0,53	0,86	0,96	0,85	447
Mod. 51	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,68	387	Mod. 115	0,76	0,00	0,00	0,91	0,92	1,00	420
Mod. 52	1,00	0,83	0,00	0,90	0,84	0,98	393	Mod. 116	0,77	0,00	0,00	0,92	0,93	1,00	416
Mod. 53	0,87	0,64	0,54	0,88	0,96	1,00	437	Mod. 117	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 54	0,98	0,81	0,00	0,88	1,00	0,84	407	Mod. 118	0,16	1,00	0,44	0,86	0,98	0,81	416
Mod. 55	1,00	0,48	0,60	0,86	0,96	0,85	447	Mod. 119	0,15	1,00	0,98	0,85	0,99	0,52	415
Mod. 56	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,97	383	Mod. 120	1,00	0,39	0,68	0,74	0,98	0,50	479
Mod. 57	1,00	0,48	0,53	0,86	0,96	0,85	447	Mod. 121	0,92	0,67	0,82	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 58	0,67	0,00	0,00	0,78	1,00	0,85	492	Mod. 122	1,00	0,41	0,99	0,90	1,00	0,84	426
Mod. 59	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,84	383	Mod. 123	0,97	0,46	0,99	0,90	1,00	0,76	425
Mod. 60	0,89	0,66	0,56	0,90	1,00	0,85	424	Mod. 124	0,99	0,90	0,00	0,80	0,89	1,00	476
Mod. 61	0,15	1,00	0,98	0,85	0,99	0,63	415	Mod. 125	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 62	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,99	383	Mod. 126	0,83	0,26	0,00	0,99	1,00	0,95	387
Mod. 63	1,00	0,41	0,98	0,90	1,00	0,85	428	Mod. 127	0,83	0,00	0,00	0,99	1,00	0,94	387
Mod. 64	0,98	0,81	0,00	0,88	1,00	0,82	404								

Figura 7.36 – Coefficienti Sbilanciamento Minimizzazione Tacktime.

Tempi Esecuzione Stazioni Minimizzando il Tacktime

Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Temp tot	Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Temp tot
Mod. 1	399	218	0	358	407	343	1724	Mod. 65	479	188	327	355	469	160	1977
Mod. 2	394	0	0	355	334	376	1459	Mod. 66	428	174	420	384	428	364	2198
Mod. 3	401	217	0	356	408	337	1719	Mod. 67	447	216	236	384	427	380	2089
Mod. 4	330	284	0	355	334	344	1647	Mod. 68	394	327	0	355	334	376	1786
Mod. 5	389	0	0	353	408	377	1527	Mod. 69	391	327	0	355	410	391	1873
Mod. 6	394	220	0	355	334	376	1679	Mod. 70	396	327	0	354	408	365	1849
Mod. 7	330	64	0	355	334	295	1377	Mod. 71	433	176	421	414	437	372	2252
Mod. 8	394	220	0	355	334	376	1679	Mod. 72	352	257	314	383	368	322	1995
Mod. 9	330	284	0	355	334	295	1598	Mod. 73	322	100	0	383	387	264	1455
Mod. 10	403	221	0	358	407	354	1743	Mod. 74	322	0	0	383	387	264	1356
Mod. 11	396	219	0	354	408	365	1742	Mod. 75	413	198	421	383	425	417	2257
Mod. 12	330	64	327	355	334	344	1754	Mod. 76	322	0	0	383	387	368	1459
Mod. 13	414	195	421	383	425	264	2103	Mod. 77	322	0	0	383	387	314	1406
Mod. 14	383	280	372	383	368	379	2164	Mod. 78	389	220	0	353	408	377	1747
Mod. 15	383	280	372	383	368	322	2107	Mod. 79	383	280	234	383	368	379	2026
Mod. 16	330	64	327	355	334	295	1704	Mod. 80	394	220	0	355	334	376	1679
Mod. 17	67	416	401	356	408	337	1985	Mod. 81	64	415	188	355	412	266	1700
Mod. 18	401	0	0	356	408	337	1502	Mod. 82	330	284	0	355	334	341	1644
Mod. 19	383	280	234	383	368	322	1969	Mod. 83	330	64	327	355	334	295	1704
Mod. 20	395	220	0	355	403	408	1781	Mod. 84	322	0	0	383	387	322	1413
Mod. 21	330	64	0	355	334	362	1445	Mod. 85	383	280	234	383	368	372	2018
Mod. 22	397	217	0	355	463	372	1804	Mod. 86	384	280	234	380	426	413	2117
Mod. 23	330	284	0	355	334	341	1644	Mod. 87	322	0	0	383	387	264	1356
Mod. 24	437	174	419	384	428	464	2306	Mod. 88	427	173	423	381	423	419	2246
Mod. 25	479	188	327	355	469	206	2024	Mod. 89	322	0	0	383	387	368	1459
Mod. 26	64	415	408	355	412	217	1871	Mod. 90	400	0	0	355	408	347	1510
Mod. 27	64	415	408	355	412	266	1921	Mod. 91	330	64	327	355	334	362	1771
Mod. 28	64	415	188	355	412	217	1651	Mod. 92	64	417	187	354	409	386	1817
Mod. 29	63	416	184	353	408	377	1802	Mod. 93	64	418	182	354	408	307	1734
Mod. 30	430	175	422	382	426	370	2205	Mod. 94	383	280	372	383	368	322	2107
Mod. 31	68	418	184	358	407	343	1777	Mod. 95	427	173	423	381	423	419	2246
Mod. 32	439	175	421	381	430	470	2316	Mod. 96	428	174	420	384	428	364	2198
Mod. 33	322	100	0	383	387	264	1455	Mod. 97	322	0	0	383	387	368	1459
Mod. 34	399	328	0	358	407	343	1834	Mod. 98	64	415	188	355	412	298	1732
Mod. 35	414	195	421	383	425	264	2103	Mod. 99	426	174	422	418	438	414	2292
Mod. 36	397	221	0	356	404	331	1709	Mod. 100	383	280	264	383	368	379	2057
Mod. 37	414	195	421	383	425	314	2152	Mod. 101	322	100	0	383	387	264	1455
Mod. 38	414	195	421	383	425	264	2103	Mod. 102	64	415	188	355	412	298	1732
Mod. 39	397	327	0	356	404	331	1815	Mod. 103	414	195	421	383	425	322	2160
Mod. 40	330	284	0	355	334	295	1598	Mod. 104	413	198	421	383	425	417	2257
Mod. 41	393	218	0	354	329	386	1680	Mod. 105	330	284	0	355	334	362	1665
Mod. 42	64	415	188	355	412	298	1732	Mod. 106	64	415	188	355	412	263	1697
Mod. 43	486	184	328	358	463	286	2105	Mod. 107	383	280	264	383	368	322	1999
Mod. 44	383	280	234	383	368	322	1969	Mod. 108	330	284	0	355	334	344	1647
Mod. 45	389	0	0	353	408	377	1527	Mod. 109	389	326	0	353	408	377	1853
Mod. 46	330	64	327	355	334	344	1754	Mod. 110	68	418	403	358	407	343	1995
Mod. 47	414	195	421	414	341	417	2202	Mod. 111	436	176	420	482	424	415	2353
Mod. 48	394	325	0	352	409	360	1840	Mod. 112	415	197	420	382	424	415	2253
Mod. 49	414	195	421	414	341	417	2202	Mod. 113	429	174	420	382	420	420	2246
Mod. 50	64	415	188	355	412	217	1651	Mod. 114	447	216	236	384	427	380	2089
Mod. 51	322	0	0	383	387	264	1356	Mod. 115	319	0	0	383	387	420	1509
Mod. 52	393	325	0	354	329	386	1788	Mod. 116	320	0	0	384	388	416	1508
Mod. 53	381	278	235	385	419	437	2136	Mod. 117	322	100	0	383	387	368	1559
Mod. 54	399	328	0	358	407	343	1834	Mod. 118	67	416	184	356	408	337	1768
Mod. 55	447	216	268	384	427	380	2121	Mod. 119	64	415	408	355	412	217	1871
Mod. 56	383	280	234	383	368	372	2018	Mod. 120	479	188	327	355	469	241	2059
Mod. 57	447	216	236	384	427	380	2089	Mod. 121	352	257	314	383	368	322	1995
Mod. 58	330	0	0	384	492	420	1625	Mod. 122	426	174	422	383	426	359	2189
Mod. 59	383	280	234	383	368	322	1969	Mod. 123	414	195	421	383	425	322	2160
Mod. 60	377	279	236	381	424	361	2057	Mod. 124	472	427	0	382	423	476	2180
Mod. 61	64	415	408	355	412	263	1917	Mod. 125	322	100	0	383	387	368	1559
Mod. 62	383	280	234	383	368	379	2026	Mod. 126	322	100	0	383	387	368	1559
Mod. 63	428	174	420	384	428	364	2198	Mod. 127	322	0	0	383	387	364	1455
Mod. 64	397	327	0	356	404	331	1815								

Figura 7.37 – Tempi Esecuzione Stazioni Minimizzando il Tacktime.

In evidenza le stazioni che caratterizzano il tacktime della linea.

*Coefficienti Sbilanciamento Massimizzazione Operatori Liberi*

Pompa	Cs Stat 1	Cs Stat 2	Cs Stat 3	Cs Stat 4	Cs Stat 5	Cs Stat 6	Tm(mn/100)	Pompa	Cs Stat 1	Cs Stat 2	Cs Stat 3	Cs Stat 4	Cs Stat 5	Cs Stat 6	Tm(mn/100)
Mod. 1	1,00	0,55	0,00	0,90	0,96	0,53	395	Mod. 65	1,00	0,38	0,68	0,74	0,96	0,33	482
Mod. 2	0,68	0,00	0,00	0,87	0,69	0,73	308	Mod. 66	1,01	0,41	1,00	0,91	1,01	0,87	430
Mod. 3	1,00	0,55	0,00	0,90	0,96	0,52	395	Mod. 67	1,01	1,02	0,00	0,87	0,96	0,85	450
Mod. 4	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,65	383	Mod. 68	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,73	383
Mod. 5	0,73	0,00	0,00	0,94	1,01	0,64	381	Mod. 69	1,00	0,83	0,00	0,90	0,97	0,64	395
Mod. 6	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,73	383	Mod. 70	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,89	383
Mod. 7	0,78	0,00	0,00	1,00	0,92	0,45	355	Mod. 71	0,83	0,34	1,00	0,73	1,00	0,41	523
Mod. 8	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,73	383	Mod. 72	0,92	0,67	0,82	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 9	1,00	0,55	0,00	0,90	0,82	0,40	395	Mod. 73	0,84	0,26	0,00	1,00	0,90	0,42	383
Mod. 10	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,87	383	Mod. 74	0,84	0,00	0,00	0,70	0,71	0,69	270
Mod. 11	1,00	0,55	0,00	0,90	0,96	0,57	395	Mod. 75	1,02	0,41	0,99	0,90	1,01	0,98	432
Mod. 12	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,65	383	Mod. 76	0,75	0,00	0,00	0,64	0,64	0,87	319
Mod. 13	1,02	0,41	0,99	0,90	1,00	0,62	432	Mod. 77	1,00	0,00	0,00	0,83	0,94	0,83	322
Mod. 14	1,00	0,73	0,97	1,00	0,96	0,99	383	Mod. 78	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,93	383
Mod. 15	0,99	0,73	0,98	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 79	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,98	383
Mod. 16	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,53	383	Mod. 80	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,73	383
Mod. 17	1,00	0,47	0,00	0,76	0,99	0,61	467	Mod. 81	1,00	0,00	0,00	0,76	0,99	0,45	467
Mod. 18	0,68	0,00	0,00	0,87	0,69	0,84	308	Mod. 82	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,64	383
Mod. 19	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 83	1,00	0,83	0,00	0,90	0,82	0,40	395
Mod. 20	0,97	0,54	0,00	0,87	0,99	0,70	400	Mod. 84	0,84	0,00	0,00	0,70	0,71	0,84	270
Mod. 21	0,78	0,00	0,00	1,00	0,92	0,64	355	Mod. 85	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,96	383
Mod. 22	0,93	0,51	0,00	0,83	0,95	0,71	386	Mod. 86	0,69	0,91	0,00	0,81	0,90	0,88	388
Mod. 23	1,00	0,55	0,00	0,90	0,90	0,40	395	Mod. 87	1,00	0,00	0,00	0,83	0,94	0,67	322
Mod. 24	0,83	0,34	0,81	0,73	1,00	0,70	522	Mod. 88	0,90	0,37	0,88	0,80	0,90	0,89	386
Mod. 25	1,00	0,38	0,68	0,74	0,96	0,43	482	Mod. 89	0,88	0,00	0,00	0,73	0,94	0,71	344
Mod. 26	0,70	0,84	0,00	0,73	0,97	0,33	454	Mod. 90	0,68	0,00	0,00	0,87	0,69	0,85	308
Mod. 27	1,00	0,47	0,00	0,76	0,99	0,45	467	Mod. 91	1,00	0,83	0,00	0,90	0,94	0,40	395
Mod. 28	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,33	454	Mod. 92	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,69	454
Mod. 29	1,00	0,00	0,00	0,76	0,99	0,69	467	Mod. 93	1,00	0,00	0,00	0,76	0,99	0,54	467
Mod. 30	1,01	0,41	0,99	0,90	0,99	0,87	435	Mod. 94	1,00	0,73	0,97	1,00	0,96	0,84	383
Mod. 31	1,00	0,00	0,00	0,76	0,99	0,62	467	Mod. 95	1,01	0,41	0,98	0,89	1,00	0,98	432
Mod. 32	0,83	0,33	0,80	0,73	1,00	0,71	526	Mod. 96	1,01	0,41	1,00	0,91	1,01	0,87	430
Mod. 33	0,84	0,26	0,00	1,00	0,90	0,42	383	Mod. 97	0,88	0,00	0,00	0,73	0,94	0,71	344
Mod. 34	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,85	383	Mod. 98	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,50	454
Mod. 35	1,02	0,41	0,99	0,90	1,00	0,62	432	Mod. 99	0,83	0,34	1,00	0,73	1,01	0,50	527
Mod. 36	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,80	383	Mod. 100	1,00	0,73	0,69	1,00	0,96	0,99	383
Mod. 37	1,02	0,41	0,99	0,90	1,00	0,73	432	Mod. 101	0,84	0,26	0,00	1,00	0,90	0,42	383
Mod. 38	0,98	0,47	1,00	0,91	1,01	0,63	429	Mod. 102	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,50	454
Mod. 39	1,00	0,83	0,00	0,90	0,94	0,52	395	Mod. 103	1,02	0,41	0,99	0,90	1,00	0,75	432
Mod. 40	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,53	383	Mod. 104	0,90	0,37	0,89	0,81	0,90	0,89	382
Mod. 41	1,00	0,55	0,00	0,90	0,99	0,40	395	Mod. 105	1,00	0,55	0,00	0,90	0,94	0,40	395
Mod. 42	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,50	454	Mod. 106	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,43	454
Mod. 43	1,00	0,38	0,68	0,74	0,96	0,60	482	Mod. 107	0,99	0,73	0,69	1,00	0,96	0,83	383
Mod. 44	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,84	383	Mod. 108	0,97	0,54	0,00	0,87	0,69	0,65	383
Mod. 45	0,73	0,00	0,00	0,94	1,01	0,64	381	Mod. 109	1,00	0,83	0,00	0,90	0,96	0,61	395
Mod. 46	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,65	383	Mod. 110	0,70	0,84	0,00	0,73	0,97	0,60	454
Mod. 47	0,82	0,33	0,99	0,73	1,01	0,30	530	Mod. 111	0,83	0,34	1,00	0,73	1,01	0,60	527
Mod. 48	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,88	383	Mod. 112	0,92	0,37	0,90	0,81	0,90	0,88	397
Mod. 49	0,82	0,33	0,99	0,73	1,01	0,30	530	Mod. 113	1,00	0,41	0,98	0,89	0,99	0,98	432
Mod. 50	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,33	454	Mod. 114	1,02	0,50	0,54	0,89	0,98	0,86	450
Mod. 51	1,00	0,00	0,00	0,83	0,94	0,67	322	Mod. 115	0,85	0,00	0,00	1,01	1,00	0,48	383
Mod. 52	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,76	383	Mod. 116	0,68	0,00	0,00	0,81	0,57	0,62	308
Mod. 53	0,76	0,99	0,00	0,89	0,98	1,00	433	Mod. 117	0,77	0,00	0,00	1,00	0,98	0,56	383
Mod. 54	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,85	383	Mod. 118	0,70	0,39	0,00	0,73	0,97	0,60	454
Mod. 55	1,01	1,02	0,07	0,87	0,96	0,85	450	Mod. 119	1,00	0,47	0,00	0,76	0,99	0,34	467
Mod. 56	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,97	383	Mod. 120	1,00	0,39	0,68	0,73	0,97	0,50	482
Mod. 57	1,01	1,02	0,00	0,87	0,96	0,85	450	Mod. 121	0,91	0,67	0,82	1,00	0,97	0,83	383
Mod. 58	0,57	0,00	0,00	0,67	0,60	0,51	257	Mod. 122	0,98	0,47	1,00	0,91	1,01	0,87	429
Mod. 59	0,99	0,73	0,61	1,00	0,96	0,83	383	Mod. 123	1,02	0,41	0,99	0,90	1,00	0,75	432
Mod. 60	0,92	0,67	0,56	0,91	1,01	0,87	427	Mod. 124	0,88	0,80	0,00	0,72	0,69	0,71	413
Mod. 61	1,00	0,47	0,00	0,76	0,99	0,44	467	Mod. 125	0,77	0,00	0,00	1,00	0,98	0,56	383
Mod. 62	1,00	0,73	0,61	1,00	0,96	0,99	383	Mod. 126	0,69	0,00	0,00	0,91	0,64	0,87	349
Mod. 63	1,01	0,41	0,99	0,90	1,00	0,86	432	Mod. 127	0,88	0,00	0,00	0,74	0,94	0,72	342
Mod. 64	0,97	0,80	0,00	0,87	0,69	0,80	383								

Figura 7.38 – Coefficienti Sbilanciamento Massimizzazione Operatori Liberi.

Tempi Esecuzione Massimizzando Operatori Liberi

Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Temp tot	Pompa	Temp S1	Temp S2	Temp S3	Temp S4	Temp S5	Temp S6	Tempo tot
Mod. 1	395	219	0	355	381	209	1559	Mod. 65	482	185	327	355	464	159	1972
Mod. 2	240	0	0	308	245	258	1052	Mod. 66	430	175	426	388	430	371	2221
Mod. 3	395	219	0	355	381	205	1555	Mod. 67	446	450	0	383	423	376	2078
Mod. 4	383	213	0	343	274	257	1470	Mod. 68	383	316	0	343	274	288	1604
Mod. 5	277	0	0	355	381	241	1253	Mod. 69	395	327	0	355	382	251	1710
Mod. 6	383	213	0	343	274	288	1501	Mod. 70	383	316	0	343	274	351	1667
Mod. 7	277	0	0	355	325	159	1115	Mod. 71	432	175	522	383	523	216	2251
Mod. 8	383	213	0	343	274	288	1501	Mod. 72	352	257	314	383	368	322	1995
Mod. 9	395	219	0	355	325	159	1453	Mod. 73	322	101	0	383	344	159	1309
Mod. 10	383	213	0	343	274	343	1557	Mod. 74	270	0	0	225	227	222	945
Mod. 11	395	219	0	355	381	225	1575	Mod. 75	432	175	421	383	427	415	2253
Mod. 12	383	316	0	343	274	257	1572	Mod. 76	275	0	0	234	236	319	1065
Mod. 13	432	175	421	383	427	262	2100	Mod. 77	322	0	0	288	304	266	1160
Mod. 14	383	280	372	383	368	379	2164	Mod. 78	383	213	0	343	274	367	1580
Mod. 15	380	281	374	383	366	319	2103	Mod. 79	380	281	235	383	366	376	2021
Mod. 16	383	316	0	343	274	209	1525	Mod. 80	383	213	0	343	274	288	1501
Mod. 17	467	219	0	355	464	285	1790	Mod. 81	467	0	0	355	464	209	1495
Mod. 18	240	0	0	308	245	297	1091	Mod. 82	383	213	0	343	274	253	1466
Mod. 19	380	281	235	383	366	319	1964	Mod. 83	395	327	0	355	325	159	1561
Mod. 20	392	218	0	351	400	283	1644	Mod. 84	270	0	0	225	227	270	993
Mod. 21	277	0	0	355	325	225	1181	Mod. 85	380	281	235	383	366	369	2014
Mod. 22	378	207	0	337	386	287	1597	Mod. 86	296	388	0	346	384	376	1790
Mod. 23	395	219	0	355	357	159	1485	Mod. 87	322	0	0	288	304	216	1110
Mod. 24	433	177	423	381	522	365	2302	Mod. 88	386	159	377	343	386	381	2031
Mod. 25	482	185	327	355	464	205	2018	Mod. 89	322	0	0	288	344	262	1196
Mod. 26	327	393	0	341	454	154	1669	Mod. 90	240	0	0	308	245	301	1095
Mod. 27	467	219	0	355	464	209	1714	Mod. 91	395	327	0	355	371	159	1607
Mod. 28	327	182	0	341	454	154	1459	Mod. 92	327	182	0	341	454	323	1627
Mod. 29	467	0	0	355	464	321	1607	Mod. 93	467	0	0	355	464	251	1537
Mod. 30	435	176	426	387	426	374	2224	Mod. 94	383	280	372	383	368	322	2107
Mod. 31	467	0	0	355	464	289	1575	Mod. 95	432	175	421	383	427	419	2257
Mod. 32	437	174	421	384	526	373	2314	Mod. 96	430	175	426	388	430	371	2221
Mod. 33	322	101	0	383	344	159	1309	Mod. 97	322	0	0	288	344	262	1196
Mod. 34	383	316	0	343	274	336	1651	Mod. 98	327	182	0	341	454	234	1538
Mod. 35	432	175	421	383	427	262	2100	Mod. 99	432	175	522	383	527	262	2301
Mod. 36	383	213	0	343	274	316	1529	Mod. 100	383	280	264	383	368	379	2057
Mod. 37	432	175	421	383	427	312	2150	Mod. 101	322	101	0	383	344	159	1309
Mod. 38	417	200	425	387	429	268	2126	Mod. 102	327	182	0	341	454	234	1538
Mod. 39	395	327	0	355	371	205	1653	Mod. 103	432	175	421	383	427	319	2157
Mod. 40	383	213	0	343	274	209	1422	Mod. 104	382	157	378	344	382	378	2022
Mod. 41	395	219	0	355	389	159	1517	Mod. 105	395	219	0	355	371	159	1499
Mod. 42	327	182	0	341	454	234	1538	Mod. 106	327	182	0	341	454	201	1505
Mod. 43	482	185	327	355	464	289	2102	Mod. 107	380	281	265	383	366	319	1994
Mod. 44	383	280	234	383	368	322	1969	Mod. 108	383	213	0	343	274	257	1470
Mod. 45	277	0	0	355	381	241	1253	Mod. 109	395	327	0	355	381	241	1699
Mod. 46	383	316	0	343	274	257	1572	Mod. 110	327	393	0	341	454	281	1795
Mod. 47	432	175	522	383	530	159	2201	Mod. 111	432	175	522	383	527	312	2351
Mod. 48	383	316	0	343	274	347	1663	Mod. 112	397	160	388	349	388	380	2062
Mod. 49	432	175	522	383	530	159	2201	Mod. 113	432	175	421	383	427	422	2260
Mod. 50	327	182	0	341	454	154	1459	Mod. 114	450	221	238	383	433	380	2116
Mod. 51	322	0	0	288	304	216	1110	Mod. 115	322	0	0	383	382	183	1270
Mod. 52	383	316	0	343	274	300	1616	Mod. 116	258	0	0	308	218	234	1018
Mod. 53	327	429	0	383	423	433	1995	Mod. 117	296	0	0	383	376	216	1271
Mod. 54	383	316	0	343	274	336	1651	Mod. 118	327	182	0	341	454	281	1585
Mod. 55	446	450	30	383	423	376	2108	Mod. 119	467	219	0	355	464	159	1664
Mod. 56	383	280	234	383	368	372	2018	Mod. 120	482	188	328	352	468	241	2058
Mod. 57	446	450	0	383	423	376	2078	Mod. 121	350	257	313	383	370	319	1992
Mod. 58	218	0	0	257	228	196	899	Mod. 122	417	200	425	387	429	370	2228
Mod. 59	380	281	235	383	366	319	1964	Mod. 123	432	175	421	383	427	319	2157
Mod. 60	389	284	237	385	427	368	2091	Mod. 124	413	375	0	338	325	333	1784
Mod. 61	467	219	0	355	464	205	1710	Mod. 125	296	0	0	383	376	216	1271
Mod. 62	383	280	234	383	368	379	2026	Mod. 126	266	0	0	349	247	334	1197
Mod. 63	432	175	421	383	427	365	2203	Mod. 127	322	0	0	288	342	262	1194
Mod. 64	383	316	0	343	274	316	1632								

Figura 7.39 – Tempi Esecuzione Massimizzando Operatori Liberi.

In evidenza le stazioni che caratterizzano il takttime della linea.

Confronti Efficienze, Tacktime e sbilanciamenti

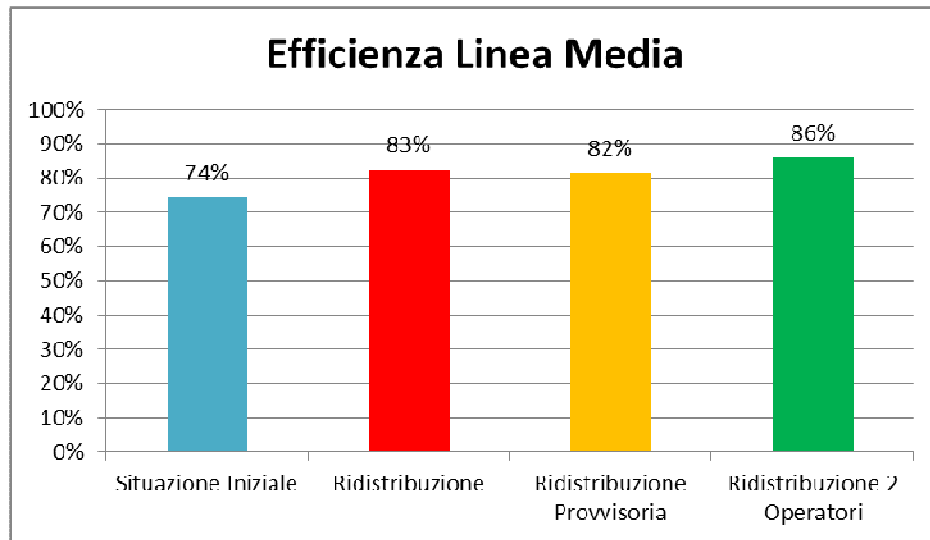


Figura 7.40 – Efficienze medie della linea nei 4 casi.

In questo istogramma viene riportata l'efficienza percentuale media della linea nelle varie configurazioni, cioè l'effettivo tempo in cui gli operatori sono al lavoro rispetto al tempo disponibile, si nota come l'efficienza sia migliorata di 9 punti percentuali già dalla prima ri-assegnazione dinamica dei task, ma che ha avuto un notevole miglioramento nel caso di ri-assegnazione degli operatori arrivando fino ad un 86% (calcolato rispetto al tempo medio di attraversamento linea con operatori singoli) contro il 74% iniziale.

$$E_{linea-media} = \frac{\sum_1^{127} \frac{\sum_1^6 C_{s_{Stat i}}}{\sum_1^6 S_i}}{127} \%$$

L'applicazione dei metodi ha ottenuto infatti un abbassamento dei tacktime massimi come si può notare, con miglioramenti che vanno dal 14% al 29%.

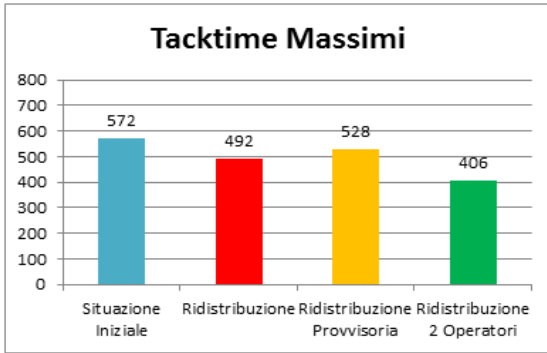


Figura 7.41 – Tacktime massimi rilevati.

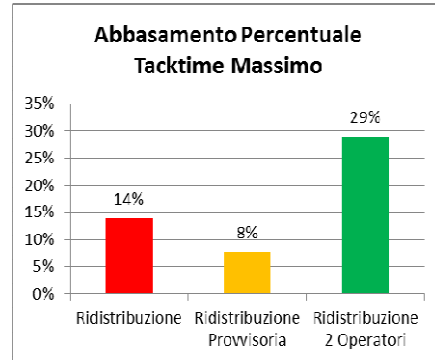


Figura 7.42 – Miglioramento % dei tacktime.

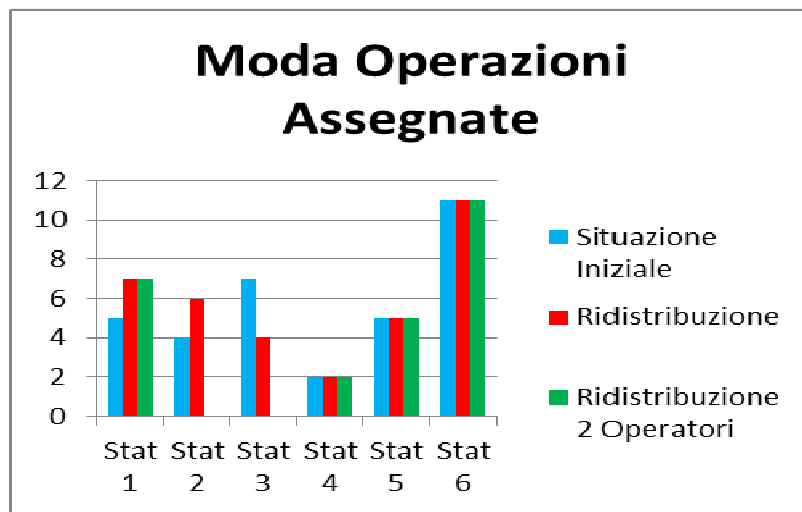


Figura 7.43 – Moda delle operazioni assegnate ad ogni stazione.

La moda della distribuzione delle operazioni mette in evidenza come nella soluzione in cui si cercava di massimizzare il numero di operatori liberi le stazioni 2 e 3 siano prive di operazioni assegnate permettendo così di poter gestire e assegnare gli operatori nelle stazioni più caricate.

*Coefficienti di sbilanciamento medi sulle stazioni nei 4 modelli*

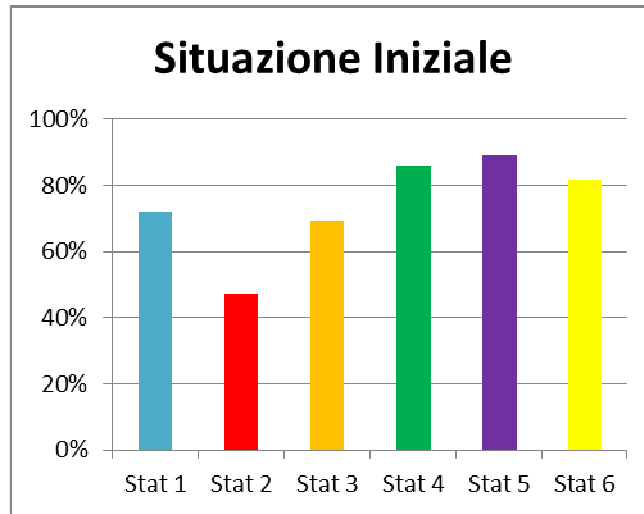


Figura 7.44 – Coefficienti Sbilanciamento stazioni caso iniziale.

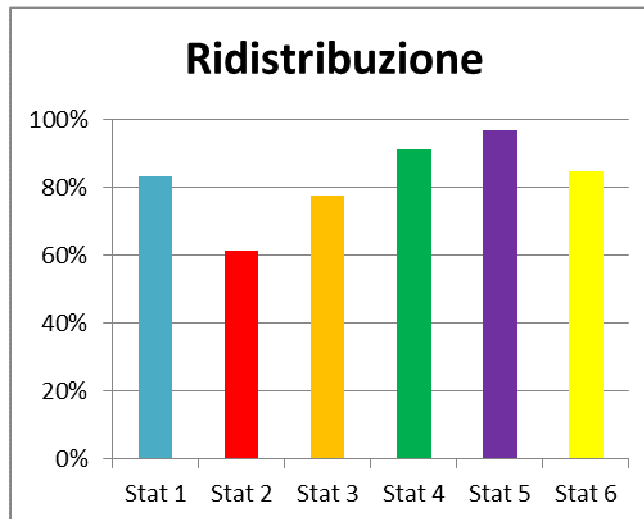


Figura 7.45 – Coefficienti Sbilanciamento stazioni prima rassegnazione.

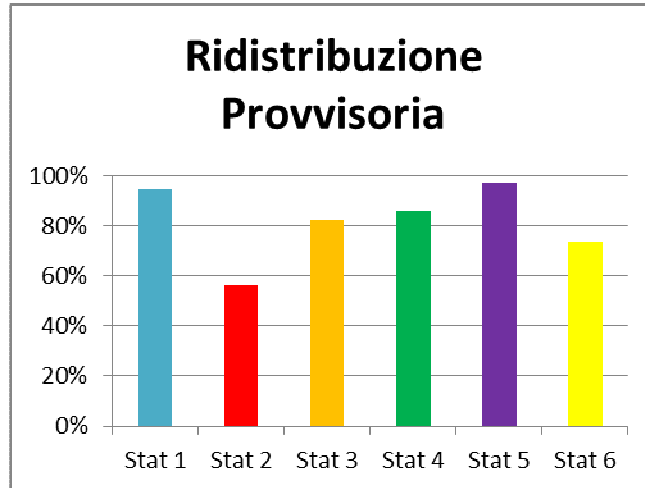


Figura 7.46 – Coefficienti Sbilanciamento stazioni ridistribuzione provvisoria.

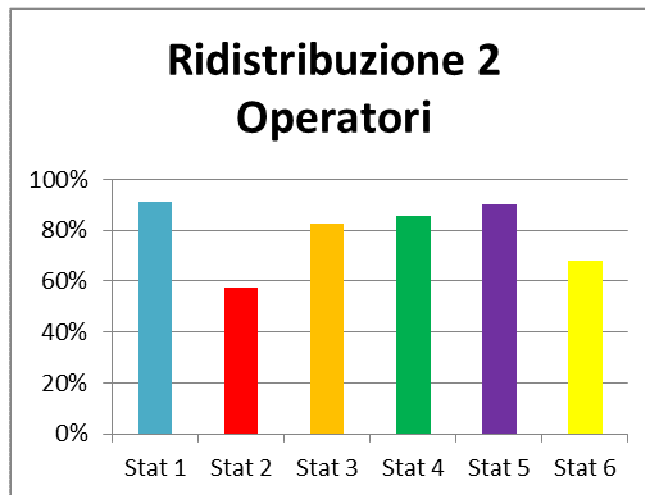


Figura 7.47 – Coefficienti Sbilanciamento stazioni con ri-assegnazione operatori.

Dai grafici che riportano i takttime medi delle stazioni ( $Cs_{Stat-medio}$ ) si può notare che la situazione iniziale presentava uno sbilanciamento della linea molto accentuato, con la stazione 2 decisamente sotto-caricata, con coefficiente di utilizzazione appena del 45% e le stazioni 1 e 3 con valori prossimi al 70%. La prima ridistribuzione dei task ha avuto come risultato quello di bilanciare al meglio la linea, senza però portare grandi miglioramenti per quel che riguarda il tempo totale di attraversamento di un prodotto, portando 2 stazioni oltre al 90% e altre 2 nell'intorno dell'80%, aumentando anche la stazione 2 che risultava quella bilanciata peggio portando un aumento dell'utilizzazione di circa il 20%. La soluzione con la ri-assegnazione degli operatori ha anch'essa portato ad un miglioramento

dell'utilizzazione della linea, anche se inferiore al precedente, ma ha di vantaggio di aver diminuito il tempo medio di attraversamento linea delle pompe, comportando un ulteriore risparmio di tempo.

$$C_{S_{stat-medio}} = \frac{\sum_1^{127} \sum_n C_{S_{Op}}}{127} = \frac{\sum_1^{127} \frac{\sum_n T_{Op}}{T_m}}{127}$$

$$T_{stat-medio} = C_{S_{stat-medio}} * T_{m_{medio}}$$

$$T_{m_{linea}} = \max(T_{stat-medio})$$

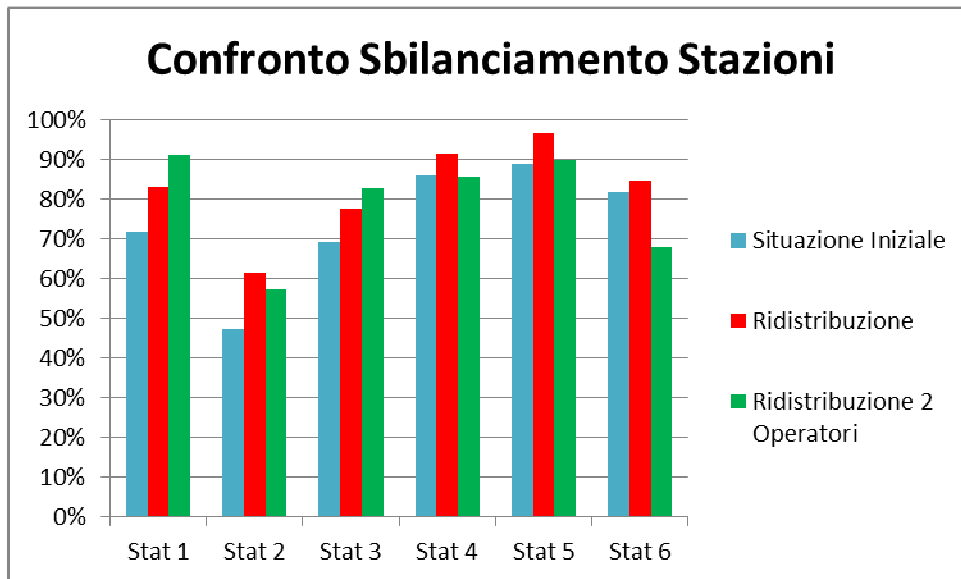


Figura 7.48 – Confronto Coefficienti Sbilanciamento nei 3 casi.

Si confrontano ora 2 modelli di pompe, di cui una a più alti volumi (V0) e le altre 2 a volumi più bassi (V250); questo per valutare più nello specifico i risultati diversi ottenuti con i procedimenti scelti.

Modello V0 cod. 4 (num. 16)

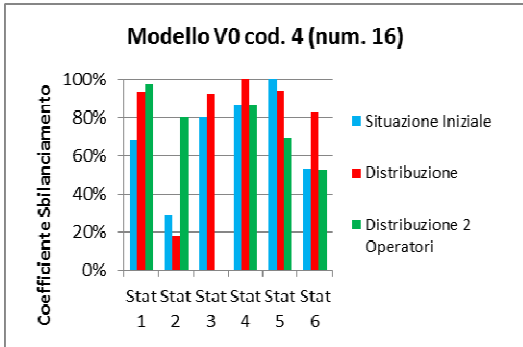


Figura 7.49 – Coefficienti Sbilanciamento.

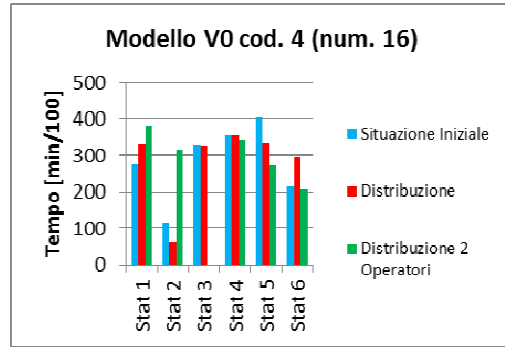


Figura 7.50 – Tempi assoluti.

Nella pompa modello V0 cod. 4 (num. 16) la prima ridistribuzione ha portato un miglioramento al bilanciamento di tutte le stazioni, tranne della seconda che è stato peggiorato portando questa ad un coefficiente di utilizzazione irrisorio con un conseguente problema di traffico e accumuli sulla linea, è quindi, al contrario, risultato conveniente la soluzione in cui si è liberato l'operatore sopprimendo così la stazione + sbilanciata, mantenendo comunque un buon bilanciamento della linea, che nello stesso tempo ha guadagnato di efficienza.

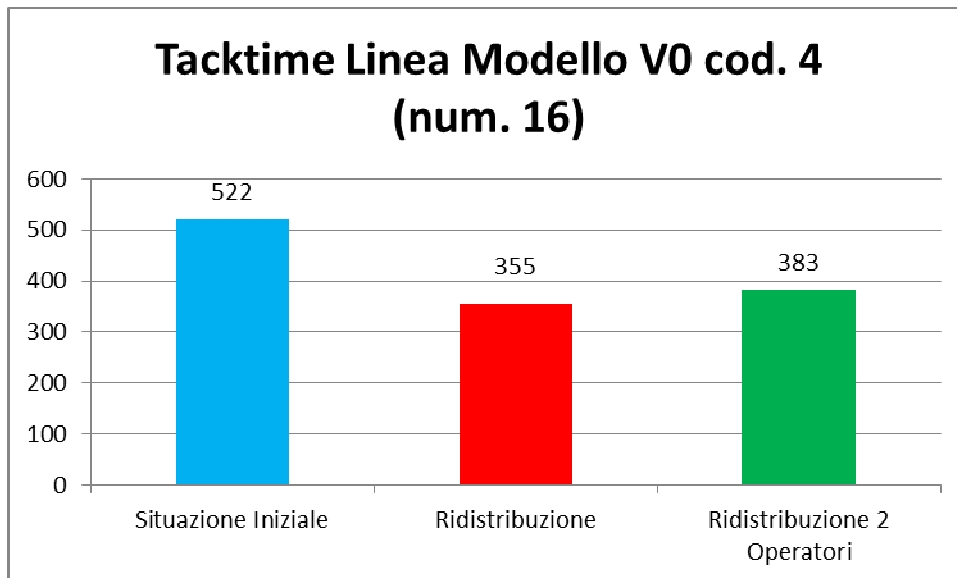


Figura 7.51 – Confronto Tacktime nei 3 casi.

Modello V250 cod. 2 (num. 24)

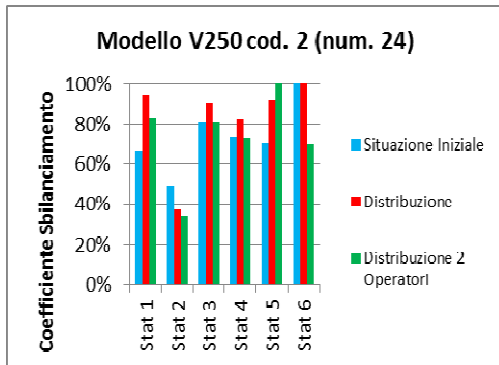


Figura 7.52 – Coefficienti Sbilanciamento.

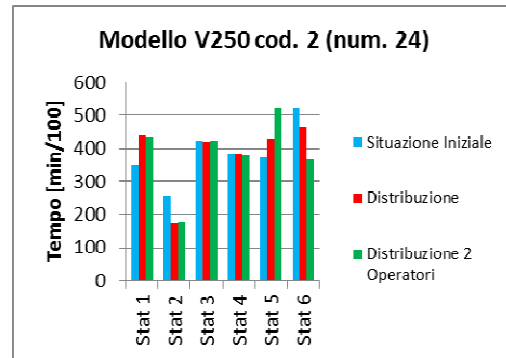


Figura 7.53 – Tempi Assoluti.

Per quel che riguarda invece la pompa modello V250 cod. 2 (num. 24) la soluzione della ricerca di liberare alcuni operatori è risultata controproducente, infatti nessun operatore è stato svincolato, ma come conseguenza si ha avuto un aumento del takttime con il suo conseguente effetto negativo nel tempo di realizzazione della pompa, mentre la prima ri-assegnazione dei task ha portato un considerevole miglioramento del bilanciamento.

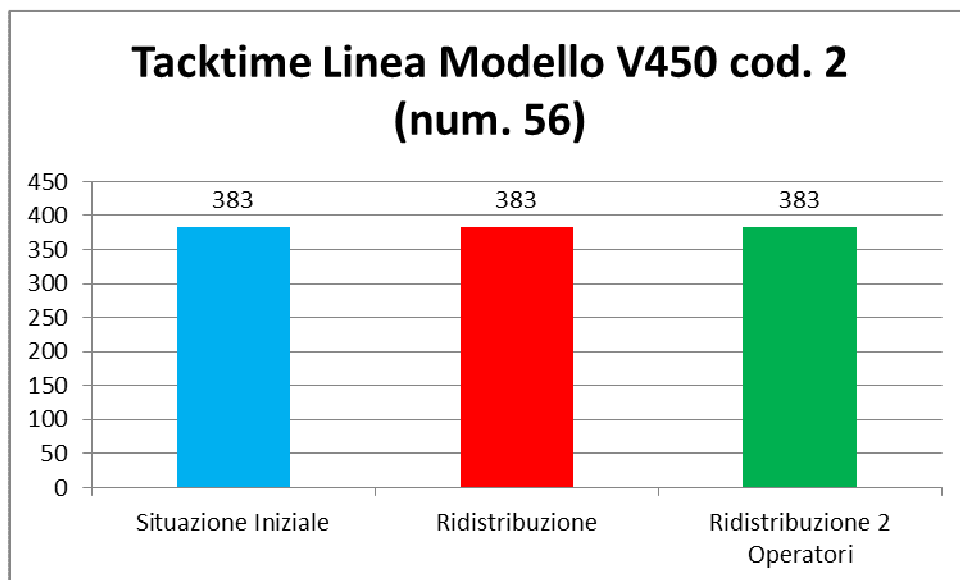


Figura 7.54 – Confronto Takttime nei 3 casi.

### 7.12 Simulazione della produzione.

Infine, sempre grazie al software *Automod* è stata simulata la produzione dell'azienda della durata di una settimana di lavoro, cioè 5 giorni lavorativi, con turni di 8 ore con pause di 90 minuti ogni 4 ore, portando come piano di produzione una soluzione mediata sulla richiesta annua dei modelli di pompe, per poter aver un dato di confronto fondato e facilmente apprezzabile. La simulazione è stata eseguita sia per la situazione di schedulazione iniziale, per quella con redistribuzione dei task, con ri-assegnamento dell'eventuale operatore libero del caso precedente e per quella con redistribuzione e ri-assegnamento nel caso di massimizzazione della ricerca di operatori liberi.

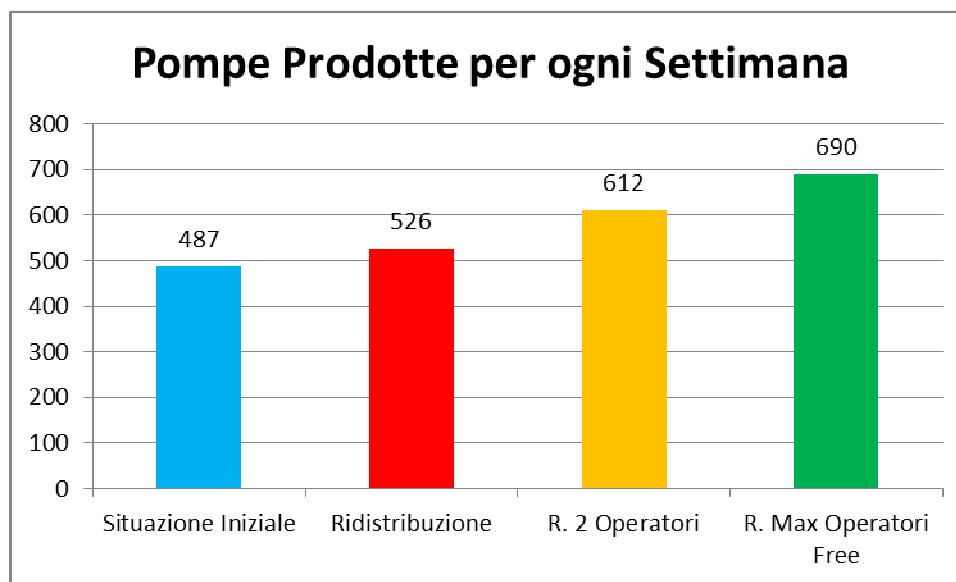


Figura 7.55 – Confronto pompe prodotte per ogni settimana.

Il risultato è stato una produzione di 487 pompe nel primo caso, 526 nel secondo, 612 nel terzo e 690 nel quarto, si ha avuto quindi in tutti i casi un miglioramento della produttività totale rispettivamente del 7, del 20 e del 29%, raggiungendo così gli obiettivi prefissati di massimizzare la produzione della linea, mantenendo il layout invariato e tenendo conto dei vincoli presenti.

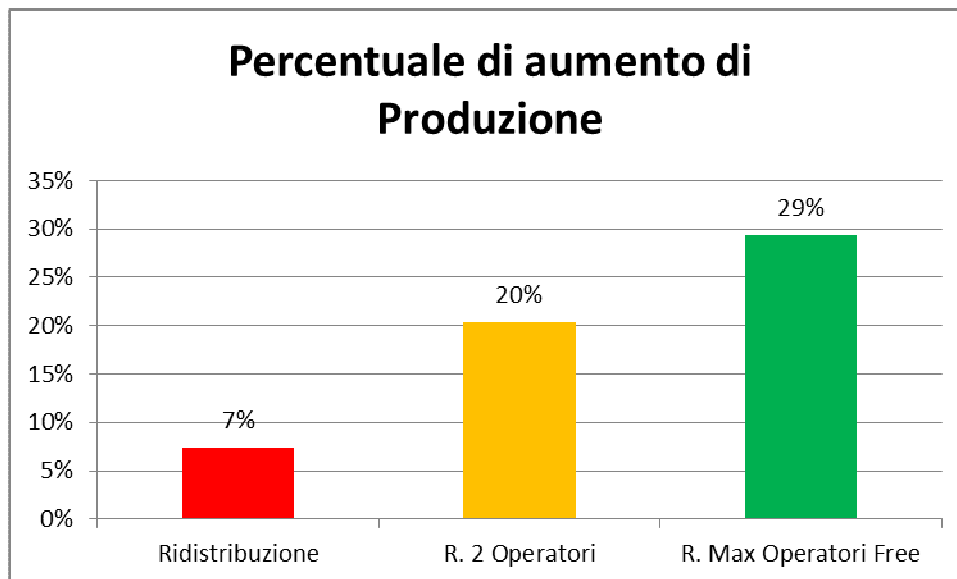


Figura 7.56 – Miglioramento % produttivo nei 3 casi.

Il caso con ri-assegnazione degli operatori andrebbe però esaminato più nel dettaglio e i dati ottenuti vanno interpretati come “massimo miglioramento possibile teorico”, infatti è stato valutata una diminuzione media del 30% nei tempi di esecuzione in caso di doppio operatore presente in una stazione, ma questo non è ovviamente sempre possibile. Alcune operazioni infatti possono essere infatti eseguite perfettamente in parallelo da entrambi gli operatori portando quindi un dimezzamento del tempo necessario, mentre in altre situazioni a causa di vincoli nelle operazioni, quali ad esempio la successione obbligata delle stesse, la mancanza di attrezzi o macchinari necessari per il lavoro da poter affidare al secondo operatore, la limitazione dello spazio ecc... possono impedire il lavoro simultaneo dei 2 operatori che comprometterebbe quindi il vantaggio di questa soluzione. Sarebbe dunque necessario per l'applicazione di questa soluzione un nuovo rilevamento dei tempi e dei vincoli per verificarne l'effettiva validità, e possibilità, di poterla applicare con successo per ottenere un effettivo miglioramento dei tempi di esecuzione.

## **Conclusioni e sviluppi futuri.**

Nella prima parte del presente lavoro sono state effettuate l'analisi di una linea di assemblaggio manuale di dispositivi oleodinamici e l'individuazione delle sue criticità mediante l'utilizzo della simulazione ad eventi del processo. L'analisi e la modellazione prendono le mosse da un sistema effettivamente esistente, cercando sia di generalizzare il sistema, sia man mano, di sbloccare alcune delle situazioni di vincolo e di configurazione del sistema di partenza.

Si sono via via realizzati modelli e algoritmi per la definizione di logiche di schedulazione, nell'intento di avere una metodologia guida e un modello di supporto per la definizione e la verifica di proposte di scheduling e bilanciamento il bilanciamento dei carichi di lavoro da assegnare agli operatori ed alle stazioni, per l'esecuzione delle attività necessarie al completamento dei prodotti.

Nella prima parte è stato costruito e configurato un modello simulativo, che è in grado di gestire l'assegnazione dinamica degli operatori alle postazioni, presenta caratteristiche di flessibilità e modularità tali da permettere integrazioni e miglioramenti, e con il quale è possibile condurre simulazioni di processi produttivi a numero di risorse umane variabile, nel caso di livello produttivo ridotto.

D'altra parte, è stato definito un criterio di bilanciamento delle postazioni nei casi a numero di risorse inferiore a 6, sulla base del rapporto tra tempo della stazione ottenuta dall'aggregazione di più stazioni base e tempo di uscita della configurazione standard; è stata estratta, dall'intero piano di produzione annuale, una parte di mix, rappresentativa dell'intera produzione, scelta sulla base della rilevanza in termini o di volumi produttivi, o di sbilanciamento; scelto, poi, il mese lavorativo come periodo di riferimento, è stato determinato il numero di prodotti campione necessario a saturare la produzione mensile a 6 risorse, e le sue frazioni di fattori  $r/6$  per le configurazioni a  $r$  risorse.

I diversi criteri di aggregazione delle stazioni hanno consentito di determinare 9 piani di produzione, e di introdurli in successione nel modello, in modo da poter effettuare confronti tra gli scenari sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione.

Si è, infine, verificata la validità del criterio di bilanciamento, in virtù dell'aumentata efficienza di linea nella configurazioni a risorse ridotte, e si è aperta la strada alla possibilità di analisi di ulteriori piani, sia effettivi, sia virtuali. In particolare, è stato valutato che l'efficienza di linea,  $E$ , rimane sostanzialmente costante, a parità di numero di risorse impiegate, al variare del carico produttivo; essa aumenta invece notevolmente riducendo le risorse, ed accorpiandole secondo i criteri esposti, in modo da avere postazioni somma con tempi tra loro il più possibile simili (linea bilanciata). Per quanto riguarda i tempi di produzione ottenuti dalla simulazione, essi aumentano al diminuire del numero di risorse, ma più lentamente di  $E$ . Inoltre, a risorse ridotte (e carichi ridotti in proporzione), il tempo di produzione non raggiunge il mese, a 6 risorse con il carico al 100% sì: un segnale di incremento di efficienza nei casi a minor numero di risorse rispetto al caso standard.

La seconda parte del lavoro ha invece tentato di proporre degli algoritmi per il bilanciamento della linea per il carico di lavoro, in configurazione a sei risorse iniziali, e produzione piena.

A tale scopo nel codice del simulatore sono state realizzate degli algoritmi per effettuare l'assegnazione dinamica dei task alle stazioni, nell'ottica di migliorare sia il bilanciamento, sia di rispettare se non migliorare il tacking time.

Tra i parametri individuati come rilevanti per definire i possibili miglioramenti conseguiti, si sono considerati sia il miglioramento dell'utilizzazione degli operatori sulla linea, evitando la presenza di disomogeneità di lavoro tra le risorse, sia un miglioramento globale dei tempi di realizzazione dei dispositivi, arrivando a portare la linea ad una configurazione di efficienza massima per la sua capacità produttiva.

In conclusione, come si è potuto verificare, si è riusciti ad ottenere miglioramenti sensibili di efficienza, obiettivo programmato, riuscendo infatti a migliorare bilanciamento e produttività della linea in esame, ottenendo inoltre la creazione di un modello generale, che potrà poi essere applicato per l'ottimizzazione di realtà produttive differenti, caratterizzate da esigenze e vincoli simili, ma non uguali. I modelli creati permettono l'assegnazione dinamica delle operazioni rispettando i vincoli dovuti alla struttura aziendale, di un generico prodotto che dovrà essere assemblato, a parità di configurazione della linea, quindi permette di adattare una linea già strutturata e collaudata per rispondere efficientemente alla gamma generale dei prodotti che un'azienda offre ai propri clienti, ed alla sua variabilità. I modelli realizzati, infatti, permettono di massimizzare la produttività e l'efficienza di una generica linea di assemblaggio manuale, imponendo come vincolo la struttura fisica della disposizione delle stazioni e delle attrezzature, in altre parole, permette di portare a saturazione l'efficienza, senza la necessità di intervenire fisicamente modificando la struttura aziendale, che comporterebbe un evitabile investimento di denaro e tempo.

Il primo modello applicato della seconda parte porta un chiaro miglioramento alla linea in esame e permette l'ottimale schedulazione delle operazioni alle postazioni di lavoro di un generico, anche nuovo, prodotto che deve essere assemblato su una linea di assemblaggio manuale, mentre come descritto nella parte conclusiva del capitolo dell'analisi dei dati ottenuti, il modello che permette la ri-assegnazione di operatori che risultano momentaneamente non operativi, necessita di ulteriori verifiche, che potrebbero riguardare un possibile sviluppo futuro di ulteriore studio e miglioramento di questa tipologia di impianto produttivo.

Eventuali possibili linee di studio per lo sviluppo ulteriore ed il miglioramento potrebbero essere, appunto la validazione del modello rispetto al comportamento reale che apporterebbe la ri-assegnazione degli operatori, e la misura dello scostamento fra output del modello e comportamento reale, una campagna ulteriore di osservazioni del sistema e raccolta dati per

migliorare le approssimazioni del modello virtuale con il reale, rilevando meglio tempistiche e vincoli.

Infine, si è evidenziata l'opportunità di apportare possibili ulteriori benefici, implementando anche delle logiche di bilanciamento integrative rispetto a quelle già definite, quali l'utilizzo di euristiche aggiuntive per l'individuazione di job da poter inviare in linea in gruppi ad avanzamento contemporaneo, con la possibilità di definire dei buffer inter-operazionali, superando così, in modo non influente la pura logica FIFO.

Questo potrebbe permettere di arrivare ad un bilanciamento migliore in caso di profili di sbilanciamenti complementari delle stazioni di prodotti diversi, con la necessità però di creare piccoli buffer di deposito tra una stazione e l'altra.

In generale, però l'utilizzo di tecniche risolutive, quali algoritmi, tecniche di simulazione o classiche tecniche analitiche, consentono di dedurre una soluzione (più frequentemente un insieme di soluzioni) per il problema che ne migliorano la situazione, anche se non esiste una tecnica risolutiva migliore in assoluto, ma la bontà di una tecnica è funzione delle soluzioni e degli obiettivi che si intende perseguire, nonché (ovviamente) della corretta implementazione delle precedenti fasi nel processo analitico-risolutivo.

### *Evoluzione attuale sviluppi futuri.*

In realtà, si sono già realizzati dei modelli successivi a quelli già presentati, che rappresentano la realizzazione delle linee di sviluppo già in parte dichiarate.

Il modello che realizza la schedulazione dei task alle risorse è stato migliorato rispetto all'attuale con il perfezionamento di alcune regole e logiche.

Dopo l'assegnazione dei task alle stazioni come già descritto, viene valutata, sia l'esistenza di stazioni, che a causa dei vincoli, del valore discreto dei task, emergono come vuote, sia in caso di sotto utilizzazione di alcune stazioni viene incrementato il valore del tack time di riferimento, per cercare di forzare le stazioni sottoutilizzate a svuotarsi.

Con definizione di priorità queste risorse possono essere assegnate alle stazioni, dopo la nuova ri-schedulazione risultino più caricate, per valutare nuovamente sia i coefficienti di utilizzazione che i tack time risultanti.

La regola di assegnazione a stazioni degli operatori supplementari, non è più semplicemente basata sulla regola del coefficiente di utilizzazione più elevato, ma è implementata una logica che valuta, non solo quello, ma anche il valore di possibile riduzione di tack time stazione conseguibile.

La riduzione di questo tack time di stazione non è più genericamente posta pari ad un valore percentuale, arbitrario e uguale per tutto l'algoritmo, ma è calcolato effettivamente, e in maniera specifica per ogni riga d'ordine.

Per la valutazione del miglioramento congiunto fra innalzamento dell'efficienza di linea, e variazione del tack time per ogni configurazione, è stato definito un parametro sintetico che combina i due effetti: è sostanzialmente calcolato il costo della riga d'ordine per ogni configurazione, ad ogni fase di applicazione di una nuova logica, e viene selezionata la configurazione con costo più basso.

Ulteriormente, dopo aver analizzato gli effetti di applicazione di tutte le possibili regole di assegnazione su linea singola, avendo esaminato i profili dei tempi di assegnazione delle configurazioni migliori, si è concluso che dati i vincoli, per alcune righe d'ordine l'unica via di possibile miglioramento potesse essere solo la realizzazione di un *mixed model*.

Dall'analisi dei profili di carico alle stazioni, si è però osservato, che l'unica via, senza andare a toccare il posizionamento dei vincoli, era quello di realizzare una *linea supplementare parallela alla prima*, ma alimentata in contro-flusso, operata dagli stessi operatori. Risultando tipicamente meglio caricate le stazioni 1, 4, 5, 6, a causa dei vincoli, invertendo il flusso della seconda linea sembrava più promettente la possibilità di compensazione di stazioni iniziali con finali per righe d'ordine accoppiabili.

Si è adottato un criterio per valutare, solo sulle righe d'ordine peggio bilanciate, delle tabelle di accoppiamento, da impiegare per realizzare un piano di produzione accoppiato.

I risultati, e i modelli così descritti, al momento della stampa di questo lavoro, non sono ancora definitivamente validati sembrando tuttavia molto promettenti.

Lo strumento simulativo è, quindi, risultato un potente strumento sia di schedulazione che di verifica.

Si ritiene doveroso dichiarare che i dati inerenti le analisi effettuate, essendo considerati sensibili da parte dell'Azienda, sono stati moltiplicati per un fattore correttivo.

Dal punto di vista personale, tale esperienza ha maturato molto le mie conoscenze in termini di analisi dei problemi sui bilanciamenti di linee di assemblaggio. Congiuntamente all'attività lavorativa, il cui impegno giornaliero ha molto spesso inciso onerosamente nell'attività di ricerca come ingegnere di processo, questo percorso tende a completare il panorama degli studi inerente tali tematiche.



*A completamento di tale lavoro è mio desiderio esprimere alcuni ringraziamenti alle persone che mi hanno aiutato a portare a termine questo elaborato.*

*Innanzitutto il Prof. Ing. Riccardo Melloni, per avermi dato l'opportunità di compiere questo percorso; l'Ing. Sergio Amedeo Gallo, l'amico Sergio, cui non potrò mai finire di dire "grazie", per la competenza, pazienza e dedizione con cui mi ha portato a tale risultato. Voglio ringraziare allo stesso modo tutti i ragazzi del laboratorio LASI, sempre fonte d'ispirazione per la risoluzione dei problemi in itinere.*

*Un cenno speciale voglio dedicarlo a tutti i miei colleghi, collaboratori ed amici delle Aziende in cui ho avuto l'opportunità di lavorare in questi anni: a cominciare dalla Comer Industries S.p.A., la Poclain Hydraulics Industriale S.r.l. ed il mio gruppo di ingegneria di processo, ed infine l'attuale Bosch Rexroth Oil Control S.p.A., in particolari i ragazzi del team TEF6 con a capo l'Ing. Carmine Barlotti, grazie ai quali ho accresciuto notevolmente la mia competenza e professionalità.*

*Ringrazio mio padre e mia madre, che anche in quest'occasione si sono dimostrati un valido supporto per il mio lavoro.*

*Per questo lavoro, come per la vita, ringrazio di avere vicino a me una persona speciale: mia moglie Ilenia.*

