

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Sistemi

Corso di laurea specialistica in Ingegneria Gestionale



**Confronto di due sistemi di ORR in sistemi produttivi Two-Stage Assembly Shop
all'aumento di variabilità del routing e al variare del carico di lavoro di sistema.**

La limitazione del carico di lavoro e il bilanciamento del flusso.

Relatore: Prof. Alberto Portioli Staudacher

Correlatore: Ing. Marco Tantardini

Tesi di laurea di:

Luca Menghini matr 736293

Luca Morato matr 734360

AA. 2009/2010.

Sommario

Indice delle figure.....	vi
Indice delle tabelle.....	ix
Abstract.....	xi
English Abstract.....	xix
Introduzione	xxv
Capitolo 1: Il Settore Make To Order	
1 Analisi del contesto Make To Order	3
1.1 Caratteristiche aziende MTO.....	6
1.2 Problematiche aziende MTO.....	9
1.2.1 Determinazione delle due dates e del prezzo	9
1.2.2 Lead time produttivo e puntualità	10
1.2.3 Approvvigionamento delle materie prime	10
1.2.4 Competenze.....	11
1.3 World class manufacturing companies.....	11
1.4 Evoluzioni in atto nel settore MTO	13
1.5 Lean e MTO	14
Capitolo 2: I Two Stage Assembly Shop	
2 La tipica struttura di un'azienda MTO	19
2.1 Il sistema produttivo analizzato.....	20
2.1.1 Due possibilità di generalizzazione per il sistema produttivo analizzato	21
2.2 Two Stage Assembly Shop.....	24
2.2.1 I contesti di applicazione.....	25
2.2.2 Caratteristiche principali dei Two Stage Assembly Systems.....	27
2.3 Le modalità di risoluzione presenti in letteratura.....	28

2.3.1	Ipotesi principali dei vari modelli.....	29
2.3.2	Il modello di riferimento: la Minimizzazione del Makespan (Lee et al 1993).	30
2.3.3	Estensioni dei modelli principali.....	33
2.4	Problematiche dei modelli mostrati.....	38
2.5	La scelta del Workload Control come tecnica di PP&C	40

Capitolo 3: L'approccio Workload Control

3	Workload Control.....	43
3.1	Il paradigma.....	43
3.2	Controllo dell'Input e dell'Output.....	44
3.3	Attività principali delle metodologie Order Review and Release (ORR)......	47
3.4	Order entry phase (mid term capacity planning).....	50
3.5	Preshop pool management phase	51
3.6	Order Release phase	53
3.7	La classificazione di Bergamaschi et al 1997	54
3.7.1	Order Release mechanism.....	54
3.7.2	Timing convention	55
3.7.3	Workload measure	56
3.7.4	Aggregation of workload measure.....	57
3.7.5	Workload accounting over time.....	58
3.7.6	Workload control	64
3.7.7	Workload limiting.....	64
3.7.8	Workload balancing	68
3.7.9	Il conflitto tra bilanciamento e rispetto delle date di consegna.....	71
3.7.10	Capacity planning	74
3.7.11	Schedule visibility.....	75

Capitolo 4: Obiettivi del lavoro di tesi

4	Il contesto Make to Order	79
----------	--	-----------

4.1	Gli obiettivi del lavoro di tesi.....	81
Capitolo 5: Il sistema produttivo analizzato		
5	Presentazione del sistema produttivo analizzato.....	85
5.1	Il sistema produttivo.....	85
5.1.1	Configurazioni simulate.....	89
5.1.2	I tempi di lavorazione.....	91
5.1.3	Riepilogo delle medie e coefficienti di variazione delle distribuzioni utilizzate per simulare i sistemi con variabilità e senza variabilità.....	96
5.2	L'impatto della variabilità sulle prestazioni del sistema.....	98
5.2.1	Variabilità dei tempi di lavorazione.....	98
5.2.2	Variabilità del routing.....	99
5.2.3	Presenza di rilavorazioni.....	100
5.3	Order Review and Release.....	101
5.3.1	Order Review Phase.....	101
5.3.2	Preshop Pool Management.....	103
5.3.3	Order Release Phase.....	103
5.3.4	L'Order Release della Limitazione di carico Total Shop Load (Upper Bound).....	105
5.3.5	La fase di Order Release del Modello di Bilanciamento dei Carichi di lavoro.....	106
5.4	Presentazione del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.....	107
5.4.1	I parametri del modello.....	108
5.4.2	Presentazione del modello.....	113
Capitolo 6: La conduzione degli esperimenti		
6	La conduzione degli esperimenti, parametri e variabili.....	125
6.1	La progettazione della simulazione.....	133
6.1.1	La determinazione del transitorio. (Mosca, 2007).....	135
6.1.2	La determinazione della lunghezza di ogni run.....	139
6.1.3	La determinazione del numero di run.....	140

6.2	Le performance analizzate.....	141
Capitolo 7: L'analisi dei risultati		
7	Analisi dei risultati.....	147
7.1	Domanda 1: Come impatta la variabilità di sistema, in particolare del routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?.....	148
7.1.1	La prima configurazione analizzata: bassa variabilità e Pipeline 210000 minuti.....	148
7.1.2	La seconda configurazione analizzata: alta variabilità e pipeline 210000 minuti.	153
7.1.3	La prima domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.....	157
7.2	Domanda 2: Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-in-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni dei due modelli di bilanciamento e limitazione?	159
7.2.1	La terza configurazione analizzata: bassa variabilità e pipeline 130000 minuti.....	159
7.2.2	La quarta configurazione analizzata: alta variabilità e pipeline 130000.....	165
7.2.3	La seconda domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.	170
7.3	Domanda 3: La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?.....	172
7.3.1	La riduzione di Pipeline per la prima configurazione analizzata.....	172
7.3.2	La riduzione di Pipeline per la seconda configurazione analizzata.	175
7.3.3	La riduzione di Pipeline per la terza configurazione analizzata.	176
7.3.4	La riduzione di Pipeline per la quarta configurazione analizzata.	178
7.3.5	La terza domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.	180
Capitolo 8: Conclusioni		
8	Conclusioni	185
8.1	Domanda 1: Conclusioni.....	185
8.2	Domanda 2: Conclusioni.....	188
8.3	Domanda 3: Conclusioni.....	189
8.4	Sviluppi futuri.....	191
1	Appendice : L'infrastruttura della simulazione.....	3

Appendice A: Excel 2007

2	Il funzionamento del foglio di Excel “Definitivo.xls”	7
2.1	Il foglio di lavoro “tempistd” 1	7
2.2	Il foglio di lavoro “Routing”	8
2.3	Il foglio di lavoro “ Annostd”	9
2.4	Il foglio di lavoro “ Ricircoli”	10
2.5	Il foglio di lavoro “ Annoeff “	11
2.6	Il foglio di lavoro “ Ordini_al_giorno “	13
2.7	Il foglio di lavoro “ Dati_input ”	15
2.8	Il foglio di lavoro “ Preshoppool prima “	16
2.9	Il foglio di lavoro “ da copiare “	17
2.10	Il foglio di lavoro “ Preshoppool rilascio “	19
2.11	Il foglio di lavoro “ Data output “	21
2.12	Il foglio di lavoro “ Preshoppool_dopo “	23
2.13	Il foglio di lavoro “ Giorno”	26
2.14	Le Macro	27
2.14.1	L’algoritmo di limitazione EDD	27
2.14.2	Il codice VBA per l’algoritmo di limitazione del carico.	28
2.15	Come automatizzare il funzionamento delle macro	40
2.16	Modifiche da apportare per la simulazione con il modello di bilanciamento	43
2.16.1	Il foglio di lavoro inputCplex	43
2.17	Il foglio di lavoro pesi	45
2.18	Le macro necessarie per il bilanciamento	45

Appendice B: Arena 13.0

3	Introduzione ad Arena 13.0	49
3.1	Il primo sistema: il sistema di gestione del tempo e attivazione delle macro.	51
3.2	Il secondo sistema: il sistema di simulazione dello shop floor.	62

3.2.1	Parte prima: L'ingresso degli ordini nello shop floor	63
3.2.2	Parte seconda: la simulazione della singola stazione.....	69
3.2.3	Parte terza: l'attesa dei vari componenti nel punto di assemblaggio.	74
3.2.4	Parte quarta: l'uscita dal sistema.....	77
3.3	Il quarto sistema: il sistema di gestione delle code.	79
3.4	Modifiche al file di Arena per il corretto funzionamento del modello di bilanciamento....	85

Appendice C: Ilog Cplex 5.2

4	Introduzione al software IBM ILOG CPLEX.....	91
4.1	Il file "balance.ops"	92
4.2	Il file "bilanciamento.dat"	92
4.3	Il file "bilanciamento.mod"	93

Bibliografia	i
---------------------------	----------

Indice delle figure

Figura 1	Lo schema di Wortmann.....	4
Figura 2	La rappresentazione delle diverse modalità produttive	7
Figura 3	Le differenti configurazioni dello Shop Floor	8
Figura 4	I principi MTO.....	12
Figura 5	La tipica struttura di un'azienda MTO (Kolish 2000).....	19
Figura 6	Il controllo dell'input e dell'output	45
Figura 7	Le aree di competenza del WLC	46
Figura 8	Posizione delle metodologie ORR all'interno del sistema di pianificazione e controllo.....	47
Figura 9	La sindrome dei lead time	73
Figura 10	Il sistema produttivo analizzato	86
Figura 11	La distribuzione dei tempi standard di lavorazione.....	94
Figura 12	La tabella delle distorsioni dei tempi standard	94
Figura 13	La distribuzione delle distorsioni	95
Figura 14	La distribuzione dei tempi effettivi	96
Figura 15	Schema riassuntivo dei tempi per sistema senza variabilità.....	97

Figura 16 Schema riassuntivo dei tempi per il sistema con variabilità.....	98
Figura 17 La fase di Order Entry	102
Figura 18 Il processo di Order Release	105
Figura 19 L'Order Release per la limitazione Total Shop Load.....	106
Figura 20 L'Order Release per il bilanciamento dei carichi di lavoro.....	107
Figura 21 La serie di pesi con x intero.....	112
Figura 22 La serie di pesi con x non intero.....	113
Figura 23 La classificazione secondo Bergamaschi del modello sviluppato.....	121
Figura 24 la determinazione del transitorio per il Gross Th Time.....	137
Figura 25 La determinazione del transitorio per lo Shop Floor Time	138
Figura 26 La determinazione del transitorio per l'Output.....	138
Figura 27 Output Pipeline 210000 bassa variabilità	149
Figura 28 GTT Pipeline 210000 bassa variabilità	149
Figura 29 Ritardi % pipeline 210000 bassa variabilità.....	150
Figura 30 Performance limitazione pipeline 210000 bassa variabilità.....	151
Figura 31 Performance bilanciamento pipeline 210000 bassa variabilità	152
Figura 32 Confronto bilanciamento-limitazione Pipeline 210000 bassa variabilità.....	152
Figura 33 Output Pipeline 210000 alta variabilità.....	154
Figura 34 GTT Pipeline 210000 alta variabilità	154
Figura 35 Ritardi Pipeline 210000 alta variabilità.....	155
Figura 36 Performance limitazione pipeline 210000 alta variabilità.....	156
Figura 37 Performance bilanciamento pipeline 210000 alta variabilità	156
Figura 38 Confronto bilanciamento limitazione Pipeline 210000 alta variabilità.....	157
Figura 39 Confronto bilanciamento limitazione rispetto alla variabilità	157
Figura 40 L'aumento di SFT con aumento variabilità.....	158
Figura 41 GTT Pipeline 130000 bassa variabilità	160
Figura 42 Output Pipeline 130000 bassa variabilità	161
Figura 43 Ritardi Pipeline 130000 bassa variabilità.....	162
Figura 44 Mean conditional tardiness Pipeline 130000 bassa variabilità.....	162
Figura 45 Performance limitazione pipeline 130000 bassa variabilità.....	163
Figura 46 Performance limitazione EDD pipeline 130000 bassa variabilità.....	163
Figura 47 Performance bilanciamento pipeline 130000 bassa variabilità	164
Figura 48 Confronto bilanciamento - limitazione pipeline 130000 bassa variabilità.....	165
Figura 49 Output Pipeline 130000 alta variabilità.....	166

Figura 50 GTT Pipeline 130000 alta variabilità	167
Figura 51 Ritardi Pipeline 130000 alta variabilità	168
Figura 52 Performance limitazione Pipeline 130000 alta variabilità.....	169
Figura 53 Performance bilanciamento Pipeline 130000 alta variabilità	169
Figura 54 Confronto bilanciamento limitazione pipeline 130000 alta variabilità	170
Figura 55 La variazione di Output per la limitazione al variare di carico di sistema e variabilità .	171
Figura 56 La variazione di Output per il bilanciamento al variare di carico di sistema e variabilità	171
Figura 57 Le performance del bilanciamento con Pipeline 105000 bassa variabilità	173
Figura 58 Performance limitazione Pipeline 130000 bassa variabilità.....	173
Figura 59 Conftonto limitazione pipeline 130000 bassa variabilità – bilanciamento pipeline 105000 bassa variabilità.....	174
Figura 60 Performance bilanciamento Pipeline 105000 alta variabilità.....	175
Figura 61 Performance limitazione Pipeline 130000 alta variabilità.....	175
Figura 62 Conftonto limitazione pipeline 130000 alta variabilità – bilanciamento pipeline 105000 alta variabilità.....	176
Figura 63 Performance bilanciamento Pipeline 170000 bassa variabilità	177
Figura 64 Performance limitazione pipeline 210000 bassa variabilità	177
Figura 65 Conftonto limitazione pipeline 210000 bassa variabilità – bilanciamento pipeline 170000 bassa variabilità.....	178
Figura 66 Performance bilanciamento Pipeline 170000 alta variabilità.....	179
Figura 67 Performance limitazione Pipeline 210000 alta variabilità.....	179
Figura 68 Conftonto limitazione pipeline 210000 alta variabilità – bilanciamento pipeline 170000 alta variabilità.....	179
Figura 69 I miglioramenti percentuali ottenuti per la terza domanda di ricerca.....	181
Figura 70 I miglioramenti percentuali ottenuti dal bilanciamento dei carichi di lavoro.....	190

Indice delle tabelle

Tabella 1 Il sistema ad alta variabilità e Pipeline 130000.....	128
Tabella 2 Il sistema con alta variabilità e Pipeline 210000.....	129
Tabella 3 Il sistema con bassa variabilità e Pipeline 130000.....	130
Tabella 4 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 210000	131
Tabella 5 Il sistema con alta variabilità e pipeline 105000.....	132
Tabella 6 Il sistema con alta variabilità e pipeline 170000.....	132
Tabella 7 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 105000.....	132
Tabella 8 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 170000.....	133
Tabella 9 Le performance analizzate	144
Tabella 10 Le performance analizzate	144

Abstract

Negli ultimi anni si è assistito ad un significativo incremento della pressione competitiva sui mercati insieme ad una sempre crescente attenzione, da parte delle aziende, alla realizzazione di prestazioni superiori a quelle dei concorrenti stessi. La ricerca di una maggiore competitività sul mercato è la principale preoccupazione di un numero sempre crescente di aziende. Nello specifico poi, il fattore legato alla produttività del lavoro è diventato sempre più pressante negli ultimi anni per via della riduzione delle barriere di mercato. Tale pressione alla produttività del lavoro, non solo ha coinvolto i settori con maggiori volumi e standardizzazione. Ha pure colpito le aziende che operano su produzioni non ripetitive. Queste ultime hanno sempre potuto infatti sfruttare la loro capacità di customizzazione e la loro flessibilità per vincere sul mercato e ora si trovano quindi a dover rivedere le loro strategie per potersi meglio allineare con le richieste del mercato e con la competizione. Negli ultimi anni anche nelle aziende che operano su commessa stanno diventando sempre più centrali i temi legati alla riduzione dei costi.

Nella crescente pressione alla riduzione dei costi un ruolo fondamentale è giocato dalla leva gestionale e organizzativa, cioè a quella legata alla migliore gestione delle attività. Nelle aziende su commessa la letteratura ha ad esempio mostrato come la corretta pianificazione e gestione delle attività permette risultati brillanti in termini di riduzione dei costi, dei tempi di attraversamento e dei livelli di WIP.

Questo è un problema ampiamente trattato in letteratura da diversi autori ((Bechte, 1988), (Land, et al., 1996), (Oosterman, et al., 2000), (Stevenson, et al., 2005), (Hendry, et al., 1998), (Perona & Portioli, 1998), (Bergamaschi, et al., 1997), (Philipoom & Malhotra, 1993)), i quali hanno cercato di dare risposta alle nuove esigenze del mercato. Il principale filone su cui si sono concentrati questi autori è stato quello del Production Planning & Control (PP&C); essi hanno trovato nel PP&C una potente leva per realizzare le prestazioni desiderate. In particolare è possibile riconoscere una grande attenzione da parte degli autori citati alle tecniche e metodologie di Workload Control (WLC). Le tecniche di WLC sono state proposte per la prima volta da Bechte nel 1988; pianificando la produzione mediante tali tecniche Bechte 1988 mostra gli effetti positivi ottenuti in un contesto reale di applicazione del settore Make to Order. Bergamaschi et al 1997 mostra come le tecniche di Workload Control si inseriscano nella fase di Order Review and Release, fase che ricopre un ruolo fondamentale nel PP&C.

Sebbene il tema del WLC sia stato già ampiamente trattato, è stato prevalentemente associato a configurazioni di tipo job shop. Il job shop, tuttavia, non rappresenta una configurazione produttiva comunemente ritrovabile nella realtà (Oosterman et al 2000, Land, & Gaalman, 2000); è infatti ben più comune riconoscere all'interno del flusso produttivo un verso predominante, che seguono la maggior parte dei jobs. È al contrario molto raro trovare un sistema produttivo in cui tutte le macchine presenti sono attraversate con ordine casuale; piuttosto è probabile riconoscere alcune macchine o stazioni come quelle che vengono tendenzialmente attraversate per prime, mentre altre come quelle che vengono tendenzialmente attraversate per ultime. Fra i diversi flussi produttivi, inoltre, è normalmente riconoscibile un flusso principale, nel quale confluiscono i flussi secondari. Sulla base di queste osservazioni e sulla base di quanto riportato da Oosterman et al. 2000 è possibile definire il flow shop come la configurazione di sistema produttivo più facilmente riscontrabile nella realtà. Il flow shop può assumere una configurazione di massimi ordine e rigidità, prendendo il nome di “Pure Flow Shop”, oppure può contenere flussi parzialmente non orientati, prendendo così il nome di “General Flow Shop”. La predominanza del sistema configurato come un flow shop è ancora maggiore nel contesto di aziende operanti secondo i principi lean: l'ordinamento dei flussi produttivi, l'eliminazione dei ricircoli e delle interruzioni del flusso sono alcune delle linee guida a cui si ispirano le aziende che desiderano operare secondo una logica lean.

Una seconda classe di sistemi produttivi è stata definita come Two Stage Assembly Shop; questa configurazione produttiva è stata poco trattata in letteratura, a confronto del WLC. Tuttavia essa presenta alcune caratteristiche che la portano a poter rappresentare molto bene una gran parte di realtà aziendali, sia nel campo manifatturiero sia nel campo dei servizi. Infatti in un tipico sistema produttivo sono riconoscibili due stadi che è necessario attraversare per realizzare il prodotto finito: il primo stadio è quello di fabbricazione, mentre il secondo è quello di assemblaggio. Nel primo stadio sono prodotte (o acquistate) le componenti fondamentali del prodotto finito; nel secondo stadio sono assemblate le componenti ed effettuate le ultime lavorazioni necessarie a realizzare il prodotto finito. L'esempio più noto di questo sistema produttivo, presentato per la prima volta da Lee 1993, riguarda il sistema che permette di realizzare un motore a combustione interna: le componenti principali sono il corpo, lo chassis ed il motore. Le prime due sono prodotte internamente, mentre la terza viene acquistata esternamente; quando tutte le componenti sono a disposizione si procede all'assemblaggio ed alle ultime lavorazioni. Particolarità facilmente intuibile, anche se non banale, è la possibilità delle componenti di essere prodotte in contemporanea, in quanto ciascuna adopera risorse dedicate o comunque distinte da quelle che impiegano le altre componenti dello stesso prodotto finito; questo porta ad avere un sistema che è

configurato come un insieme di linee di fabbricazione parallele che confluiscono in un'unica linea di assemblaggio. I Two-Stages Assembly Shops si possono ritrovare in diversi settori sia delle aziende di servizio che di aziende manifatturiere. Esempi di queste modalità produttive si possono ritrovare nella produzione di aerei: per realizzare un aereo è necessario assemblare diverse componenti caratterizzate da grande complessità e specificità per il cliente. Ne sono un esempio i reattori che, seppur essendo solo una componente del prodotto finito (i.e. l'aeromobile), richiedono operazioni complesse e con grande valore aggiunto; esempio della specificità delle componenti è invece l'allestimento interno che deve essere realizzato secondo le richieste del cliente. Attraverso un semplice aggiustamento delle ipotesi e dei parametri è inoltre possibile applicare il presente modello al campo dei servizi; abbiamo già specificato che ciò che le stazioni fanno non è rilevante ai fini di questa ricerca, bensì è rilevante il tempo per cui la risorsa è impiegata. Con una semplice mappatura dei processi aziendali in un'impresa di servizi è poi possibile notare che la configurazione sopra descritta è perfettamente applicabile anche ad essa e non solo ad un'impresa manifatturiera. L'erogazione di un mutuo, l'offerta di una prestazione medica, così come la riparazione di un'automobile sono solo alcuni dei servizi che, per essere erogati, richiedono che ogni aspetto della pratica ad esso collegata sia elaborato nelle rispettive funzioni (che sono quindi le sub linee produttive) e possa poi essere trattata nella parte finale a livello aggregato (sub linea di assemblaggio).

Potrebbe risultare quindi interessante andare verso lo studio di questo tipo di configurazioni, che sembrano essere ben più frequenti rispetto ai sistemi di tipo job shop.

La ricerca sui TSAS è orientata alla minimizzazione delle seguenti misure: makespan (tempo di attesa delle componenti nella scorta posta a monte dello stadio di assemblaggio); flowtime (tempo di attraversamento del sistema); lateness (numero di ordini consegnati in ritardo); tardiness (entità del ritardo medio). Per raggiungere queste prestazioni diversi autori hanno proposto tecniche risolutive, che tuttavia è possibile ricondurre a due modalità principali: la prima modalità consiste nello sviluppo di sistemi molto sofisticati, associati a procedure euristiche di soluzione e regole di dispatching appropriate (tra i principali autori segnaliamo (Philipoom & Fry, 1999)); la seconda modalità, più diffusa in letteratura, consiste nella costruzione di teoremi ad-hoc che permettano di risolvere il problema complesso secondo un approccio di tipo branch-and-bound (tra i principali autori si segnalano Lee, 1993, Potts, 1995).

Le modalità risolutive finora proposte per quanto riguarda i TSAS hanno due principali svantaggi: innanzitutto richiedono una potenza di calcolo, oltre che dei tempi di risoluzione, largamente

superiori a quelli richiesti dalle tecniche di WLC; in secondo luogo, ma non meno importante, presentano una scarsissima robustezza alla variabilità di un sistema reale. Principalmente infatti sono considerate come deterministiche tutte le variabili interne (p.e. tempi di lavorazione) ed esterne (p.e. mix della domanda). Al verificarsi di un imprevisto le soluzioni proposte dalle metodologie euristiche possono peggiorare significativamente la loro bontà e possono rendere il sistema ben più inefficiente. Al contrario le soluzioni individuate con l'applicazione di tecniche di WLC si sono dimostrate molto robuste all'accadimento di un imprevisto; tuttavia la ricerca in merito è ancora carente per quanto riguarda l'applicazione al contesto dei Two Stage Assembly Shops.

Per l'attuale mancanza di uno studio al riguardo si è ritenuto di approfondire l'applicazione delle tecniche di WLC al contesto largamente diffuso nella realtà del TSAS. Questo vuole permettere di meglio comprendere l'applicabilità del WLC in contesti reali ed al tempo spesso spera di fornire un'alternativa più efficiente ed efficace alle modalità con cui finora sono stati trattati i TSAS.

Si è deciso di considerare due approcci al WLC: la limitazione del carico di lavoro ed il bilanciamento del carico di lavoro, cercando di ottenere un livellamento nei rilasci giornalieri, cioè un bilanciamento del flusso di lavoro giornaliero. Nello specifico si è data risposta alle seguenti domande di ricerca:

Domanda 1:

Come impatta la variabilità di sistema, in particolare di routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Domanda 2:

Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-In-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Domanda 3:

La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?

Per rispondere alla prima domanda di ricerca è stata quindi effettuata una valutazione dell'efficacia della logica di bilanciamento e di limitazione testando le due tecniche ORR in sistemi con variabilità differente, andando a misurare le prestazioni che, per le ragioni di cui sopra, risultano più significative ai fini del successo dell'impresa. Sono stati quindi oggetto di studio e di confronto fra

le due logiche il tempo di attraversamento del sistema (Gross Throughput Time), la percentuale di ordini in ritardo, l'entità stessa del ritardo medio, il tutto a parità di Work-In-Process, con la consapevolezza che il WIP rappresenta un costo e la situazione ideale è quella in cui esso è al livello minimo. Per rispondere alla seconda domanda di ricerca si è scelto di analizzare anche la robustezza delle soluzioni ottenute al variare della dimensione della Pipeline. Sono state simulate due diverse dimensioni della Pipeline (130000 e 210000 minuti di lavorazione complessivamente contenuti nel sistema produttivo e nella Pre Shop Pool) e due diversi livelli di variabilità degli ordini ("alto" e "basso"). Infine per la terza domanda di ricerca sono state analizzate due ulteriori dimensioni delle Pipeline (105000 e 170000 minuti) a parità di lead time di consegna richiesti.

Il sistema produttivo che è stato preso in considerazione è strutturato secondo due stadi distinti: il primo stadio è composto da tre linee di fabbricazione, tutte in parallelo; il secondo stadio è composto da una linea di assemblaggio. Ogni linea di fabbricazione è dedicata alla realizzazione di un solo componente del prodotto finito; ogni prodotto finito (esiste un prodotto finito per ogni ordine o job) può essere composto da una, due o tre componenti, le quali sono assemblate nella linea di assemblaggio, che si occupa anche di effettuare alcune operazioni di finitura del prodotto. Ogni linea -sia di fabbricazione che di assemblaggio- è composta da cinque stazioni consecutive; su ciascuna stazione non transita una certa percentuale di ordini: alcuni ordini infatti non richiedono determinate lavorazioni (routing variabile). Prima dell'ultima stazione della prima linea di fabbricazione e prima dell'ultima stazione della linea di assemblaggio si trova una fase di controllo qualità. Con una probabilità stabilita, il controllo di qualità individua dei prodotti difettosi che devono essere rilavorati su una delle quattro stazioni immediatamente precedenti la fase di controllo; i prodotti difettosi sono quindi inseriti nuovamente nella coda della stazione da cui devono ricominciare il loro processo produttivo, seguono nuovamente il routing prestabilito e poi possono proseguire nel sistema produttivo senza essere controllati nuovamente (naturalmente, se una difettosità è stata riscontrata nella prima linea di fabbricazione, una nuova difettosità non può essere riscontrata sulla stessa linea di fabbricazione, ma può essere certamente rilevata al termine della linea di assemblaggio).

Il sistema così descritto presenta un elevato grado di variabilità, a causa delle seguenti condizioni: il routing dei pezzi è variabile, perciò, sebbene il flusso di produzione abbia un verso costante, il numero di stazioni che i pezzi attraversano è variabile; il numero di componenti che ogni prodotto richiede sono variabili; la fase di controllo qualità costringe alcuni pezzi ad essere rilavorati, interrompendo così il regolare ed uniforme scorrimento del flusso di produzione in una sola direzione. Questo sistema è definito in letteratura "General Flow Shop". Per valutare l'effetto della

variabilità sulle soluzioni trovate e comprendere dunque se una logica di rilascio è da preferire esclusivamente in corrispondenza di un certo grado di variabilità, abbiamo studiato il funzionamento di un sistema produttivo analogo, ma nel quale fossero assenti le tre cause di variabilità appena elencate. Questo sistema è più assimilabile al “Pure Flow Shop”.

Per effettuare tutte le simulazioni sono stati utilizzati tre software: Rockwell Arena, per quanto riguarda la simulazione del sistema produttivo; Microsoft Office Excel, per quanto riguarda l'applicazione delle tecniche di Order Review and Release; IBM Ilog CPLEX, per quanto riguarda la ricerca della soluzione di bilanciamento ottimale. Le simulazioni di Order Release basate sulla limitazione del carico hanno impiegato esclusivamente i primi due software, mentre per simulare un Order Release basato sul bilanciamento ci si è affidati a tutti i tre software citati. Il sistema produttivo sopra descritto è quindi stato modellizzato secondo opportune modalità, che sono presentate nelle sezioni di appendice. L'intero lavoro di sola simulazione (escluse quindi le fasi di settaggio) ha richiesto circa 3000 ore di simulazione utilizzando 10 pc.

I risultati ottenuti hanno confermato le aspettative: il rilascio degli ordini orientato al bilanciamento del carico a sistema permette di ottenere prestazioni migliori rispetto al rilascio focalizzato sulla limitazione superiore del carico. Un maggiore bilanciamento del carico sulle stazioni permette infatti di ottenere, a parità di Shop Floor Time (e quindi, per la curva logistica, a parità di Work-In-Process) un maggiore output medio (ovvero una maggiore Throughput Rate) e dunque un minore tempo di attraversamento del sistema (o Gross Throughput Time). Questo, associato alla capacità da parte del bilanciamento di carico di avere un orizzonte di medio termine, permette di ridurre significativamente sia la percentuale di ordini consegnati in ritardo, sia l'entità media del ritardo stesso. Con il bilanciamento è dunque possibile, ribaltando la prospettiva, ottenere comparabili prestazioni di Gross Throughput Time ed output medio, ottime prestazioni di puntualità, pur contenendo il WIP presente nel sistema produttivo e dunque l'entità dei costi e degli svantaggi ad esso collegati.

Per quanto riguarda la dimensione della Pipeline, ovvero il carico totale mantenuto a sistema dalla fase di Order Entry, il suo incremento da 130000 a 210000 comporta un miglioramento ancora più pronunciato delle prestazioni del bilanciamento di carico rispetto alla limitazione di carico. Questo è probabilmente dovuto alla possibilità, da parte del bilanciamento, di disporre di un maggior numero di ordini in Pre Shop Pool fra i quali selezionare quelli che meglio bilanciano il carico.

Il bilanciamento risulta preferibile anche nel caso in cui le code del sistema regolato tramite limitazione del carico siano gestite secondo modalità EDD (Earliest Due Dates, cioè i primi ad

essere serviti sono gli ordini più urgenti); Questa particolare configurazione è stata testata solo per un basso livello di variabilità ai fini di mostrare le potenzialità del bilanciamento per eventuali sviluppi futuri.

Si è inoltre dimostrato come sia possibile ottenere ottime performance in termini di Timing a parità di Output riducendo le dimensioni della Pipeline dei punti di funzionamento individuati, ma mantenendo relativamente ampie le tempistiche richieste dal cliente. In questo modo si garantisce maggior spazio al modello di bilanciamento dei carichi di lavoro ed è possibile ridurre molto il Gross Throughput Time (circa del 20% nei punti individuati) ed ottenere in molte configurazioni un azzeramento dei ritardi percentuali. Questa parte finale del lavoro di tesi è rivolta all'individuazione di linee guida per i gestori dei sistemi produttivi presi in esame, in modo che siano ben chiari ed evidenti i vantaggi derivanti dall'implementazione di un modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.

Successive ricerche possono infine essere effettuate per valutare l'effetto di una più accurata determinazione delle date di consegna, che tenga maggiormente conto della diversità dei job; l'effetto di una più accurata determinazione dei tempi di attraversamento previsti, utili per ridurre ulteriormente il numero di ritardi nel caso di bilanciamento del carico; l'effetto di modifiche alla funzione obiettivo da minimizzare, ancora nel caso del bilanciamento, che possa soppesare in maniera differenziata gli scostamenti superiori e gli scostamenti inferiori o che possa considerare l'urgenza dei job come un valore discreto o continuo e non solo binario.

English Abstract

During the last years the competitive pressure on the markets has significantly increased and also companies have become more careful on achieving better performances than competitors do. The sake for a better competitive position on the market is the main concern of an always increasing number of companies. Moreover, productivity of the labour work has become more stressing since market bounds have fallen and the exchanges from different markets are easier than in the past. This stress interested not only high-volumes and standardized sectors, but also companies operating on no-repetitive productions. They used to exploit their capability and flexibility to win on the market and from competitors, so they have to review their strategies in order to better match market requirements. During the last years reducing costs became a central issue also for no-repetitive companies.

Management and organizational lever plays an important role in the purpose of reducing costs. In no-repetitive companies several papers have shown that a correct scheduling and management of activities allows achieving brilliant results in term of cost cutting, throughput time decreasing and Work In Process reducing.

Several authors have investigated on this issue: (Bechte, 1988), (Land, et al., 1996), (Oosterman, et al., 2000), (Stevenson, et al., 2005), (Hendry, et al., 1998), (Perona & Portioli, 1998), (Bergamaschi, et al., 1997), (Philipoom & Malhotra, 1993); their purpose was to respond to new market requirements. They mainly investigated on Production Planning & Control (PP&C), since they found a strong lever in it to achieve desired performances; in particular Workload Control (WLC) issue attracted a large part of their interest. WLC techniques have been proposed for the first time by Bechte in 1988; by scheduling production employing these techniques, Bechte 1988 shows the positive effects that can be achieved in a real life application, in the Make To Order sector. Bergamaschi et al 1997 show how WLC techniques compose a sophisticated method of Order Review and Release phase, that play a fundamental role in PP&C.

Although WLC has been widely investigated, it has been mainly associated to job shop configurations. However job shop is not easily retrievable in real life factories (Oosterman et al 2000); in fact it is usual to recognize a predominant stream within the production flow, which is in effect followed by the major part of jobs. On the other hand is quite hard to find a production system where all work stations have been passed in random order by the jobs; it is common to

recognize some machines or work stations that mainly serve as “gate stations” while other serve as “ending stations”. Between the different production flows is normally clear which is the main flow, where secondary flows go into. On the basis of these findings and on the basis of what stated by Oosterman et al 2000 is possible to define “Flow Shop” as the configuration the most retrievable in real life. Flow Shop may be very rigid and ordered, so being named “Pure Flow Shop”, or be containing partially directed flows, so being named “General Flow Shop”. A flow shop is still more common in a lean context: making more linear flows, eliminating reworking and re entrant flows, avoiding flow interruptions are just a few of the guidelines which factories are aiming for to pursue the lean philosophy are inspired by.

Another class of production systems has been defined Two Stage Assembly Shop; this configuration has been quite disregarded in literature, compared to WLC. However a large part of real companies, operating both in the manufacturing field and in the service, are well modelled by this class of production systems. In fact in a typical production system it is possible to recognize two stages that have to be passed in order to realize the finished product: the former stage is the “manufacturing stage”, while the next one is the “assembly stage”. At the first stage the components of the finished product are produced (or bought); at the second stage the components are assembled and the last operations performed in order to complete the finished product. The most known example of that production system, presented for the first time by Lee 1993, concern the system which realize an engine: the main component of it are the body, the chassis and the engine. The first two of them are internally made, while the third is externally provided; when all of the components are available the assembly can be performed and the product can be finished. A peculiarity of this production system is that component can be made at the same time, since each component has dedicated resources; that leads to a system that is configured with several parallels manufacturing lines that join into a single assembly line. Two-Stages Assembly Shops can be retrieved in several sectors where both manufacturing and services companies work. An example of that production method is the production of an airplane: to produce an airplane you need to assemble several components characterized by high complexity and high specific for the customer. For instance jet engines, while being just a component of the finished product (i.e. the airplane), require complex and great added value operations; furniture is instead high specific for the customer, who normally asks for customized furniture. Through an easy tuning of hypothesis and parameters is also possible to employ this model in the services field: we already clarified that is not relevant what stations actually makes, while it is relevant how long it takes. With a simple processes mapping in a service company is possible to notice that the configuration above is perfectly able to

model it. A financing issue, a medical service, as well as a car reparation are just some of the services that, in order to be offered, need that the file is first elaborated in the several and separate offices, working all at the same time, and then finished in the final part of the process where a single team/person perform all the activities.

For these reasons it should be interesting to investigate that kind of configurations, since they seem to be much more frequent than job shops.

Research on TSASs aims to minimize following measures: makespan (waiting time of inventory located before the assembly stage); lateness (the number of orders delivered in late); tardiness (the mean value of the delay). To reach these performances several authors propose techniques that are referable to two main methods: the first method consists of the development of much sophisticated systems, associated to heuristic procedures and dispatching rules (between the main authors: Fry, Philipoom, Huang); the second one, more widespread, consists of making ad-hoc theorems that enable to solve the complex problem through a branch-and-bound approach (between the main authors: Lee 1993, Potts 1995).

Solving procedures proposed until now, referring to TSASs, have two main disadvantages: first, they require a much more high computing power and much more time to be solved, compared to WLC; on the other side, but no less important, they have a fairly scarce robustness to the variability, so common in real life. In fact, usually all internal variables (for instance work times) and external variables (for instance demand mix) are assumed as deterministic. At the happening of an incident, the solutions already found by heuristics methods probably will significantly worsen their goodness and will make the system much less efficient. On the contrary, solutions found by WLC techniques have been proved to be more robust; however research on TSASs is still scarce.

Since the research already made about applicability of WLC techniques to a TSAS is such scarce and TSAS such widespread in the real life, we thought to deepen the study on that issue. This study aims to improve the knowledge on the applicability of WLC techniques and at the same time to provide a more efficient method to manage TSAS than those now implemented.

We decided to consider two approaches to WLC: the workload bounding and the workload balancing. We searched answer to those questions:

Question #1:

Which ORR technique, between workload bounding and workload balancing, does perform better in a variability increasing context?

Question #2:

How the already found solutions are robust to a change in the pipeline size, that is to a change of the total of Work In Process in the whole system, being the pipeline size independent from the order release policy?

Question #3:

Does the robustness of found solutions allow maintaining a high output rate while decreasing the size of the pipeline?

To answer the first question has been performed a simulation where the two order release techniques have been tested in systems with different levels of variability; have been measured the performances the most important for the sake of the success of a company. Have been so studied the results achieved by the two techniques in terms of: Gross Throughput Time, percentage of orders delivered in late, mean value of the delay; the Work In Process level has been varied for the several trials, in order to understand the behaviour of the two techniques and knowing that WIP is a cost and then it should be kept at the lowest level it is possible. To answer the second question the size of the pipeline has been varied. Two different sizes of the pipeline have been simulated (130000 and 210000 minutes of work time contained in the production system and in the Pre Shop Pool) and also two different levels of variability (“high” and “low”). In the end, to answer the third question have been analyzed two more sizes of the pipeline (105000 and 170000 minutes) while the delivery lead times have been kept at the same size of the bigger pipeline.

The production system is structured in two distinct stages: the former is made of three parallel manufacturing lines; the latter is made of one single assembly line; each finished product (there is a finished product per each order or job) can be made of one, two or three components, which are assembled on the assembly line, that is employed also to finish the product. Each line – both manufacturing and assembly – is made of five consecutive stations; each station is passed by a certain percentage of the total of orders: in fact, some orders do not require some operations (variable routing). Before the last station of the first manufacturing line and before the last station of the assembly line is located a quality control station. With a defined probability, quality control

finds defective products that need a rework on some of the four previous stations; defective products are included in the queue standing before the first station they need to be reworked by; then they can proceed in the production system without be checked again.

The so designed system presents a high degree of variability, based on the following conditions: the routing is variable, then the number of the stations which jobs pass through is variable, although the production flow has a predominant direction; the number of components that each product requires is variable; the quality control step force some jobs to be reworked, so doing stopping the regular and uniform flow of the production. That system has been defined in literature “General Flow Shop”. To evaluate the impact of the variability on found solutions and understand whether an order release policy is to be preferred just in correspondence of a certain degree of variability, we studied the behaviour of a comparable production system, but where the three reasons of variability are absent. That system is more similar to “Pure Flow Shop”.

To perform the simulations we used three softwares: Rockwell Arena, to simulate the production system; Microsoft Office Excel, to implement the Order Review and Release techniques; IBM Ilog CPLEX, to find the best balancing solution per each day simulated. Simulations on workload bounding required only the first two of the softwares, while to test the workload balancing policy all of these softwares have been used. The production system has been modeled thanks to some criterions that are described in the appendix. The whole simulation work needed about 3000 hours, 10 PCs and a big amount of hours spent for the tuning.

Results confirmed expectations: an order release oriented to workload balancing allows achieving better performances than those achievable with a workload bounding policy. A more balanced workload allows to achieve, with the same Shop Floor Time (and so, for the logistic curve, with the same WIP), a higher Throughput Rate and then a shorter Gross Throughput Time. That allows to significantly reduce the percentage of late orders, as well as the mean conditional tardiness. At the same way is possible to achieve comparable length of Gross Throughput Time, Throughput Rate and tardiness while reducing the amount of WIP and related costs and disadvantages.

The increase of the size of the pipeline, from 130000 to 210000 minutes, shows a still better performing of the workload balancing compare to workload bounding. This is probably due to the capability of the balancing, to work better since it has a wider set of orders to choose between, in order to better balance the workload.

Workload balancing performs better also in the case of workload bounding has a priority policy of EDD (Earliest Due Date) to manage queues; this particular configuration has been tested only for a low degree of variability in order to show the chances of workload balancing for further developments.

It has also been demonstrated that is possible to achieve excellent timing performances, with the same Throughput Rate, just reducing the size of the pipeline in the best working points found, while keeping sufficiently large the lead times required by the customer. In that way the balancing model is able to better balance the workload and is possible to decrease Gross Throughput Time (20% less in the best working points) and achieve for the most of the configurations zero late orders. This final part of the work aims to define some guidelines for production managers, in order to clarify which the advantages are deriving from the implementation of a policy of workload balancing.

Further researches can be done to evaluate the effect of a more accurate due date assignment, based on jobs' characteristics; the effect of a more accurate assignment of throughput lead times, useful to reduce the percentage of late orders; the effect of adjustments to the objective function of the balancing model, that is able to differently weight upper and lower gaps or that is able to consider the jobs' priority as a discrete or continuous value and not only Boolean.

Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito ad un significativo incremento della pressione competitiva sui mercati insieme ad una sempre crescente attenzione, da parte delle aziende, alla realizzazione di prestazioni superiori a quelle dei concorrenti stessi. La ricerca di una maggiore competitività sul mercato è la principale preoccupazione di un numero sempre crescente di aziende. Nello specifico poi, il fattore legato alla produttività del lavoro è diventato sempre più pressante negli ultimi anni per via della riduzione delle barriere di mercato. Tale pressione alla produttività del lavoro, non solo ha coinvolto i settori con maggiori volumi e standardizzazione: ha pure colpito le aziende che operano su produzioni non ripetitive. Queste ultime hanno sempre potuto infatti sfruttare la loro capacità di customizzazione e la loro flessibilità per vincere sul mercato e ora si trovano quindi a dover rivedere le loro strategie per potersi meglio allineare con le richieste del mercato e con la competizione. Negli ultimi anni anche nelle aziende che operano su commessa stanno diventando sempre più centrali i temi legati alla riduzione dei costi.

Nella crescente pressione alla riduzione dei costi un ruolo fondamentale è giocato dalla leva gestionale e organizzativa, cioè a quella legata alla migliore gestione delle attività.

Il principale strumento utilizzato dalle aziende ripetitive negli ultimi anni è la Lean Manufacturing, focalizzata sulla riduzione degli sprechi e su una diversa gestione della produzione al fine di migliorare le prestazioni operative dell'azienda (Womack e Jones 1996). La maggior parte della letteratura in merito si riferisce però ad aziende Make To Stock o Assemble To Order dove la ripetitività dei prodotti è consolidata.

Il contesto italiano invece è caratterizzato da una miriade di aziende operanti in contesto Make to Order di medie-piccole dimensioni, che competono cercando di adattarsi alle richieste del cliente nel miglior modo possibile. Anche per queste imprese, oggetto di tesi, la forte competitività di mercato ha comportato un interesse sempre maggiore verso la riduzione dei costi, esplorando in particolare la possibilità di estendere i principi lean (Tantardini e Portioli 2008).

L'approccio Lean suggerisce la linearizzazione del flusso eliminando i riciccoli (Rother e Shook 1998) dedicando le risorse produttive a famiglie di prodotti. Questo comporta (Womack & Jones., 1996) per le aziende che applicano la Lean Manufacturing una configurazione del sistema produttivo come un Flow Shop (Oosterman et al 2000).

Le imprese Make To Order hanno caratteristiche specifiche che le contraddistinguono dalle aziende ripetitive, come colli di bottiglia variabili sulle risorse produttive, tempi di ciclo variabili, una domanda molto instabile e di difficile prevedibilità, prodotti fortemente personalizzati/unic, costruiti su disegno per i clienti. Queste peculiarità causano delle difficoltà produttive, soprattutto in termini di rispetto delle date di consegna e di creazione di un carico di lavoro livellato sulle differenti risorse produttive (White and Pributock, 2001). Queste problematiche evidenziate mostrano la possibilità di applicazione della Lean manufacturing in tale settore. In particolare, la focalizzazione sul bilanciamento dei carichi di lavoro rilasciati su ciascuna stazione permette di mantenere un WIP equamente distribuito tra i centri di lavoro dell'impianto, riducendo il tempo di inattività delle risorse e migliorando la prevedibilità dei tempi di attraversamento (Land & Gaalman, 1996).

Questo lavoro di tesi studia l'applicabilità di modelli di bilanciamento dei carichi di lavoro in contesto Make To Order per sistemi produttivi configurati come Two Stage Assembly Shop. Tale configurazione corrisponde ad un sistema produttivo avente una fase di fabbricazione a monte con n linee parallele convergenti in un'unica linea di assemblaggio finale. Tale modalità produttiva molto comune nel contesto analizzato (Kolish 2000) consente una facile generalizzazione anche verso altri contesti come l'ambito dei servizi o le supply chain. L'erogazione di un mutuo o di una pratica assicurativa, così come una filiera sono facilmente confrontabili con un simile sistema produttivo.

In particolare verranno analizzate le performance di un modello di limitazione dei carichi di lavoro e di un modello di bilanciamento del flusso, verificandone la robustezza con differenti livelli di variabilità del routing, con la presenza di difettosità nella produzione, con dei tempi stimati di lavorazione differenti da quelli effettivamente impiegati e con diversi livelli di carico di sistema. Queste valutazioni vengono svolte per cercare di ricreare un ambito di applicazione estremamente variabile come il Make To Order.

Nei prossimi capitoli verranno presentate nel dettaglio le problematiche del contesto Make To Order, successivamente saranno analizzati i Two Stage Assembly Systems dal punto di vista della letteratura, con le configurazioni analizzate e le metodologie di risoluzione implementate. Il successivo filone di letteratura analizzato riguarda l'approccio Workload Control, con le tecniche di Order Review & Release analizzate. In seguito verranno presentate le domande di ricerca su cui si è basato il lavoro di ricerca e verrà analizzato il sistema produttivo modellizzato mostrandone i diversi livelli di variabilità studiati e le due differenti tecniche di Order review & Release applicate.

Si elencheranno poi le simulazioni effettuate con i parametri utilizzati ed infine si analizzeranno i risultati ottenuti traendo le conclusioni in modo da rispondere alle domande di ricerca.

Capitolo 1: L'analisi del contesto Make to Order.

In questa prima parte presentiamo una classificazione dei sistemi produttivi analizzati secondo una delle principali modalità: Wortmann. Si pone poi una rappresentazione del contesto MTO andando a sviluppare le problematiche, le caratteristiche principali e le evoluzioni in atto nel settore con riferimento alla lean production

Capitolo 1 L'analisi del contesto Make To Order

1 Analisi del contesto Make To Order

Wortmann 1983 effettua una classificazione basata principalmente su due dimensioni ed andando ad identificare cinque modalità produttive: Make to Stock, Assembly to Order, Make to order, Purchase to Order, Engineer to Order.

Ciò che caratterizza le modalità produttive nella classificazione di Wortmann è il livello del processo produttivo a cui è possibile ritrovare il “punto di disaccoppiamento”. Il punto di disaccoppiamento è il livello del processo produttivo a cui la produzione smette di essere effettuata su previsione (e dunque in logica push) ed incomincia ad essere fatta su richiesta del cliente (logica pull). Il punto di disaccoppiamento è anche definito come Order Penetration Point, secondo un'accezione maggiormente orientata al mercato. Se infatti il punto di disaccoppiamento sembra riferirsi principalmente ad una logica produttiva, la parola Order Penetration Point chiarisce che il disaccoppiamento è effettuato ad un livello determinato dal tipo di ordine stesso; come vedremo meglio anche più avanti, è la variabilità dell'ordine a determinare un OPP (e quindi un punto di disaccoppiamento) più o meno elevato.

La classificazione di Wortmann include tutti i sistemi produttivi entro due configurazioni estreme: Make to Stock ad un estremo, caratterizzata da un disaccoppiamento molto ritardato, ed Engineer to Order all'estremo opposto, il quale produce interamente su ordinazione ed è quindi perfettamente accoppiato con il mercato. Se da un lato avere disaccoppiamento a valle consente tempi di risposta più brevi, la flessibilità di prodotto non sarà elevata ed i costi di mantenimento a scorta saranno relativamente superiori, sia per la quantità di prodotto mantenuta a scorta, sia per la qualità del prodotto stesso che, se immagazzinato ad uno stadio più avanzato di realizzazione, incorpora una maggior quantità di lavoro e dunque valore.

Nella figura seguente è schematizzata la classificazione di Wortmann, con indicate le varie fasi in cui si suddivide la produzione di un bene dalla progettazione, approvvigionamento, fabbricazione, assemblaggio e spedizione.

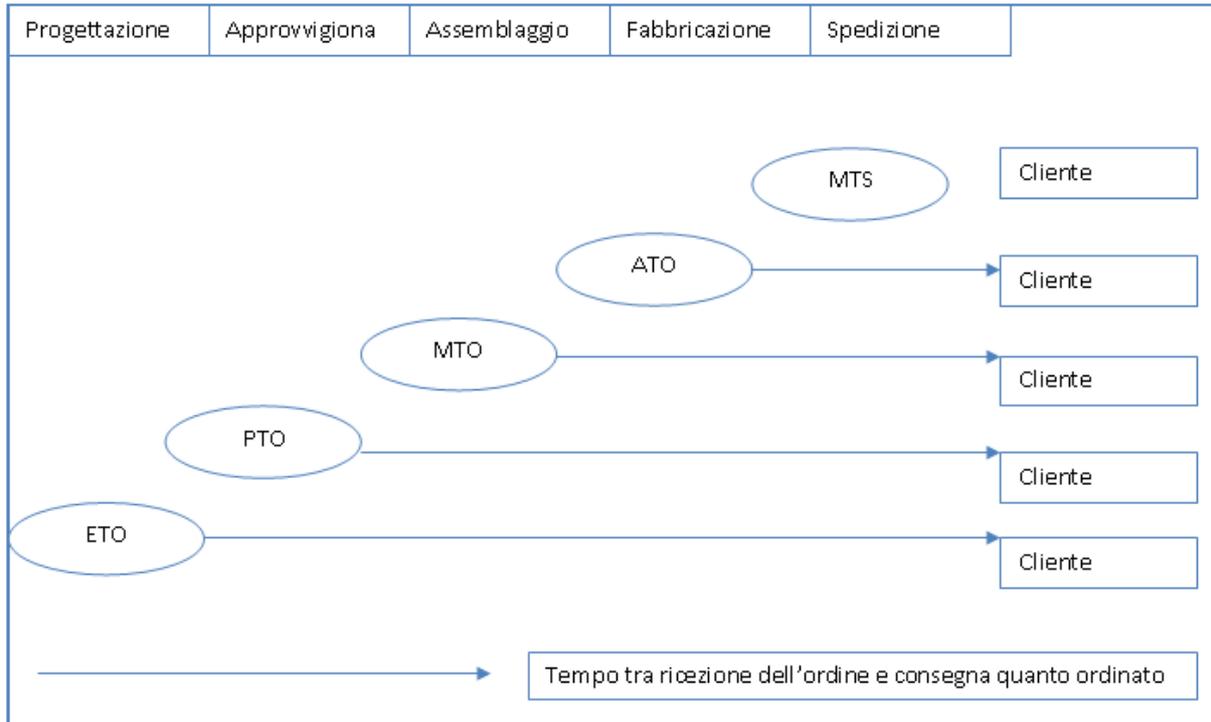


Figura 1 Lo schema di Wortmann

Viene ora presentata una breve descrizione delle modalità appena elencate:

Make to Stock: letteralmente produzione per scorta, è una modalità che consente di servire un mercato caratterizzato dalla necessità di soddisfare gli ordini garantendo un lead time (considerato come il tempo che intercorre fra la conferma dell'ordine da parte del cliente e la ricezione della merce) uguale o di poco superiore al tempo necessario alla spedizione. La produzione avviene dunque su previsione della domanda futura, i prodotti sono standardizzati e presentano bassa varietà. La domanda finale è ragionevolmente prevedibile. Mercati di questo tipo sono, ad esempio, quelli dei detersivi, prodotti per la casa, bevande artificiali, ma anche elettronica di consumo, solo per citare alcuni settori. L'impresa che si trova ad operare in modalità MTS si trova a fronteggiare quotidianamente la sfida di raggiungere il compromesso che le permette contemporaneamente di non elevare troppo i costi di mantenimento a scorta, né di trovarsi nella condizione di non poter soddisfare la domanda; anche la mancata soddisfazione della domanda infatti comporta dei costi, che sono rappresentati dai mancati ricavi innanzitutto, ma anche da quelli collegati alla percezione da parte del cliente di un cattivo servizio erogato (perdita del cliente, cattiva pubblicità).

Assembly to Order: si fa ricorso a questa modalità produttiva nel caso in cui la gamma di varianti di un prodotto sia tanto ampia da procurare un aumento difficilmente controllabile del magazzino di prodotti finiti. L'Assembly To Order diventa conveniente nel caso in cui il mercato richieda comunque tempi di consegna relativamente brevi e dunque la necessità di portare la produzione di tipo push (cioè su previsione) più a monte possibile per ridurre i lead time. Il punto di disaccoppiamento è posto a monte della fase di assemblaggio: i componenti standardizzati sono prodotti su previsione mentre l'assemblaggio del prodotto finito attende il manifestarsi della domanda e dunque la ricezione dell'ordine. Rispetto alla modalità MTS, l'ATO è caratterizzata da superiori tempi di consegna (quelli misurati dal cliente) a fronte di una gamma di prodotti più ampia, che significa maggiori possibilità di personalizzazione per il cliente. L'ATO può essere ritrovato come modalità produttiva predominante in mercati come per esempio quello degli arredamenti da cucina: una "cucina" è realizzata mediante l'impiego di componenti standardizzati, ma può assumere molte configurazioni finali.

Make to Order: è impiegato nei contesti in cui il cliente è disposto a tollerare un elevato tempo di consegna perché l'intero mercato è così vario che neppure le componenti del prodotto finito sono sufficientemente simili da poter essere realizzate su previsione. Il punto di disaccoppiamento è posto a monte della fabbricazione, per cui si mantengono a scorta solamente le materie prime. Sulle particolarità e caratteristiche del MTO si discuterà più approfonditamente in seguito, vista la sua rilevanza per la nostra ricerca.

Purchase to Order: in questo caso non solo i lead time concessi sono elevati e la standardizzazione del prodotto è bassa, ma le scorte di materie prime sono costose e non rendono conveniente il loro acquisto su previsione in quanto il loro mancato utilizzo comporterebbe costi troppo elevati. Oltre a un fattore di costo, tale scelta può essere motivata dal fatto che i materiali componenti il prodotto variano di volta in volta senza possibilità di previsione, per esempio parlando di leghe di acciaio l'azienda non può sapere in anticipo con quali leghe i suoi clienti progetteranno i loro prodotti.

Engineer to Order: nei sistemi analizzati fino ad ora la fase di progettazione e ingegnerizzazione era effettuata dal cliente, che poi consegnava i propri progetti al produttore. In questa modalità invece il cliente si limita ad elencare delle caratteristiche o specifiche del prodotto in questione mentre l'azienda si occupa di tutto, dalla progettazione alla ingegnerizzazione. E' il caso dei cantieri navali, delle società di ingegneria per esempio operanti nell'ambito dell'estrazione petrolio che progettano e producono piattaforme per i clienti. Qui il punto di disaccoppiamento è del tutto assente, l'azienda che opera secondo questa modalità produttiva deve esclusivamente preoccuparsi

di avere le capacità e le competenze necessarie ai progetti che dovrà seguire. Si può affermare che su previsione si sviluppano solamente le competenze delle risorse umane.

All'interno di questa ricerca sarà indagato il contesto delle imprese che si trovano, per le caratteristiche del mercato che servono, a dover rispondere alla domanda in modalità Make To Order o Engineer To Order. Il mercato che richiede una produzione "su commessa" è un mercato caratterizzato da alta variabilità: le commesse non sono ripetitive e ciò significa che ogni job differisce da ogni altro in quanto la personalizzazione richiesta dal mercato è molto alta.

Nel contesto MTO ed ETO la capacità da parte dell'azienda di implementare corrette logiche gestionali permette di disporre di un significativo vantaggio competitivo nei confronti dei concorrenti, come sarà esplicitato nuovamente nei prossimi paragrafi.

1.1 Caratteristiche aziende MTO

(Stevenson, et al., 2005) e (Amaro, et al., 1999) presentano una tassonomia per le aziende non MTS basata sul livello di personalizzazione di prodotto e sull'OPP (Order Penetration Point), classificando le aziende MTO come aziende nelle quali la produzione non avviene finché non si presenta e viene confermato un ordine da parte del cliente. Proseguendo nella loro trattazione identificano le principali caratteristiche del settore Make to Order:

1. **OPP posto molto a monte**, questo punto indica un disaccoppiamento di sistema, separa la parte a monte che lavora su previsione (Push) da quella a valle tirata dal cliente (Pull).
2. **Personalizzazione**. In (Kingsman, 2000) è possibile trovare una suddivisione delle aziende operanti in modalità MTO entro due categorie: Repeat Business Customiser e Versatile Manufacturing Companies. La principale differenza consiste nella ripetitività delle commesse. Sebbene in entrambi i casi ad ogni cliente sia associato un prodotto particolarmente personalizzato, esiste una diversa ripetitività delle commesse che contraddistingue una categoria dall'altra. In particolare le RBCs producono prodotti personalizzati sulle esigenze di ogni cliente, ognuno dei quali però effettua ordini che si ripetono nel tempo, salvo alcune piccole variazioni di specifiche rispetto al prodotto base definito in occasione del primo ordine. La base dei clienti è quindi ristretta ed è fondamentale per l'azienda aggiudicarsi la prima commessa, potendo poi contare sulla

ripetitività della stessa per un ragionevole lasso di tempo futuro. Le VMCs invece ricevono commesse non ripetitive da una base di clienti più ampia; la VMC dunque compete sul mercato per aggiudicarsi ogni singola commessa e non solo il primo ordine di un cliente. La varietà dei prodotti offerti è superiore rispetto alle RBCs e non permette in alcun caso una produzione anticipata; questa produzione anticipata è invece alcune volte possibile per le RBCs, una volta che si siano aggiudicate le commesse iniziali. Schematizzando il concetto si riporta su un grafico orientato la varietà e i volumi produttivi, andando a identificare il contesto di pertinenza di RBC, VMC in relazione al MTS. Nell'ambito di questa classificazione, il nostro campo di indagine è quello occupato dalla seconda categoria di aziende, cioè le Versatile Manufacturing Companies, essendo le loro problematiche strettamente legate all'alta variabilità dei prodotti che sono domandati dal mercato e dunque all'alta variabilità delle lavorazioni stesse che devono essere eseguite.

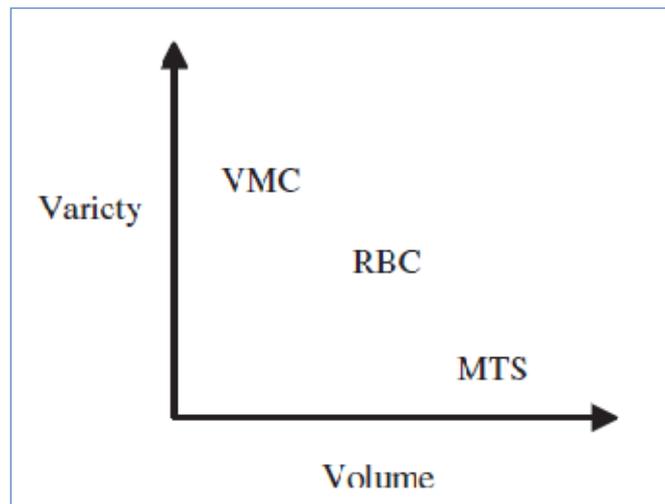


Figura 2 La rappresentazione delle diverse modalità produttive

- 3. Configurazione dello Shop Floor.** La classificazione dello Shop Floor che viene qui considerata è descritta in (Oosterman, et al., 2000) e rientra nel paragrafo dedicato alla classificazione delle “shop configurations”. L'autore presenta una tabella con due dimensioni: la lunghezza del routing dei job (lunghezza variabile o costante) e la presenza di una direzione di flusso predominante sulle altre (presente o non presente). Il risultato sono quattro possibili configurazioni che vedono il flusso diventare sempre più ordinato; in ordine

decescente di variabilità (di lunghezza e verso): Pure Job Shop, Restricted Job Shop, General Flow Shop, Pure Flow Shop. Si individuano quindi le seguenti categorie, caratterizzate da differente flusso e routing:

	Lunghezza Routing variabile	Lunghezza Routing costante
Flussi non direzionati	Pure Job Shop	Restricted Job Shop
Flussi direzionati	General Flow Shop	Pure Flow Shop

Figura 3 Le differenti configurazioni dello Shop Floor

Sebbene in letteratura siano stati considerati prevalentemente i Pure Job Shop, è stato verificato che nella pratica questa configurazione è estremamente rara; molto più frequenti sono le configurazioni intermedie dove ad essere casuale è il verso, ma non la lunghezza del routing oppure, soprattutto, è variabile la lunghezza del routing, ma non il suo verso. Enns 1995 mostra che il sistema più adeguato nella rappresentazione reale del contesto produttivo è il General Flow Shop, caratterizzato da una direzione del flusso e quindi un routing costante e da una lunghezza del routing stesso variabile. Ciò significa che nel sistema si individua un flusso predominante di stazioni che vengono visitate quasi da tutti i prodotti e nella stessa sequenza; a differenza del Pure Flow Shop, tuttavia, ogni pezzo non richiede l'attraversamento di un certo numero di stazioni. Tale sistema produttivo è molto simile al Flow Shop Puro, solo che essendo utilizzato in un contesto con alta variabilità presenta caratteristiche tipiche anche del Job Shop. La tendenza degli ultimi anni è quella di innovare i sistemi produttivi nella direzione individuata da Enns 1995 anche in quei casi in cui il Job Shop è sempre stata la configurazione più diffusa; la ragione è che la diffusione della filosofia lean sta progressivamente portando a linearizzare i flussi, a riconoscere i principali flussi produttivi ed a evitare il più possibile situazioni (come ricircoli e rilavorazioni) che portino ad interrompere il regolare scorrimento del flusso. Per queste ragioni è stato scelto di analizzare in questa ricerca le prestazioni di un sistema produttivo configurato come un General Flow Shop, ritenendo questa configurazione quella maggiormente rappresentativa delle configurazioni esistenti nella realtà manifatturiera.

4. **Dimensioni dell'azienda.** Solitamente quando si parla di aziende MTO ci si riferisce alle SMEs (Small Medium Size Enterprise) con fatturato compreso tra dieci e cinquanta milioni di euro ed un numero di impiegati che può variare tra i cinquanta e i duecentocinquanta.

5. **Forte importanza e criticità delle fasi di pianificazione e controllo della produzione.** Le leve decisionali più importanti per un'azienda MTO sono:

- a. Capacity Planning
- b. Accettare/Rifiutare Ordini (Order Entry)
- c. Stimare Due Dates molto accurate minimizzando l'errore previsionale

Sarà spiegato in seguito come sia necessario agire su queste leve per rispondere adeguatamente alle peculiarità del settore in esame.

1.2 Problematiche aziende MTO

Il contesto in cui le aziende MTO si trovano ad operare porta una forte imprevedibilità in termini di prestazioni nei confronti del mercato.

1.2.1 Determinazione delle due dates e del prezzo

Innanzitutto le aziende Make to Order, lavorando su commessa, hanno la necessità di dover determinare in anticipo le Due Dates di completamento dell'ordine e il relativo prezzo. Questo meccanismo è fondamentale in quanto le aziende competono tra di loro dal punto di vista dei lead times e dei costi per aggiudicarsi gli ordini dei clienti (Muda & Hendry 2002, Kingsman et al. 1996). Tobin 1988 mostra analizzando casi reali come la percentuale di ordini effettivamente evasi varia tra il 3% e il 100% teorico, proprio a causa di questo meccanismo di aste che coinvolge il settore MTO. Il settore MTO presenta dunque due categorie fondamentali di complessità: esogena ed endogena. La complessità esogena deriva dalla variabilità della domanda, in termini di quantità e soprattutto di qualità; la complessità endogena è una diretta conseguenza della precedente: la stima delle Due Dates e la fissazione del prezzo richiedono notevoli doti previsionali ed analitiche.

1.2.2 Lead time produttivo e puntualità

Nonostante le tempistiche concesse dal cliente siano molto più elevate in termini assoluti rispetto a quelle concesse alle aziende operanti nel settore Make to Stock il prodotto deve comunque essere lavorato a partire dalla materia prima secondo le specifiche dettate da cliente, con tutte le problematiche che a livello di sistema può provocare una tale modalità produttiva (Muda & Hendry 2002). La variabilità e varietà della domanda comporta la gestione di sistemi produttivi con lead times di attraversamento molto variabili, colli di bottiglia non facilmente identificabili al variare del mix produttivo, una necessità di bilanciamento dell'intero sistema per evitare eccessiva saturazione o insaturazione delle risorse. Si trovano inoltre notevoli difficoltà nella programmazione operativa, ovvero a fronte di un portafoglio ordini è necessario decidere quali ordini rilasciare e come sequenziarli in coda alle varie stazioni. Come conseguenza il WIP in questi sistemi è spesso elevato, causando dei tempi di coda molto più elevati rispetto ai tempi di lavorazione effettivi. Il WIP elevato comporta inoltre delle serie problematiche legate ai lead times di produzione che risultano estremamente variabili e difficilmente prevedibili.

1.2.3 Approvvigionamento delle materie prime

Un'altra problematica molto rilevante è data dalla fornitura; data l'imprevedibilità della domanda è difficile prevedere le materie prime necessarie e di conseguenza le aziende MTO hanno difficoltà nei rapporti con i fornitori e uno scarso controllo su di essi. Le aziende MTO si trovano così a dover bilanciare un difficile trade off fra mantenimento di elevate scorte di materie prime (con i relativi costi) e la disponibilità delle materie prime al momento in cui si manifesta la necessità; in questo caso i costi associati ad una "rottura di stock" sono imputabili al rischio di consegnare il prodotto in ritardo o all'aumento della complessità dovuto all'introduzione di ordini urgenti, non solo al fornitore, ma anche all'interno dello stesso sistema produttivo.

1.2.4 Competenze

A causa della configurazione produttiva utilizzata le competenze della manodopera devono essere necessariamente molto elevate. Appare evidente come un tecnico o operaio specializzato operante in un'azienda simile debba essere molto flessibile ed in grado di lavorare un gran numero di pezzi differenti garantendo comunque dei tempi di produzione affidabili e livelli qualitativi adeguati.

Riassumendo si possono individuare le seguenti criticità:

1. Elevato WIP all'interno del sistema produttivo
2. Colli di bottiglia variabili e difficilmente stimabili
3. Mix produttivo variabile
4. Routing dei job variabile
5. Difficoltà nella schedulazione e bilanciamento Shop Floor
6. Imprevedibilità della domanda che comporta difficoltà nella previsione per l'acquisto di materie prime
7. Necessità di acquisto di macchinari in grado di svolgere più operazioni; più flessibili e quindi più costosi
8. Necessità di prevedere con largo anticipo tempi e costi per formulare offerte profittevoli per l'azienda e competitive per il mercato
9. Alte competenze della manodopera, non sempre facilmente ottenibili

1.3 World class manufacturing companies

(Muda, & Hendry 2002) identificano quattordici principi che emergono dalla letteratura ed a cui le aziende MTO che vogliono competere con successo in un mercato globale dovrebbero fare riferimento. Tali principi nascono dall'osservazione del comportamento delle aziende leader del

mercato MTO e dalla conseguente definizione delle best practices legate al loro successo. Si riportano in figura 4 i principi, suddivisi per categoria.

Tali principi sono la base per ottenere la competitività necessaria alla sopravvivenza in questo settore, caratterizzato non più solo dalla richiesta di una forte personalizzazione di prodotto e flessibilità di realizzazione, ma ora anche di tempi di produzione ridotti, massima puntualità di consegna e costi sempre minori. Con la schematizzazione effettuata gli autori vanno a descrivere aspetti riguardanti tutte le aree critiche del Make to Order, ovvero la parte commerciale che si occupa dell'aggiudicazione delle commesse, la parte operativa, inerente allo Shop Floor, sua gestione e configurazione, le risorse umane, fondamentali in un settore che eccelle per capacità manifatturiere individuali ed infine tutte le azioni di miglioramento continuo che devono operare trasversalmente alle precedenti tre macro aree.

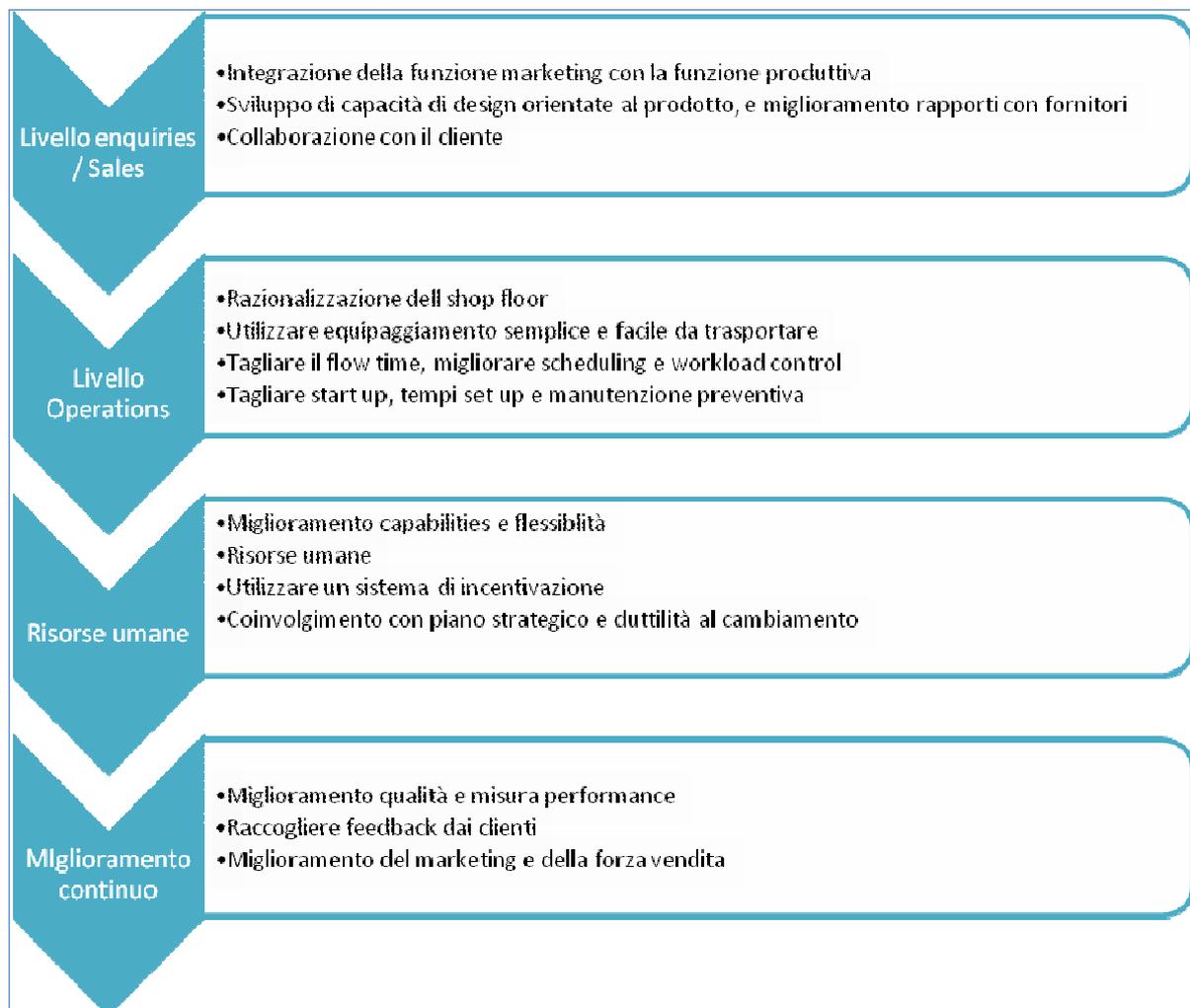


Figura 4 I principi MTO

Riassumendo, lo scopo di questi principi è rivolto a limitare le problematiche derivanti da:

1. **Lead Time produttivi.** Molti autori, tra cui (Stevenson, et al., 2005), dimostrano come la stima dei lead time rappresenti una problematica fondamentale per le aziende MTO, le quali si stanno trovando a fronteggiare una concorrenza interna sempre più agguerrita. Agendo tramite questi principi si riesce a limitare la variabilità dei tempi tramite sistemi di controllo della produzione più efficienti e risorse umane con competenze elevate.
2. **Costi produttivi.** L'efficienza deve essere continuamente ricercata, specialmente in sistemi produttivi che tendono a livelli elevati di WIP. Come spiegato in precedenza il requisito di costo, nonostante possa sembrare contro intuitivo in un mercato con forte differenziazione di prodotto, è fondamentale per contrastare la forte concorrenza.
3. **Flessibilità.** L'ultima leva su cui si agisce è la flessibilità, raggiungibile tramite investimenti in macchinari in grado di svolgere diverse operazioni, risorse umane competenti ed infine, ma non ultima, una ricerca della continua riduzione delle scorte, sia di materie prime che di prodotto finito.

1.4 Evoluzioni in atto nel settore MTO

Le aziende che si trovano a realizzare il prodotto in modalità MTO operano normalmente in un contesto molto competitivo, dove l'attenzione al rispetto dei tempi di consegna preventivati, alla riduzione dei tempi stessi ed al miglioramento continuo sono preponderanti. Nel mercato sono presenti alcune forze di cambiamento che sembrano avvicinare le aziende alla filosofia Lean, che finora era rimasta prerogativa di quelle imprese di grandi dimensioni che, grazie anche a discrete economie di scala, potevano meglio perseguire la migliore qualità al minor costo e nel minor tempo tramite l'applicazione dei principi Lean. La ragione è che il mercato è andato via via allargandosi e l'arena competitiva nella quale hanno fino a pochi anni fa operato esclusivamente imprese MTO di stampo occidentale ha cominciato a comprendere paesi quali Cina, India e Brasile, i quali hanno costi molto competitivi e, in conseguenza della fase di sviluppo che stanno vivendo, hanno cominciato ad avere le capacità necessarie a confrontarsi con le aziende appartenenti al mondo occidentale. Dunque queste aziende, non potendo fare affidamento su vantaggi di costo legati a ragioni politico-sociali e dovendo comunque offrire prodotti competitivi anche dal punto di vista del prezzo, hanno cominciato a riconoscere l'importanza di una corretta gestione delle risorse

produttive, scoprendo in essa la possibilità di maturare un vantaggio competitivo. La filosofia lean ha cominciato a farsi strada e ad essere riconosciuta come capace di generare un vero differenziale competitivo.

1.5 Lean e MTO

Le problematiche connesse al contesto MTO rendono in linea di principio molto difficoltoso l'utilizzo dell'approccio Lean. Riuscire a legare la produzione completamente al cliente è difficile in quanto il settore MTO richiede la realizzazione di prodotti sempre diversi caratterizzati da carichi nel sistema a loro volta sempre differenti. In letteratura si individuano cinque fattori che caratterizzano il MTO e che rendono difficoltosa l'implementazione della Lean Production:

1. Imprevedibilità della domanda
2. Alto contenuto di lavoro dei prodotti
3. Materiali e cicli di lavorazione e contenuti di lavoro differenti per ogni prodotto
4. Volumi poco stabili anche all'interno di una famiglia di prodotto
5. Varietà di prodotti molto ampia e quindi scarse possibilità di produzione a scorta

La gestione di un sistema pull, la linearizzazione del flusso e il livellamento della produzione e il bilanciamento del sistema tipici dei sistemi Lean sono chiaramente obiettivi molto ambiziosi in un contesto simile. (Portioli& Tantardini, 2008) individuano comunque questa tecnica come la strada che le aziende stanno maggiormente intraprendendo per essere competitive facendo fronte a una crescente complessità di mercato.

(Stevenson, et al., 2005) indica la tecnica del Workload Control come ideale per il raggiungimento di obiettivi in ottica Lean. Difatti ritiene poco utile un controllo della produzione basato su Kanban; al contrario l'approccio WLC permette di perseguire al meglio obiettivi come livellamento e bilanciamento della produzione. Oltre a questo i job sono rilasciati di modo da bilanciare il carico presente a sistema evitando la formazione di colli di bottiglia e garantendo alle stazioni un continuo rifornimento di job, evitando idle time e inattività.

Appare evidente come pur con metodi differenti le tecniche WLC che saranno trattate più approfonditamente in seguito consentano il raggiungimento di obiettivi tipici della Lean Production. Bilanciamento, livellamento, takt time, eliminazione degli sprechi intesi sia come tempo di inattività sia come livello di WIP sono raggiunti tramite il rilascio graduale e periodico di ordini detenuti in una Preshop Pool che ripara il sistema dalla variabilità esterna e permette una gestione più semplice dello Shop Floor. Il tutto porta a lead time più facilmente stimabili e meno variabili, consentendo alle aziende minori difficoltà nelle fasi di gara e nella stesura dei preventivi, garantendo così un forte vantaggio competitivo.

Sono queste le motivazioni che spingono i manager a cercare di rendere “ Lean “ le proprie aziende, individuando gli obiettivi di tale filosofia e perseguendoli mediante tecniche differenti da quelle che solitamente si associano alla Lean Production.

Esempi di queste prime applicazioni al campo MTO della filosofia della Lean Production possono essere ritrovati in (Lander & Liker, 2007), i quali effettuano una prima introduzione all'applicabilità dei principi Lean al contesto MTO, mentre (Bokhorst, et al., 2008) effettuano una ricerca sperimentale sull'applicabilità del principio del Takt Time ad un'impresa che produce bassi volumi, ma con alta variabilità di prodotto finito: l'azienda in questione produce piastrelle decorative. (Papadopoulou & Mousavi, 2008) indagano sull'applicabilità dei principi di push e pull ancora nel contesto delle imprese che operano per commesse non ripetitive ed infine (Slomp, et al., 2009) presentano un nuovo caso di studio di applicazione di metodologie Lean nel contesto MTO.

Analisi dei Two-stage assembly systems e dei modelli presenti in letteratura

In questa sezione viene introdotto il sistema produttivo analizzato classificandolo secondo gli schemi tipici presenti in letteratura. Viene in seguito proposta l'analisi della letteratura inerente la schedulazione in sistemi aventi una fase di fabbricazione e una di assemblaggio. Tali sistemi chiamati Two-stage assembly systems verranno descritti con maggior dettaglio, insieme alle procedure euristiche di risoluzione presenti in letteratura. Saranno infine analizzati i punti di forza e di debolezza dell'approccio individuato, motivando la scelta di utilizzare le tecniche di Workload Control per l'analisi del sistema oggetto di tesi.

Capitolo 2 Analisi dei Two – Stage Assembly Systems e dei modelli presenti in letteratura

2 La tipica struttura di un'azienda MTO

(Kolish 2000) Le aziende MTO molto spesso possiedono nella parte finale del loro sistema produttivo una linea o comunque un reparto di assemblaggio che permette l'ultimazione dell'ordine cliente. Solitamente gli ordini emessi dai clienti sono composti da più componenti, prodotti in azienda in linee di produzione parallele, che vengono poi assemblati nella parte finale. Non tutti i componenti inoltre sono prodotti internamente, la realizzazione di alcuni di essi viene affidata a terzi. In un sistema produttivo di questo tipo una buona schedulazione dei pezzi riveste importanza centrale: essa permette infatti, dove ben eseguita, di impiegare al meglio le risorse, in particolare quelle più limitate e preziose. La tendenza delle aziende operanti nel settore MTO è quella di svolgere internamente solo le attività a maggior valore aggiunto, relative alle componenti principali del prodotto e lasciare ai fornitori esterni il resto della produzione. Riassumendo quanto appena detto si presenta una schematizzazione della supply chain tipica del settore MTO.

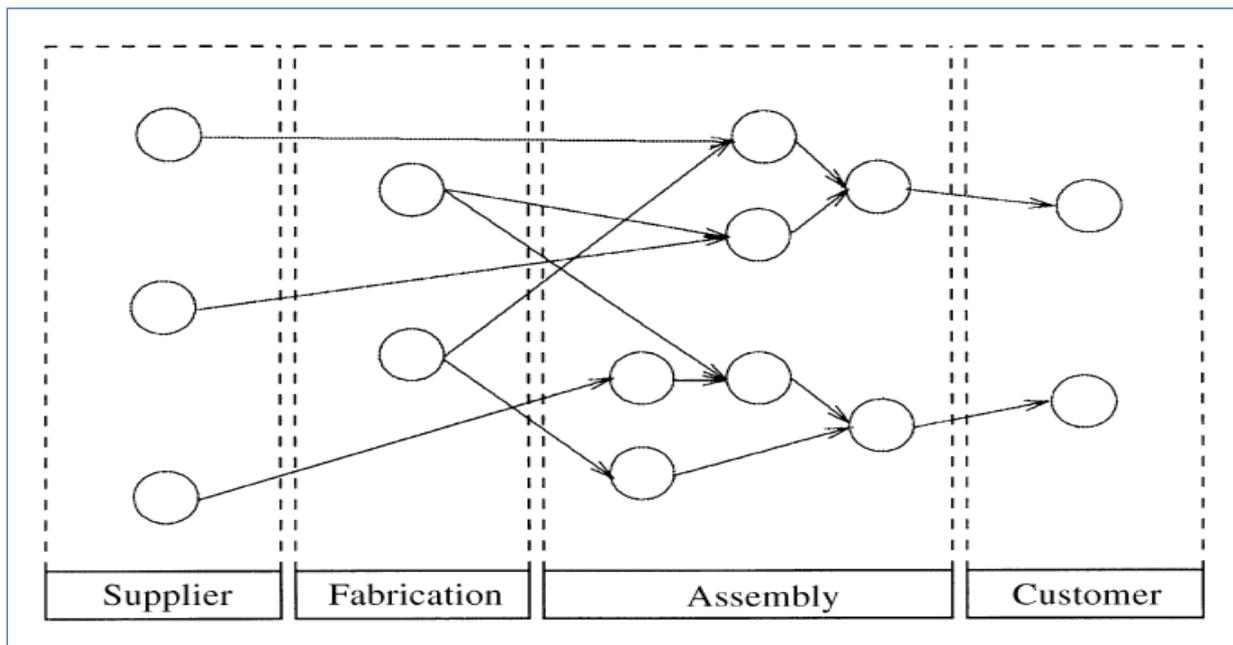


Figura 5 La tipica struttura di un'azienda MTO (Kolish 2000)

La schedulazione deve quindi tenere conto di differenti problematiche, come i tempi di set-up, le stazioni collo di bottiglia, il flusso contemporaneo di più sotto-assiemi diretti ad un unico punto del sistema, la necessità di riduzione del tempo di attraversamento, il rispetto delle Due Dates, il rilascio degli ordini in modo tale da garantire il completamento entro i tempi concordati con il cliente ecc...

Si tratta di una problematica più ampia della semplice schedulazione di un sistema di fabbricazione come può essere un job shop o un flow shop, in quanto non basta solamente fare in modo che i job rispettino la Due Dates, ma è necessario anche sincronizzare tutti i flussi di componenti di modo da ottimizzare le prestazioni di sistema. Per questo motivo è fondamentale stimare correttamente i tempi di attraversamento: le attenzioni dei ricercatori sono rivolte a modelli che riescano a prevedere al meglio i tempi, di modo da minimizzare una funzione obiettivo solitamente coincidente con il makespan (Lee, et al., 1993). Come sarà mostrato in seguito, tale problema si inserisce nell'ambito della schedulazione dei two stage assembly systems, ovvero sistemi produttivi caratterizzati da uno stadio a monte di fabbricazione componenti e uno a valle di assemblaggio. (Potts, et al., 1995) dimostra che la schedulazione di sistemi simili è fortemente NP-Hard e individua nello sviluppo di procedure euristiche la strada migliore per la risoluzione.

2.1 Il sistema produttivo analizzato

Cercando di rappresentare al meglio una configurazione molto frequente nelle aziende Make To Order si è scelto di analizzare un sistema produttivo comprendente le due fasi distinte di fabbricazione ed assemblaggio.

Il sistema produttivo scelto è formato da un certo numero di stazioni (che nel nostro caso è stato fissato pari a 20) le quali possono essere composte da singole macchine (con o senza operatore), da centri di lavoro (con o senza operatore), o da banchi di assemblaggio; ogni stazione dispone di un certo spazio nel quale si accumulano i pezzi in attesa di essere lavorati sulla stessa; indipendentemente dalle sue caratteristiche specifiche (cioè dalla qualità e quantità delle lavorazioni che esegue) ogni stazione è caratterizzata da un tempo medio di lavorazione soggetto ad una certa variabilità in funzione del job che deve essere lavorato.

Le stazioni sono organizzate a formare diverse linee produttive convergenti in una linea di assemblaggio; pertanto il sistema produttivo può essere considerato come composto da due stadi

differenti. Nel primo stadio sono prodotte le diverse componenti del job (nel nostro caso sono state fissate a 3), le quali sono assemblate e completate nel secondo stadio, che fornisce in uscita un job che, come abbiamo visto precedentemente, è associato ad un ordine e dunque ad un cliente. È quindi possibile considerare l'intero sistema produttivo come composto da diverse sub linee produttive più una sub linea di assemblaggio. Si è scelto di considerare la presenza di tre sub linee produttive che convergono in una sub linea di assemblaggio, pertanto in ciascuna sub linea sono presenti 5 stazioni.

I job che attraversano il sistema non necessariamente attraversano tutte le stazioni di ogni sub linea, né necessariamente richiedono tutte e tre le componenti (e quindi alcuni job non comportano carico di lavoro su alcune sub linee produttive).

Quest'ultima caratteristica in particolare rende il sistema produttivo molto versatile e lo rende applicabile ad un campo più vasto che quello puramente manifatturiero. Attraverso un semplice aggiustamento delle ipotesi e dei parametri è possibile applicare il presente modello al campo dei servizi; abbiamo già specificato che ciò che le stazioni fanno non è rilevante ai fini di questa ricerca, bensì è rilevante il tempo per cui la risorsa è impiegata. Con una semplice mappatura dei processi aziendali in un'impresa di servizi è poi possibile notare che la configurazione sopra descritta è perfettamente applicabile anche ad essa e non solo ad un'impresa manifatturiera. L'erogazione di un mutuo, l'offerta di una prestazione medica, così come la riparazione di un'automobile sono solo alcuni dei servizi che, per essere erogati, richiedono che ogni aspetto della pratica ad esso collegata sia elaborato nelle rispettive funzioni (che sono quindi le sub linee produttive) e possa poi essere trattata nella parte finale a livello aggregato (sub linea di assemblaggio).

2.1.1 Due possibilità di generalizzazione per il sistema produttivo analizzato

Si procede ora ad un inserimento del sistema produttivo analizzato nel quadro presente in letteratura, facendo in particolare riferimento a due possibilità di generalizzazione individuate che prendono il nome di General Flow Shop e Two Stage Assembly Shop.

La prima è descritta in (Oosterman et al 2000, Land, & Gaalman, 2000) e rientra nel paragrafo dedicato alla classificazione delle “shop configurations”. L'autore presenta una tabella con due dimensioni: la lunghezza del routing dei job (lunghezza variabile o costante) e la presenza di una direzione di flusso predominante sulle altre (presente o non presente). Il risultato sono quattro

possibili configurazioni che vedono il flusso diventare sempre più ordinato; in ordine decrescente di variabilità (di lunghezza e verso): Pure Job Shop, Restricted Job Shop, General Flow Shop, Pure Flow Shop.

Sebbene in letteratura siano stati considerati prevalentemente i Pure Job Shop, è stato verificato che nella pratica questa configurazione è estremamente rara; molto più frequenti sono le configurazioni intermedie dove ad essere casuale è il verso, ma non la lunghezza del routing oppure, soprattutto, è variabile la lunghezza del routing, ma non il suo verso. Si parla in tutti i casi di valori medi per l'insieme di job che attraversano il sistema.

Il nostro sistema produttivo di riferimento può essere assimilato al General Flow Shop in quanto il verso dei flussi è prestabilito (e.g. la stazione numero due sarà sempre attraversata, se appartenente al routing del job in esame, prima della stazione numero quattro), ma è possibile che un componente non attraversi tutte le stazioni di lavorazione appartenenti alla linea produttiva. I tempi di set up non sono dipendenti dalla sequenza e possono pertanto essere inclusi, ai fini della modellazione, nei tempi di lavorazione, dato che il contesto di mercato in esame non permette di effettuare lottizzazioni; ogni commessa è infatti raramente ripetuta nel breve-medio termine. Le stazioni sono disaccoppiate da scorte interoperazionali e sono dunque previste delle code di semilavorati in attesa a monte della stazione.

La generalizzazione appena descritta, tratta da (Oosterman, Land, & Gaalman, 2000), considera correttamente le quattro componenti del sistema produttivo, ma non è in grado di cogliere – né lo fanno gli articoli presenti in questo ramo della letteratura – la peculiarità dovuta alla convergenza delle tre linee di fabbricazione a monte entro la linea di assemblaggio posta a valle. Il campo della sincronizzazione di due flussi paralleli e convergenti pare essere inesplorato, se preso dal punto di vista del General Flow Shop, ma anche dal punto di vista dei ben più studiati Pure Job Shops; sembrano dunque essere presenti ampi spazi di ricerca.

La seconda possibilità di generalizzazione prende il nome di Two Stage Assembly Shop e la descrizione che segue è tratta da diversi articoli, ma principalmente dalla ricerca di (Sung & Kim, 2008). Introduzioni simili possono essere trovate anche in (Sung & Juhn, 2009) e (Hariri & Potts, 1997) (Potts, et al., 1995).

Il Two Stage Assembly Shop è un approccio che considera il sistema produttivo come composto da due stadi consecutivi; al primo stadio le varie componenti del prodotto finito sono prodotte su m macchine – dove m è fissato ed uguale al numero di componenti diversi che andranno a costituire il

prodotto finito, mentre al secondo stadio le componenti stesse sono assemblate fra di loro e costituiscono il prodotto finito. L'esempio più utilizzato, derivato da Lee et al 1993, riguarda la produzione di un motore a combustione interna; la produzione dello stesso presuppone la produzione delle due componenti principali – corpo e testa – che vengono successivamente assemblate. La criticità di un sistema così costituito è precisamente quella di sincronizzare l'arrivo delle m componenti alla fase finale in quanto quest'ultima non può cominciare che quando tutte le parti sono disponibili. Come precisato nel seguito, un sistema di questo tipo presenta problematiche di risoluzione di tipo NP-hard e dunque richiede modelli risolutivi di tipo euristico (Lee et al 1993).

Questa generalizzazione risulta più adatta della precedente per descrivere la necessità di sincronizzazione dei processi produttivi del primo stadio, mentre appare debole dal punto di vista del controllo del carico e dunque dei lead time di produzione in un sistema nel quale in ogni stadio sono presenti diverse sub linee parallele e composte ciascuna da più macchine disposte in sequenza; i modelli presentati nella letteratura solo raramente considerano la possibilità che ad ogni stadio siano presenti più di una macchina in sequenza e comunque mai più di due.

Le due generalizzazioni sono quindi complementari per quanto riguarda le caratteristiche del sistema produttivo che considerano, e permettono di identificare il sistema produttivo analizzato come un Two Stage Assembly Shop i cui stadi di fabbricazione ed assemblaggio sono composti da General Flow Shop.

La restante parte del capitolo 2 prosegue descrivendo ed analizzando il quadro dei Two Stage Assembly Shop come emerge dalla letteratura. In particolare dopo una breve introduzione si descrivono i contesti di applicazione e le caratteristiche principali. Nell'ultima parte del capitolo 2 si descrivono le principali modalità di risoluzione presenti in letteratura e nel paragrafo finale si traggono le conclusioni sui metodi individuati.

Il capitolo 3 presenterà il quadro delle letterature sul Workload Control, uno dei metodi più utilizzati e maggiormente performanti per la gestione di General Flow Shop (Oosterman, et al., 2000).

2.2 Two Stage Assembly Shop

Prima ancora di delineare il contesto di applicazione, è necessario definire il Two Stage Assembly Shop, così come emerge dalla letteratura.

Gupta et al 1997 effettua una prima classificazione dei sistemi a due stadi, ovvero Two Stage Systems. La prima categoria è rappresentata dai Two Stage Flow Shop: in ognuno dei due stadi è presente una sola macchina ed i due stadi devono essere attraversati sempre nello stesso ordine. La seconda categoria è invece rappresentata dai Two Stage Open Shop: questa categoria è una variante della precedente e considera la possibilità di attraversare gli stadi in ordine arbitrario. Se infine l'ordine è prefissato, ma è variabile per job differenti, il sistema produttivo è definito Two Stage Job Shop. Gupta et al 1997 definiscono infine il Two Stage Assembly Shop come un sistema a due stadi il cui primo stadio è composto da diverse macchine parallele che producono ciascuna un diverso componente del prodotto finito e che possono lavorare in contemporanea; il secondo stadio è invece composto da una o più stazioni di lavoro nelle quali sono assemblate le varie componenti prodotte nel primo stadio.

I Two Stage Assembly Shops, secondo Ruiz, et al., 2010, si inseriscono nel più generale contesto degli Hybrid Flow Shops. Questi ultimi sono molto comuni nei contesti produttivi in cui un set di n jobs deve essere processato in m diversi stadi, ciascuno dei quali composto da una o più macchine identiche (in almeno uno stadio il numero di macchine deve essere superiore ad uno). Ruiz, et al 2010, precisa inoltre che alcuni stadi possono non dover essere attraversati da tutti gli n job. La formulazione appena descritta è la più semplificata, infatti sono prese anche le seguenti assunzioni: le macchine di ogni stadio sono identiche fra loro; tutti i job e tutte le macchine sono disponibili all'istante iniziale; ogni macchina può processare un solo job per volta; ogni job può essere processato da una sola macchina per volta; non esistono tempi di setup; non è ammessa la preemption; il buffer fra una macchina e la successiva è illimitato. Nei contesti produttivi la maggior parte di queste ipotesi semplificative è applicabile, anche se non tutte lo sono.

2.2.1 I contesti di applicazione

I contesti produttivi in cui è applicabile il concetto di Two Stage Assembly Shop sono esemplificati in Lee, et al., 1993 ed in Potts, et al., 1995, i quali sono inoltre citati in gran parte della letteratura successiva.

Il primo considera un sistema che produce motori a combustione interna, i quali sono composti di tre parti: le prime due (corpo e "chassis") sono prodotte internamente, mentre il motore vero e proprio è acquistato esternamente. Le tre parti, dopo essere state prodotte (primo stadio), devono essere assemblate a costituire il prodotto finito (secondo stadio). È inoltre specificato che il sistema produttivo è composto da più impianti diversi (e presumibilmente distanti fra loro): uno per ciascun componente prodotto internamente ed uno per l'assemblaggio finale.

Il secondo autore invece propone a titolo esemplificativo la produzione di un pc, il quale, su richiesta del cliente, è composto da diverse componenti, ciascuna appartenente ad una determinata famiglia di prodotto. Quando il cliente emette l'ordine, quindi, deve scegliere per esempio fra alcune cpu, alcune schede madri, alcuni hard disk etc. Le varie componenti devono quindi essere prodotte (primo stadio) e poi portate nello stesso luogo dove saranno poi assemblate (secondo stadio).

I contesti produttivi appena descritti mostrano come due realtà apparentemente differenti come la produzione di motori e l'assemblaggio di personal computer possano essere ben modellizzate come Two Stage Assembly Systems. Verranno mostrate nella sezione successiva del paragrafo altre possibilità di generalizzazione e applicazione di questi particolari sistemi, con particolare attenzione verso le Supply Chain e l'ambito dei servizi.

Secondo Kolish 2000 le aziende del settore MTO molto spesso possiedono nella parte finale del loro sistema produttivo una linea o comunque un reparto di assemblaggio che permette l'ultimazione dell'ordine cliente. Solitamente gli ordini emessi dai clienti sono composti da più componenti, prodotti in azienda in linee di produzione parallele, che vengono poi assemblati nella parte finale. Non tutti i componenti inoltre sono prodotti internamente, la realizzazione di alcuni di essi viene affidata a terzisti. È facilmente intuibile come si possa estendere il concetto di Two Stage Assembly Systems alle Supply Chain tipiche del settore MTO, caratterizzate da un numero rilevante di attori finalizzati alla produzione di componenti che verranno poi assemblati nella fase finale.

Un'ulteriore estensione del concetto di Two Stage Assembly System può essere effettuata nel campo dei servizi, basti pensare ad un processo di erogazione di un mutuo dove le pratiche

necessarie vengono preparate in parallelo dagli uffici tecnici e legali e vengono validate infine contemporaneamente. Le stesse modalità di processamento possono essere trovate in un qualunque altro ambito come quello ospedaliero o assicurativo.

Delle estensioni del modello presenti in letteratura considerano la possibilità che esista una fase di trasporto tra la produzione di componenti e l'assemblaggio finale in modo da poter analizzare Supply Chain o linee di produzione interne all'azienda con una parte delle componenti in outsourcing. Koulamas & Kyparisis, 2001 rilevano che questa fase è significativa in termini di tempo ed è quindi da considerare nella modellazione. In effetti ciò è comprensibile se si pensa ad aziende che dispongono di diversi impianti dedicati alla produzione delle diverse componenti di prodotti finiti. Come suggeriscono ancora Koulamas & Kyparisis, 2001, non va sottovalutato il trasporto neppure nei casi in cui l'intero prodotto sia realizzato in un singolo impianto: lo stadio (o gli stadi) produttivo è distribuito su tutto il lotto occupato dallo stabilimento, mentre lo stadio di assemblaggio finale è normalmente posizionato in prossimità dell'area adibita alla consegna, quindi all'uscita dallo stabilimento; i collegamenti sono in questi casi spesso effettuati da carrelli o da AGVs ed il tempo che questa operazione richiede, ancora una volta, non è trascurabile.

Potts et al 1995 e Koulamas & Kyparisis, 2001 chiariscono un ulteriore aspetto degno di nota del campo di applicazione dell'approccio TSAS: esso sta aumentando la sua importanza a causa della sempre maggiore diffusione dei concetti del Just-In-Time nel campo manifatturiero e del conseguente sempre maggiore impiego della modularità come strategia progettuale dei prodotti.

Ora che sono stati mostrati i possibili ambiti di applicazione, è quasi immediato il collegamento che si può effettuare con l'approccio TSAS: i modelli risolutivi che appartengono a questo filone si inseriscono efficacemente nei contesti in cui un prodotto finito è realizzato, mediante assemblaggio, a partire da più componenti diverse fra loro che possono essere prodotte internamente o esternamente. Il sistema produttivo che ne risulta presenta infatti sfide di programmazione che devono essere risolte tramite l'implementazione di modelli appropriati, di cui i modelli TSAS sono un esempio molto diffuso.

2.2.2 Caratteristiche principali dei Two Stage Assembly Systems.

Il TSAS, per come è stato presentato, è un sistema caratterizzato da una notevole indipendenza delle varie componenti che lo formano, cioè le varie linee di produzione del primo stadio e la linea di assemblaggio del secondo stadio. È possibile giudicare le componenti del sistema produttivo come indipendenti fra di loro per i seguenti motivi. Innanzitutto sono presenti (e tollerate) rilevanti scorte interoperazionali a monte del secondo stadio; in effetti gli autori esaminati (per esempio Lee et al 1993, ma anche Potts et al 1995 e Gupta et al 1997) si pongono l'obiettivo di minimizzare l'idle time del secondo stadio e per fare ciò fanno in modo che a monte di esso ci sia sempre un sufficiente carico di lavoro in coda. La presenza di queste scorte è garanzia di indipendenza fra il primo stadio ed il secondo, oltre che fra le varie macchine o linee che compongono il primo stadio stesso. In secondo luogo sono considerati indipendenti e deterministici (in quanto indipendenti) i tempi di lavorazione delle componenti di prodotti finiti all'interno delle linee produttive del primo stadio; questi tempi (che sono ricavati dalla somma dei tempi delle operazioni necessarie a completare ogni componente di prodotto finito) sono considerati indipendenti dalla sequenza con cui essi sono rilasciati a sistema, oltre che dal periodo in cui sono rilasciati alla linea di produzione. Un esempio può chiarire il concetto: è dato un sistema produttivo a due stadi che fornisce in output un prodotto finito a partire da tre componenti diversi fra loro, lavorati in tre diversi impianti ed assemblati in un impianto finale dedicato, appunto, all'assemblaggio. L'approccio TSAS presuppone che, dati n job = n prodotti finiti diversi fra loro, ad ogni job sia associato un tempo di lavorazione per il primo componente, uno per il secondo, uno per il terzo ed uno per l'assemblaggio dell'intero job. I tempi, essendo dati a priori, risultano predeterminati e non influenzabili; l'unica variabilità che può essere considerata è quella dovuta ai possibili fermi linea o indisponibilità del personale, ma per il resto le linee produttive sono considerate come delle black box. L'approccio TSAS mira dunque ad individuare la sequenza ottimale con cui essi devono essere rilasciati al sistema (per esempio prima il job #4, poi il job #2, e così via).

La letteratura sui Two Stage Assembly Systems si è concentrata prevalentemente per quanto riguarda la programmazione e controllo della produzione sulla programmazione operativa, con particolare interesse per il sequenziamento dei job. Tale scelta ha comportato una forte ricerca su tecniche di sequenziamento sempre più elaborate e sofisticate che comportassero bassi oneri in termini computazionali, non sempre con i risultati sperati. Benchè i TSAS permettano di modellizzare una grande eterogeneità di sistemi produttivi, a causa dell'estrema complessità di risoluzione dei metodi di schedulazione pensati, i sistemi studiati sono composti da poche macchine

in parallelo al primo stadio (nella maggior parte dei casi da due sole stazioni) e da una sola stazione in assemblaggio.

Obiettivi possibili di questi modelli sono : minimizzazione del makespan, flowtime, tardiness, lateness (Tozkapan, et al., 2003). Per raggiungere tale obiettivo il modello considera tutte le possibili permutazioni dei job da rilasciare e, calcolandone i tempi di attraversamento determinati dalla sequenza, cerca quella permutazione che va a minimizzare solitamente il makespan o tempo di completamento.

Nel prossimo paragrafo si cercherà di effettuare un'analisi esaustiva dei principali contributi presenti in letteratura sui TSAS, andando ad individuare i sistemi modellizzati e le funzioni obiettivo utilizzate per ottenere la schedulazione ottimale.

2.3 Le modalità di risoluzione presenti in letteratura

Lo studio dei sistemi definiti in precedenza two-stage assembly system, viene affrontato in letteratura con due modalità principali e completamente differenti. Una prima modalità consiste nello sviluppo di modelli estremamente complessi unitamente a regole di dispatching e a procedure di risoluzione euristiche ad hoc. Si possono individuare sei studi di riferimento di questa particolare categoria di cui fanno parte i seguenti autori: Huang, 1984, Fry, et al., 1989, Philipoon, et al., 1991 che considerano lo scheduling di job shop con operazioni di assemblaggio e investigano le performance di alcune regole di dispatching al fine di minimizzare il flow time medio o il ritardo medio. Doctor, et al., 1993 considerano un modello simile ai primi tre e sviluppa un algoritmo euristico che massimizza la disponibilità del sistema a fronte di Due Dates stringenti. Mc Coy ed Egbelu 1998 formulano un modello di scheduling basato su programmazione lineare mista intera, con algoritmo euristico di risoluzione. Infine Cheng 1990 presenta un metodo approssimato per la stima di media e deviazione standard dei tempi di attraversamento dei job, ai fini di minimizzarli.

La seconda modalità derivante dagli studi di Lee, et al., 1993, si sviluppa con modelli decisamente più semplici, attorno ai quali vengono costruiti dei metodi di risoluzione appositi, oppure dei teoremi ad hoc. Questo approccio, molto più utilizzato in letteratura in quanto si presta maggiormente all'integrazione con tematiche più complesse come tempi di set-up o funzioni obiettivo particolari.

Tra i primi a sviluppare tali modelli si trovano Lee, et al., 1993 e Potts, et al., 1995 il primo descrive un'applicazione del problema dello scheduling di un sistema two stage, in un'azienda reale. In particolare il sistema è composto da tre macchine, le prime due lavorano in parallelo e producono motore e chassis, la terza assembla il tutto. Obiettivo del suo modello era la minimizzazione del makespan e queste sono state le sue conclusioni : “ Un sistema multi-stage è più realistico nella pratica, ma il problema dello scheduling è necessariamente NP-complete. Per questo motivo devono essere sviluppate euristiche che permettano di risolvere tali problemi e le ricerche future dovrebbero focalizzarsi sulla progettazione di euristiche efficienti e analisi loro performance “.

Potts, et al., 1995 mostra che il problema dello scheduling in two stage assembly systems è NP-Hard anche per un numero di macchine al primo stadio uguale a 2. Per questo motivo sviluppa un algoritmo branch and bound (Hariri & Potts, 1997).

A partire da questi primi modelli, sono stati poi sviluppati molti metodi euristici di risoluzione. Si trovano modelli di Haouari e Daouas 1999, Sun et al 2003, Allahverdi e Al-Anzi 2006 (in particolare Allahverdi ha sviluppato molti modelli in cui si tengono in considerazione i tempi di set-up e altri in cui non si minimizza il makespan ma il tempo totale di completamento), Tozkapan et al 2003 (modello che non minimizza il makespan ma il tempo totale di completamento), Ali Allahverdi et al 2007 (altra categoria di modelli dove la funzione obiettivo consiste nella minimizzazione sia del makespan che del tempo totale di completamento).

Nei prossimi paragrafi verranno presentati i modelli principali appartenenti alla seconda categoria, la più utilizzata, suddividendoli secondo la funzione obiettivo utilizzata per ottenere la schedulazione ottimale.

2.3.1 Ipotesi principali dei vari modelli.

Sono ora riportate le ipotesi principali dei modelli che saranno in seguito mostrati e commentati. Eventuali differenze rispetto alle ipotesi di base saranno indicate alla fine di ogni modello.

Ipotesi:

- 1- Si analizzano fixed assembly flow shop. Significa che l'analisi è rivolta a quei sistemi produttivi composti da m macchine parallele al primo stadio, ognuna dedicata alla produzione di un componente. Una volta che tutti i pezzi sono pronti vanno alla stazione

successiva di assemblaggio, comune a tutte le macchine. I componenti devono essere assemblati contemporaneamente in assemblaggio, ovvero non è possibile cominciare ad assemblare finché entrambi i componenti non sono disponibili.

- 2- I tempi di processamento dei job $J(i)$, $i = 1, \dots, n$, sono disponibili e sono costanti sia per quanto riguarda la parte produttiva a monte che la parte di assemblaggio a valle.
- 3- Nessun job può essere suddiviso a sua volta
- 4- Nessuna macchina può lavorare più di un pezzo alla volta (chiaramente questo vincolo nei modelli che considerano la possibilità di lottizzazione viene meno. Potts, Allahverdi)
- 5- Tutte le macchine sono disponibili e non si hanno guasti durante il periodo di schedulazione
- 6- I tempi di set-up sono indipendenti dalla sequenza e quindi sono compresi nei tempi di processamento
- 7- Le scorte di disaccoppiamento tra le due fasi possono essere presenti e vi sono limiti di capacità dei buffer.

2.3.2 Il modello di riferimento: la Minimizzazione del Makespan (Lee et al 1993).

Il problema della minimizzazione del Makespan, ovvero dell'intera sequenza produttiva, è uno dei più diffusi in letteratura. Il modello principale su cui fanno riferimento gli altri è quello sviluppato da Lee et al 1993.

Come evidenziato in precedenza Lee, et al., 1993 è il primo ad occuparsi seriamente del problema e a proporre un algoritmo di branch and bound e delle euristiche di risoluzione per il problema della minimizzazione del makespan in un sistema TSAS. Lo studio da lui svolto prende spunto dal lavoro di Johnson 1954 sui two-stage flowshop, sistemi produttivi dove tutti i componenti sono prodotti nella prima macchina e si assembla il tutto nella parte finale di assemblaggio. L'idea di Lee consiste nel ritenere un sistema TSAS una generalizzazione di un sistema ben noto e studiato come il two stage flowshop. Di conseguenza buona parte dei risultati ottenuti in quell'ambito possono essere utilizzati anche nei sistemi TSAS.

Prima di spiegare e mostrare la procedura di risoluzione sviluppata è opportuna una formulazione del problema:

- Le ipotesi sono esattamente le stesse elencate in precedenza
- Sistema produttivo composto da 3 macchine di cui due a monte che lavorano in parallelo e producono componenti distinti, una a valle che assembla il tutto. Set di macchine $M = (M_a, M_b, M_2)$
- Set di job $J = (J_1, \dots, J_n)$
- Componenti del job $J(i)$: $J(i, x)$, $x = a, b, 2$
- Tempo di processamento del job $J(i)$ sulla macchina M_x : $P(i, x) \geq 0$
- Una schedulazione completa è definita come: $S = S_1 S_2 \dots S_n$, praticamente è una delle possibili permutazioni degli n job.
- Schedulazione ottimale S^*
- Tempo di completamento o makespan della schedulazione: $C(S)$ oppure $C(S^*)$ nel caso di schedulazione ottimale. Il makespan indica il tempo di completamento dell'intera sequenza produttiva, non si limita a calcolare il tempo di completamento di ogni singolo job, ma ne considera tutto l'insieme.
- Scopo del modello è l'identificazione di una schedulazione ottimale S^* per cui $C(S^*) < C(S)$ per ogni S .
- Definisco T_{max} come la differenza tra la somma dei tempi produttivi su M_a ed M_b . Questa grandezza sarà poi utile nel determinare il lower bound dell'algoritmo branch and bound.

Ai fini della minimizzazione del makespan è fondamentale la riduzione dell'idle time della macchina di assemblaggio. Partendo da queste affermazioni Lee sviluppa un algoritmo di branch and bound, con dei teoremi a supporto che velocizzano il sequenziamento dei job. Di seguito si enunciano i teoremi:

- **Teorema 1** : Dati due job consecutivi nella schedulazione $J(i), J(j)$ se $P(i, 2) \leq \min(P(i, a), P(i, b), P(j, 2))$ allora il makespan con il job j posto prima del job i non è peggiore del makespan con i prima di j

Dal teorema precedente si sviluppano due corollari :

- se $P(k, 2) = \min(P(k, a), P(k, b), \min(P(i, 2)))$ esiste una schedulazione ottimale con $J(k)$ processato per ultimo
- se per $i = 1, \dots, n$, $P(i, 2) \leq \min(P(i, a), P(i, b))$ allora esiste una schedulazione ottimale

in cui i job sono ordinati in ordine non crescente di $P(i, 2)$.

- **Teorema 2:** Definita la condizione $C : P(i, 2) \geq (P(i, a), P(i, b))$, se $J(i)$ e $J(j)$ sono due job consecutivi che soddisfano la condizione C, e se $\text{Max}(t(a) + P(i, a), t(b) + P(i, b)) \leq \text{Max}(t(a) + P(i, a), t(b) + P(j, b))$, dove $t(a)$ e $t(b)$ indicano il tempo di completamento sulle macchine a e b dei job precedenti, allora il makespan ottenuto con job i prima del job j non è peggiore di quello ottenuto con job j prima di job i.

Grazie a questi teoremi l'algoritmo di branch and bound diventa più efficiente, in quanto ad ogni iterazione non è necessario considerare tutti i job, ma solo quelli che rispettano le regole sopra citate. Per la determinazione dei lower bound presenta una formulazione complessa e non utile ai fini del lavoro di tesi, per questo motivo non verrà riportata. Per maggiori dettagli si rimanda a Lee, et al., 1993 e Haouari & Daouas 1999.

Tramite la formulazione del lower bound viene calcolato il massimo makespan ottenibile dalla combinazione dei vari job rimanenti da schedulare.

Da solo l'algoritmo impiegherebbe molto tempo ad arrivare a una soluzione ottima mentre grazie ai teoremi sviluppati si riescono ad eliminare subito delle permutazioni sicuramente non ottimali e ridurre così i tempi computazionali. Tutto ciò può non bastare se ci si trovasse di fronte a problemi ancora più complessi, in quanto non sempre i teoremi eliminano molte soluzioni. Per evitare questi inconvenienti vengono sviluppate allora delle procedure euristiche, che permettono di arrivare ad un valore sub ottimale, ma in molto meno tempo. A tale scopo Lee et al 1993 introduce tre metodologie euristiche, che per la loro semplicità vengono spesso utilizzate. Il funzionamento è il seguente: come spiegato in precedenza Lee sfrutta il collegamento con le teorie di Johnson 1954 e quindi cerca di ricondurre il suo sistema con due macchine parallele al primo stadio, a un sistema con una macchina sola di modo che diventi un two stage flow shop. Per tale motivo nelle sue euristiche si va a sostituire il tempo produttivo al primo stadio con un valore che sintetizzi al meglio i tempi delle due macchine parallele. Una volta ottenuto questo valore basta applicare l'algoritmo di Johnson 1954 per ottenere una schedulazione sub ottimale. Le tre euristiche sviluppate differiscono principalmente nella modalità di determinazione dei tempi produttivi al primo stadio che sono:

- 1- $P(i, 1) = \max(P(i, a), P(i, b))$ per ogni $i = 1, \dots, n$
- 2- $P(i, 1) = P(i, a)$ se la somma dei tempi produttivi su tutti i prodotti nella macchina A è maggiore della macchina B. Viceversa $P(i, 1) = P(i, b)$

$$3- P(i, 1) = (P(i, a) + P(i, b)) / 2 \text{ per ogni } i = 1, \dots, n$$

Salvo poche ricerche, da Lee et al 1993 in avanti tutti gli sforzi sono rivolti alla determinazione di euristiche che permettano una risoluzione in tempi più accettabili, utilizzando l'algoritmo Branch and Bound proposto da Hariri e Potts 1997 come riferimento per verificare la bontà della soluzione trovata.

Potts, et al., 1995 dimostrano che il problema è NP-Hard anche per $m = 2$, indicando quindi come via principale per la risoluzione delle metodologie euristiche. Molto importante il teorema che sviluppano, il quale dimostra che la schedulazione ottimale dei job può essere ricercata solo nelle permutation schedules. Questo significa che è sufficiente decidere la schedulazione su una sola macchina e poi applicarla a tutte le altre per avere una soluzione ottimale.

Hariri e Potts nel 1997 creano un algoritmo branch and bound che consente un calcolo più veloce della permutazione ottima che minimizza il makespan. Il loro modello prende spunto non solo dalle ricerche di Lee ma anche da Johnson 1954.

2.3.3 Estensioni dei modelli principali

2.3.3.1 Three stage assembly flowshop

Koulamas & Kyparisis, 2001 estendono la problematica del two stage assembly system ai three stage assembly systems. L'osservazione che lo porta a tale estensione è dovuta all'ambito di applicazione dei sistemi two stage. Essenzialmente tali modelli vengono utilizzati in aziende che sviluppano un'architettura di prodotto estremamente modulare, che le permette di fare fronte a una grande varietà con costi inferiori. Capita spesso proprio per la strutturazione di queste aziende, che il tempo di trasporto tra la fase produzione componenti o moduli e la linea di assemblaggio finale non sia trascurabile. Sia che si tratti di trasporto da fornitori esterni, sia che si tratti di trasporti automatizzati interni all'azienda, risulta necessaria l'introduzione di un nuovo stadio, con capacità di processamento limitata per la quale i vari job competono. La procedura euristica che sviluppa per arrivare a una schedulazione ottimale è basata ancora una volta sui risultati ottenuti da Johnson, ovvero esegue un primo sequenziamento sulla prima macchina del primo stadio, considerando anche il tempo di trasporto e assemblaggio. Dopodiché avendo dimostrato ancora una volta che lo

studio di questi sistemi può essere ricondotto alla determinazione delle permutation schedule (Potts) può applicare la schedulazione ottenuta anche per le altre macchine. La procedura ottenuta si rivela molto funzionale e l'autore individua delle possibilità di ampliamento anche per sistemi a k stadi, con k maggiore di tre.

2.3.3.2 Two stage assembly flow shop con minimizzazione Total Completion Time

Tozkapan nel 2003 riprende il lavoro svolto da Chung sui flow shop e sviluppa un modello in cui la funzione obiettivo non è più la minimizzazione del makespan, bensì la minimizzazione del tempo totale di completamento pesato o total weighted flowtime. La minimizzazione del tempo trascorso da un pezzo nel sistema è una tematica molto importante nei sistemi reali, che permette di rispondere con maggiore reattività alla domanda del cliente (Allahverdi 2000).

Per la risoluzione di questo problema si ricorre a una procedura molto simile ad Hariri & Potts 1997, per cui si dimostra che la ricerca può essere ricondotta alle permutation schedule, quindi si sviluppano dei teoremi ad hoc che permettono di limitare il numero di permutazioni da prendere in considerazione, insieme ad un algoritmo branch and bound che permette di arrivare alla soluzione finale.

La funzione obiettivo da minimizzare e attraverso la quale calcolare di volta in volta il lower bound è la seguente:

$$\text{Min } \sum_{j \in U} \sum_{t=s+1}^n (W(j) * C(j, t))$$

con $C_j t$, il tempo di completamento del job j in posizione t e w_j il peso collegato al completamento del pezzo (può essere visto come un indicatore dell'importanza del pezzo). La doppia sommatoria viene fatta inizialmente sui job non schedulati (insieme U), successivamente sulle posizioni ancora disponibili nella sequenza (insieme S dei job non rilasciati

Questa particolare strutturazione del modello è diventata lo standard di riferimento nel settore per quanto riguarda sistemi two stage con funzione obiettivo rivolta alla minimizzazione del flow time medio. Tutte le ricerche successive sono rivolte ad ottenere delle procedure euristiche che consentano di velocizzare i tempi di calcolo.

Sung & Kin, 2008 sviluppano una funzione obiettivo simile a Tozkapan, et al., 2003 in cui si minimizza il tempo totale di completamento, apportando delle modifiche anche al sistema modellizzato. L'autore ritiene fondamentale, ai fini dell'applicazione a casi reali l'inserimento di due stazioni parallele identiche nella fase di assemblaggio, di modo da poter evitare sbilanciamenti strutturali dei carichi nelle due fasi e riuscire a lavorare con meno scorte interoperazionali. La fase a monte viceversa è composta da due sole stazioni a differenza di Tozkapan che ne inseriva m.

2.3.3.3 Two stage assembly system con lottizzazione

Una prima modifica al modello di Hariri & Potts 1997 viene apportata dallo stesso Potts nel 2004. In questo modello si considera il problema della lottizzazione nei sistemi di assemblaggio, definendo due tipologie di lottizzazioni: una prima dove il tempo di produzione di un lotto deriva dal tempo massimo di realizzazione delle sue operazioni, quindi va a modellizzare un sistema dove le operazioni sul lotto vengono eseguite simultaneamente da ogni stazione. Nella seconda tipologia si considerano anche i tempi di set-up su ogni macchina, allo scopo di descrivere un sistema dove le operazioni sono realizzate in sequenza. Scopo del modello rimane la minimizzazione del makespan.

I teoremi che deriva per la risoluzione sono del tutto simili a quelli di Hariri & Potts 1997, dove si privilegia l'inserimento nei primi posti della sequenza di quei lotti caratterizzati da tempi lunghi in assemblaggio e tempi brevi in produzione, di modo da diminuire l'idle time della stazione di assemblaggio e minimizzare il makespan.

2.3.3.4 Two stage assembly flow shop con minimizzazione Lateness.

Ali Allahverdi nel 2006 e nel 2007 analizza un sistema TSAS con l'obiettivo di trovare la schedulazione che vada a minimizzare il massimo lateness. Come lateness si intende il valore assoluto della differenza tra tempo di uscita del job e Due Dates concordata. E' un indicatore molto importante, specialmente per aziende MTO che lavorano in JIT in quanto pesa allo stesso modo sia i ritardi che gli anticipi di produzione. In tali sistemi produttivi volti al raggiungimento della maggiore efficienza possibile l'eccesso di scorta dovuto ad anticipi è un evento negativo come i ritardi. Per queste motivazioni Allahverdi ritiene fondamentale sviluppare delle procedure di

schedulazione che tengano maggiormente in considerazione le problematiche delle aziende, anziché cercare di minimizzare solamente il makespan.

Spinto dagli stessi motivi inserisce nel proprio modello la problematica dei tempi di set-up indipendenti dalla sequenza, per cui non considerabili come interni ai tempi di produzione deterministici dei job.

Successivamente Allahverdi mostra i risultati ottenuti dall'applicazione degli algoritmi a un caso reale. L'azienda in questione opera nel campo dell'elettronica, in particolare produce e assembla computer. I risultati ottenuti sono incoraggianti, con errori relativamente contenuti e tempi computazionali non troppo elevati. L'autore riserva comunque qualche dubbio sulla robustezza dei modelli nel caso di Due Dates più stringenti. Le ricerche future saranno rivolte a garantire maggiore robustezza anche in questo senso.

2.3.3.5 Two stage assembly flow shop con funzione obiettivo bicriteria.

Ali Allahverdi nel 2008 è uno dei primi ad introdurre una funzione obiettivo composta da due componenti differenti: minimizzazione del makespan e del tempo medio di completamento. Tale scelta è spinta dalla seguente motivazione: secondo l'autore, la minimizzazione del makespan serve a quelle aziende dove è importante la reattività alla domanda del cliente, viceversa la minimizzazione del tempo medio di completamento è utile ai fini della riduzione del WIP. Per esempio un basso makespan consente di evadere in breve tempo un ordine urgente appena giunto a sistema, il tutto grazie a un'elevata saturazione delle risorse. Ci sono altre aziende invece dove l'obiettivo principale è che il prodotto sia pronto appena viene rilasciato in produzione. Tale obiettivo coincide con quello delle aziende di ridurre il più possibile il WIP e quindi tenere i prodotti nel sistema il minor tempo possibile. Si fa ricorso maggiormente a minimizzazione del tempo medio di attraversamento in quei casi in cui i costi derivanti dalle scorte o dal tenere dei pezzi a sistema siano molto elevati.

Allahverdi 2008 dimostra che lo studio della sequenza ottimale dipende, anche per una funzione obiettivo composta da due criteri differenti, dalle permutation schedule. Tale concetto, scoperto per primo da Potts, et al., 1995 e in seguito da Tozkapan, et al., 2003, indica che la permutazione ottimale è ottenuta con una schedulazione dei job uguale su tutte le macchine. Questo porta una notevole riduzione della complessità computazionale, che altrimenti sarebbe troppo elevata.

La funzione obiettivo quindi è determinata da :

- Makespan = max (C (n))
- Tempo medio completamento (MCT) = somma(C (i)) / n

$$C (j) = \max \{ \max (k = 1 \dots m) \left\{ \sum_{i=1}^j t (j, k) \right\}, C (j - 1) \} + p (j)$$

Con

J = posizione ordine

M= macchine primo stadio

T (j, m) tempo produzione job in posizione j macchina m

C (j) = tempo completamento job in posizione j

P (j) = tempo assemblaggio posizione j

Per il calcolo del makespan si procede nel solito modo, mentre l'innovazione consiste nell'aggiunta del tempo medio di completamento che viene combinato nella funzione obiettivo nel seguente modo:

$$OF = \alpha * Cmax + (1 - \alpha) * MCT$$

Tale problema non può avere una soluzione polinomiale, per questo motivo Allahverdi 2008 sviluppa diverse euristiche di risoluzione. Tale metodo si è rivelato molto performante rispetto ad altri, difatti viene spesso citato in molte ricerche successive inerenti l'ambito bicriteria, future ricerche saranno volte a inserire i tempi di set-up nel modello.

2.4 Problematiche dei modelli mostrati

Per comprendere meglio la rilevanza che ha l'approccio Two Stage Assembly Shop nel nostro ambito di ricerca è necessario focalizzare l'attenzione su alcune peculiarità che emergono per esempio in Sung & Kim., 2008, ma comunque presenti in tutti gli articoli citati nel filone di letteratura relativo al Two Stage Assembly System.

Il TSAS, se paragonato al WLC, è un approccio più generale al problema della gestione della produzione: la letteratura esaminata non si occupa, parlando di due stadi, di analizzare cosa contiene ciascuno dei due stadi. L'ipotesi semplificativa è infatti che ogni stadio sia composto da una o più macchine, comunque spesso considerate come identiche e certamente parallele fra di loro; in alcuni casi si considera il primo stadio come composto da numerose macchine parallele ed il secondo stadio composto da una sola stazione di assemblaggio, viceversa in altri casi è il primo stadio ad essere composto da una sola macchina ed al secondo stadio sono presenti più stazioni di assemblaggio parallele. È subito evidente che non è considerata la possibilità (nella pratica ben più frequente) che i prodotti debbano attraversare al primo e/o al secondo stadio più di una stazione, eventualmente anche con sequenza variabile per ogni job. Il problema, in questa ottica, appare subito più complesso in quanto richiede l'impiego di tecniche di gestione della produzione non solo orientate alla minimizzazione del makespan, ma anche al bilanciamento dei carichi e dei flussi sulle macchine che lavorano ogni componente al primo stadio e su quelle che assemblano gli n componenti al secondo stadio (anche l'assemblaggio può infatti essere composto da più operazioni che richiedono l'installazione di diverse stazioni di lavoro, anche non in linea).

Un esempio concreto può aiutare la comprensione, per semplicità si farà riferimento ancora una volta all'esempio portato da Lee, et al., 1993, cioè la fabbricazione di un motore a combustione interna. Delle tre componenti (motore, corpo, chassis) la prima è acquistata ed è assunto che sia disponibile ad ogni periodo allo stadio di assemblaggio; le altre due devono invece essere prodotte negli stabilimenti dell'azienda. L'approccio TSAS considera il tempo di lavorazione di ognuna delle componenti predeterminato e riferibile all'intero stadio di produzione, così come predeterminato è il tempo complessivo di assemblaggio di un determinato motore. È però vero che nella pratica le operazioni che devono essere effettuate per realizzare un corpo motore sono numerose e, a seconda del modello di motore su cui questo corpo andrà montato, possono variare in durata e sequenza; lo stesso dicasi per lo chassis. L'assemblaggio, inoltre, potrà richiedere per ogni motore finito diverse lavorazioni da svolgere nella fase di assemblaggio, per esempio una cromatura che venga effettuata

solo su alcune famiglie di prodotti e non su tutti, da svolgere necessariamente nella fase finale di assemblaggio.

In conclusione, i tempi di lavorazione di ogni job su ogni macchina presente al primo o al secondo stadio non possono essere semplicemente sommati fra di loro ed utilizzati come input del modello euristico di risoluzione del problema di minimizzazione del makespan, in quanto gli stessi tempi di attraversamento dipendono dal corretto sequenziamento e rilascio all'interno delle "sub linee produttive" (si veda la sezione relativa al WLC per un approfondimento su questa tematica).

L'approccio alla risoluzione dei two-stage assembly systems è basato su delle ipotesi molto stringenti, che tendono a trascurare l'impatto della variabilità dei tempi di processamento delle stazioni. Difatti modelli come quelli presentati in precedenza, che fanno leva su dei tempi deterministici entrano in crisi nel caso in cui ci si trovi dei tempi che in realtà non possono essere determinati con precisione preventivamente. Il solo fatto di avere delle fluttuazioni nei tempi può portare per esempio al fatto che tramite algoritmo branch and bound la soluzione ottenuta non sia più ottimale, e che non sia possibile se non ripetendo i conti da capo la determinazione della nuova schedulazione. Difatti grazie ai teoremi sviluppati che snelliscono i conti, molte possibili soluzioni vengono eliminate. Il tutto funziona finché i tempi sono deterministici, ma se non lo sono il rischio che si corre è quello di eliminare proprio quelle soluzioni che diventerebbero ottimali.

Inoltre un altro problema è che queste procedure agiscono solo sul sequenziamento e non sul rilascio. Questo comporta un grande dispendio di energie nella creazione di euristiche ed algoritmi efficienti per ovviare le difficoltà computazionali. Dal punto di vista dell'impianto produttivo reale, una logica che impatta solo sul sequenziamento può portare a un sistema eccessivamente sovraccarico, dove il minimo guasto o imprevisto può creare grossi problemi. Tutto ciò si dimostra nel fatto che il makespan previsto nella realtà difficilmente si raggiunge causa l'imprevedibilità del contesto in cui le aziende MTO agiscono. Si ritiene che proprio nel non riuscire ad ottenere un sistema produttivo livellato si trovi la maggiore problematica di questi modelli. Difatti è solo grazie ad un livellamento e a un minor numero di job nel sistema che i tempi produttivi vengono più facilmente rispettati.

L'agire sul sequenziamento inoltre comporta degli oneri computazionali elevatissimi come spiegato in precedenza. Non sempre gli sforzi svolti dagli autori nella ricerca di algoritmi si sono rivelati utili allo studio di problemi molto complessi, con molti job e macchine, come nei casi reali. Questo è un ulteriore limite, derivante dalla difficoltà intrinseca di tali modelli che impedirebbe l'applicazione

dei metodi di risoluzione individuati nei paragrafi precedenti per il sistema analizzato nel lavoro di tesi.

2.5 La scelta del Workload Control come tecnica di PP&C

Le problematiche dei modelli evidenziate nel paragrafo precedente hanno mostrato le difficoltà di applicazione di tali metodologie al sistema produttivo in esame. Gli alti oneri in termini computazionali per sequenziare un set di n job su poche stazioni comporterebbero notevoli impedimenti per lo studio di un sistema con 20 stazioni organizzati in 4 linee differenti.

Inoltre uno dei cardini del lavoro di tesi riguarda la variabilità e l'impatto che essa ha sulle performance di sistema. Per variabilità si intende variabilità del routing e dei tempi di lavorazione. Tutti gli approcci analizzati finora invece prevedono l'utilizzo di tempi deterministici e preventivabili con certezza. Si intuisce come una soluzione ottimale possa non esserlo più se i tempi di lavorazione effettivi sono differenti da quanto stabilito inizialmente. Tale fenomeno potrebbe diventare molto frustrante dati gli ingenti oneri computazionali necessari all'individuazione della schedulazione ottimale. Inoltre nel lavoro di tesi per alcune configurazioni analizzate sono presenti dei controlli qualità che potrebbero intercettare dei difettosi causando ricircoli e rilavorazioni, complicando ulteriormente la schedulazione ottimale individuata.

L'approccio Workload Control che verrà presentato nel prossimo capitolo è anch'esso una tecnica di PP&C rivolta però al rilascio dei job piuttosto che al sequenziamento. Questo comporta l'ottenimento di un carico maggiormente livellato tra le varie stazioni ottenendo uno Shop Floor in cui la variabilità dovrebbe sortire effetti meno ingenti.

Il bilanciamento del carico di lavoro ottenibile tramite Workload Control garantendo il perseguimento di uno degli obiettivi più importanti della Lean manufacturing ovvero il livellamento dei carichi di lavoro garantirebbe una maggiore robustezza nei confronti delle variazioni di variabilità di sistema e di livello del carico di sistema.

Spinti dalla convinzione che una politica di gestione del sistema produttivo maggiormente orientata al rilascio che al sequenziamento potesse ottenere performance migliori in un sistema caratterizzato da alta variabilità come quello analizzato si è deciso di affrontare il problema tramite il Workload Control.

Capitolo 3: L'approccio Workload Control in letteratura

In questo capitolo viene effettuata un'analisi bibliografica dell'approccio Workload Control presente in letteratura. Tramite la classificazione di Bergamaschi si delineano le principali caratteristiche e studi dei modelli sviluppati fino ad oggi. Particolare attenzione viene prestata alle due tipologie di controllo del carico di lavoro, ovvero la limitazione e il bilanciamento dei carichi.

Capitolo 3 L'approccio Workload Control in letteratura

3 Workload Control

3.1 Il paradigma

Il paradigma Workload Control (WLC), di cui faremo ora un'introduzione basata su Land& Gaalman 1996 ed Oosterman, et al., 2000, si applica nel già descritto contesto in cui operano le aziende Make To Order; non entreremo nuovamente nel dettaglio del Make To Order, ma richiamiamo qui le principali ragioni per cui, come vedremo nel seguito, le tecniche WLC si applicano con successo in questo campo.

La tipica configurazione con cui si presenta il sistema produttivo delle aziende che operano in contesto MTO è quella del job shop e consiste in un certo numero di stazioni di lavoro che vengono attraversate dai vari prodotti in corso di lavorazione (jobs). Il job shop lavora in un contesto molto dinamico, peculiarità che deriva da circostanze interne ed esterne: la variabilità endogena deriva da guasti delle macchine, livelli di produttività, assenteismo dei lavoratori, difetti qualitativi, non perfetta razionalità delle logiche di produzione, ecc; la variabilità esogena deriva invece da diversi mix di prodotti richiesti, diversi volumi di prodotti richiesti, richiesta di ordini urgenti e tutto ciò che è legato ad una variabilità delle diverse componenti della domanda. Le variabilità appena descritte, essendo particolarmente influenti sulle prestazioni realizzate dall'impresa ed essendo non rare nei reali contesti produttivi, giustificano i grandi sforzi profusi da diversi autori nella ricerca sui temi del WLC e nello studio di soluzioni sempre più performanti e meglio coerenti con i contesti reali. Prima di gettare uno sguardo più approfondito sul WLC stesso, si precisano quali autori sono risultati più rilevanti ai fini della stesura di questa sezione: (Land, et al., 2004), (Land,& Gaalman 1996), (Oosterman, et al., 2000), (Stevenson, et al., 2005), (Hendry, et al., 1998), (Cigolini& Portioli 2002), (Bergamaschi, et al., 1997), (Perona & Portioli 1998)(Stevenson, et al., 2006), per citare solo i più significativi.

Secondo Land, et al., 2006, il WLC approccia il job shop come un sistema di code dove a monte delle diverse stazioni di cui è composto il sistema produttivo si trovano delle code entro le quali si

immettono i job in arrivo alla stazione; la posizione in cui essi si immettono (e dunque il tempo che devono attendere prima di essere serviti) dipende dalle regole di priorità applicate. L'obiettivo del WLC stesso è quello di controllare la lunghezza di queste code. Da un livello stabile del carico di lavoro di fronte alle stazioni è possibile infatti ottenere delle prestazioni migliori in termini di livelli medi e di dispersione dei risultati. Un corretto livello di Work In Process, che è strettamente legato alla lunghezza delle code di fronte alle stazioni, permette infatti di realizzare minori lead time di produzione e maggiori livelli di produttività. Un livello di carico controllato e stabile nel tempo, inoltre, permette di avere maggiori garanzie di attendibilità sulle stime dei tempi.

Le tecniche di WLC disaccoppiano quindi il sistema produttivo dagli ordini in arrivo (ovvero dal mercato), evitando di rilasciare qualsiasi ordine nel sistema nel momento in cui esso è accettato ed inserendolo invece nella cosiddetta Preshop Pool, cioè un “database” in cui sono presenti gli ordini che, seppure accettati dall'azienda e successivamente confermati dal cliente, sono ancora in attesa di cominciare le lavorazioni necessarie alla produzione degli stessi. In sintesi questo disaccoppiamento consiste nella creazione di un buffer che sia in grado di proteggere il sistema produttivo dai deleteri effetti che la variabilità della domanda ha su di esso (principalmente cali di produttività associati ad aumenti dei lead time di produzione).

Descriveremo nelle prossime sezioni come è comunemente schematizzato un sistema di WLC, come è realizzato il controllo del carico di lavoro attraverso il bilanciamento di livelli di Input e di Output e poi quali sono i modelli di riferimento, secondo l'opinione di Oosterman, et al., 2000, opinione da noi condivisa.

3.2 Controllo dell'Input e dell'Output

I concetti del Workload Control, come specificato sopra, si occupano di controllare il carico del sistema mediante regolazione dell'Input e dell'Output dello stesso.

Bechte, 1988 effettua una basilare ed importante classificazione degli Input ed Output di un sistema produttivo e chiarisce gli effetti che la regolazione degli stessi porta alle prestazioni del sistema produttivo. Innanzitutto l'Input di un sistema è il numero di ordini in arrivo nell'unità di tempo, mentre l'Output sono i prodotti realizzati nell'unità di tempo.

Il sistema produttivo è schematizzato mediante il “Funnel Model”, esemplificato nella figura seguente in cui si riporta inoltre il diagramma di throughput, fondamentale per il controllo input output:

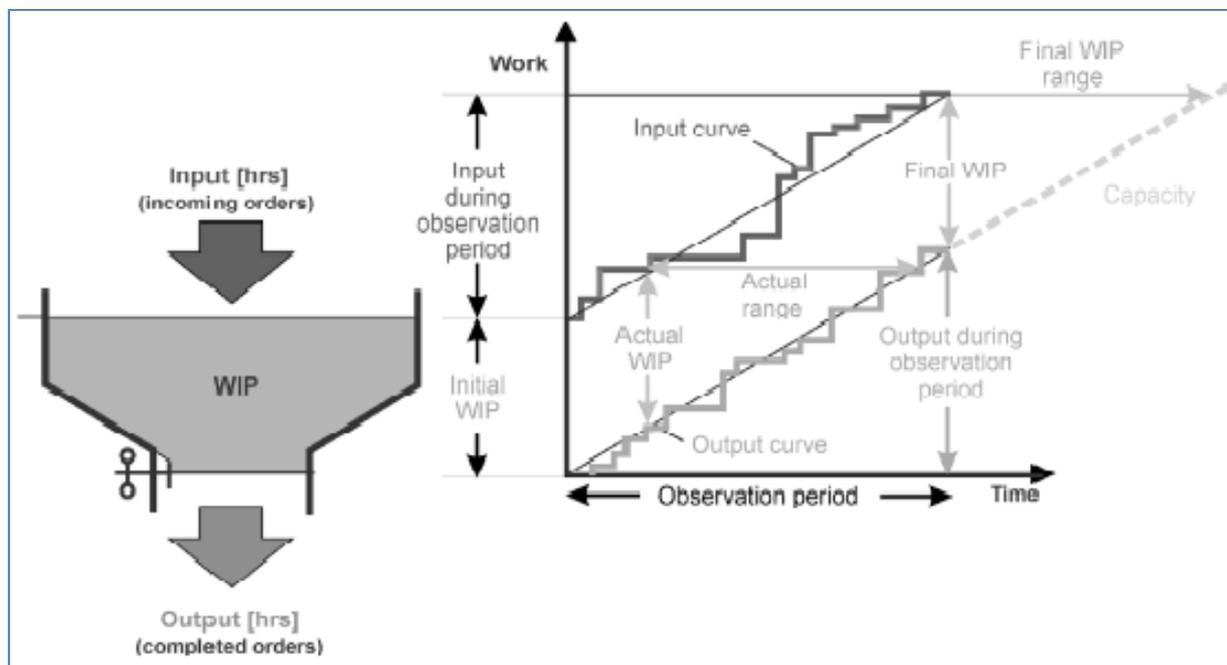


Figura 6 Il controllo dell'input e dell'output

Il Funnel Model si basa sul principio enunciato da Little secondo cui $Lead\ Time = WIP / Output$; da questo principio Bechte deriva cinque regole per il controllo del sistema:

1. Se si desidera un WIP costante è necessario mantenere input e output allo stesso livello
2. Se si desidera diminuire WIP è necessario diminuire temporaneamente l'input
3. Se si desidera aumentare WIP è necessario aumentare temporaneamente l'input
4. Se si desiderano dei lead times medi a un certo livello, è necessario rivedere il rapporto WIP/Output
5. Se si desidera che i lead times siano gli stessi per ogni famiglia di prodotti è necessario utilizzare una regola di priorità FIFO

Partendo dal controllo di input ed output, si riesce a modellizzare e quantificare la relazione tra input, output, lead times e Wip. Nel lungo periodo andando a operare secondo WLC si assiste a una distribuzione della curva di input-output, che assomiglia molto a quella ideale e permette di considerare al suo interno tutta una serie di guasti o anomalie che in realtà sono normali nel mondo manifatturiero.

La figura seguente schematizza al meglio le aree di competenza del WLC e le diverse ottiche di breve-lungo periodo utilizzate.

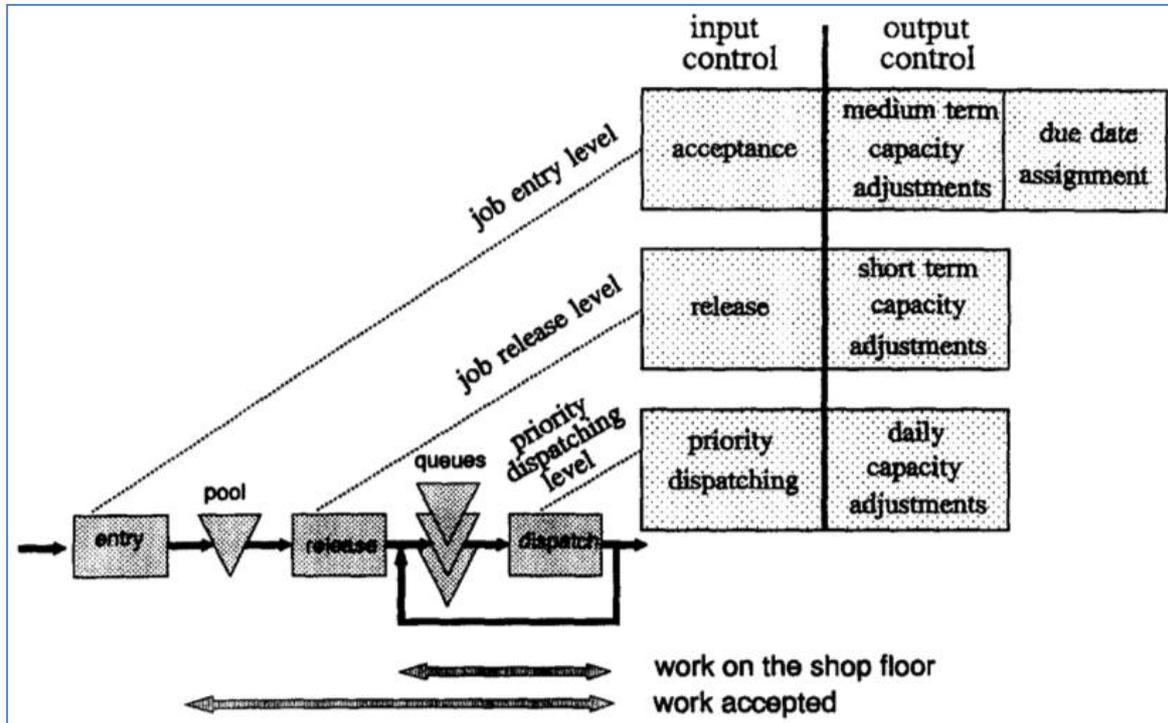


Figura 7 Le aree di competenza del WLC

L'input dello stadio di Order Entry è dunque l'ordine confermato dal cliente, ma non ancora accettato dall'azienda; l'input dello stadio di Order Release è l'ordine accettato dall'azienda, ma ancora in attesa di essere rilasciato nello Shop Floor; l'input dello stadio di Priority Dispatching sono gli ordini, ormai associati a dei jobs, rilasciati nello Shop Floor ed in arrivo alle stazioni di lavoro. Il controllo degli input è realizzato dal sistema che implementa i principi WLC, il quale decide se e quando permettere ad un ordine di proseguire allo stadio successivo.

Gli output di ciascuno stadio sono strettamente legati alla capacità produttiva ed il sistema di Pianificazione della Produzione (Production Planning) opera sulla regolazione e controllo degli stessi secondo i principi WLC ed in base alle autonomie decisionali di cui ogni livello dispone. I tre stadi possono infatti intervenire sull'allocazione della capacità produttiva disponibile rispettivamente a medio termine, a breve termine, quotidianamente. Lo stadio di Order Entry dispone inoltre della capacità di assegnare delle date di consegna previste agli ordini in arrivo

3.3 Attività principali delle metodologie Order Review and Release (ORR).

Per una migliore comprensione delle principali attività cui si dedicano le metodologie ORR si fa riferimento alla schematizzazione riportata da Bergamaschi, et al., 1997. Nella figura sottostante è riportato il sistema di pianificazione e controllo della produzione tipico di un'azienda del settore MTO. Le metodologie ORR entrano nella fase centrale del sistema, andando a gestire il flusso degli ordini in ingresso allo Shop Floor e decidendo di volta in volta quali rilasciare, ponendosi come punto di incontro tra la fase a monte di pianificazione e la fase a valle di esecuzione.

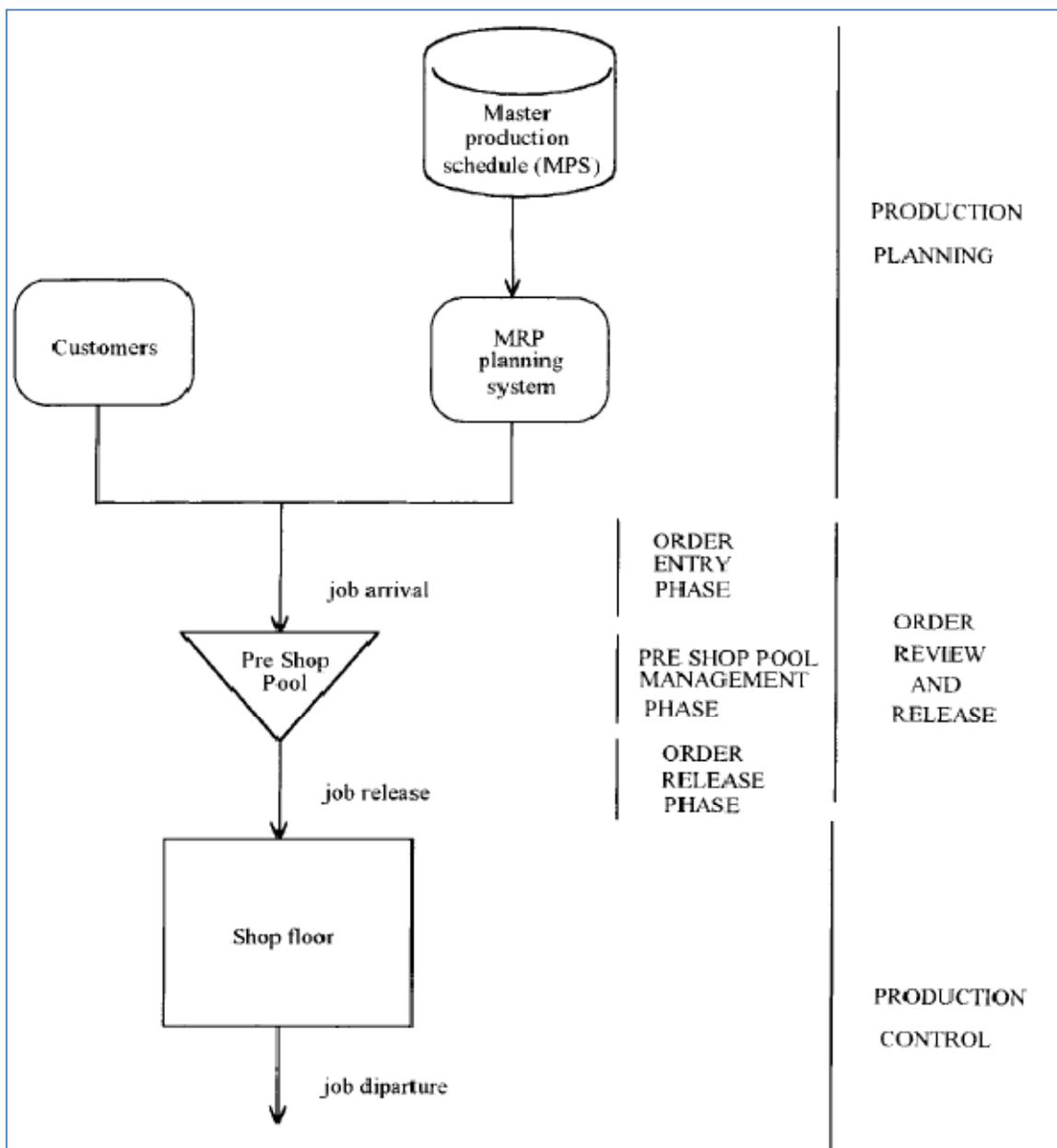


Figura 8 Posizione delle metodologie ORR all'interno del sistema di pianificazione e controllo

In breve si descrivono ora le tre macrofasi:

1. **Production Planning:** è la fase di pianificazione della produzione, in cui ci si occupa essenzialmente di determinare le risorse produttive e gli approvvigionamenti necessari (generalmente tramite MRP) per rispondere ad una domanda di prodotti.

2. **Order Review and Release:** fase principale e argomento della tesi è costituita da tre sottofasi:
 - a. Ingresso dell'ordine (Order Entry)
 - b. Gestione del portafoglio ordini (Preshop Pool management)
 - c. Rilascio degli ordini (Order Release)

Questa fase, che verrà descritta con maggiore dettaglio in seguito, ponendosi come punto di incontro tra la schedulazione, il controllo della produzione di tutti i giorni e la pianificazione di medio periodo della produzione, consente una gestione più efficiente e un miglioramento delle performance di sistema in termini di WIP e delivery.

3. **Production control:** in questa macrofase avviene il controllo di avanzamento della produzione. Gli ordini rilasciati nel sistema passano per le risorse produttive seguendo il routing assegnato e con un sequenziamento definito. Nel momento in cui un ordine esce dall'ultimo stadio produttivo, lo si considera pronto per la spedizione.

Il controllo del carico avviene secondo una precisa struttura gerarchica, come inizialmente teorizzato in Hendry & Kingsman 1991 ed in seguito meglio dettagliato dallo stesso Kingsman e dai suoi colleghi, fra cui L.C.Hendry ((Kingsman, & Hendry 1991; Kingsman, et al., 1996; Kingsman & Hendry 2002)).

Una struttura paragonabile a quanto descritto da (Bergamaschi, et al., 1997) presente in letteratura si può trovare in Stevenson & Hendry 2006. Lo schema sviluppato dagli autori consiste nei seguenti stadi che vengono attraversati sequenzialmente da un ordine: customer enquiry stage, job entry, job release, priority dispatching, delivery. Il primo e l'ultimo stadio citati sono responsabili di un aumento del lead time di consegna, calcolato come il tempo che intercorre fra l'istante in cui il cliente chiede di formulare un'offerta e l'istante in cui il prodotto viene consegnato; lo stadio di customer enquiry, infatti, è relativo al processo di ricezione dell'ordine e formulazione dell'offerta, mentre lo stadio di delivery è comprensibilmente il processo che permette all'ordine completato di raggiungere la destinazione desiderata dal cliente. Ai fini della nostra trattazione, tuttavia, gli stadi

appena citati non sono particolarmente rilevanti e dunque saranno trascurati; considereremo invece la struttura gerarchica composta dagli stadi di job entry, job release, priority dispatching.

Ecco una sintetica descrizione delle funzioni che svolgono:

1. **job entry stage**: si occupa di accettare o rifiutare gli ordini. In alcuni contesti ed a certi livelli di domanda, la riduzione del numero di ordini accettati porta a maggiori profitti per l'impresa (Philipoom and Fry 1992), la quale è più facilmente in grado di contenere i lead time di produzione;
2. **job release stage**: questo stadio determina l'istante in cui un ordine sarà rilasciato nel sistema produttivo;
3. **priority dispatching**: consiste nella determinazione dei criteri di scelta del successivo job da lavorare in ogni stazione, nel momento in cui la stazione stessa ha terminato il job in corso di lavorazione o addirittura nel momento stesso in cui un job molto urgente arriva alla stazione (nella realtà dell'ambito manifatturiero la priorità di tipo preemptive è in effetti applicata in casi molto limitati).

Si passa ora ad una trattazione più specifica delle tematiche ORR e delle parti che compongono tale metodologia.

Gli obiettivi principali dell'ORR consistono nel controllo del WIP e nel bilanciamento del carico di lavoro tra le varie macchine del sistema. Questi obiettivi permettono il raggiungimento di un'elevata saturazione dell'impianto, unita a un netto miglioramento delle performance di sistema in termini di delivery, quindi legate al tempo, alla puntualità, al poter garantire dei lead time più brevi con maggiore sicurezza.

Bechte 1988 è il primo a suddividere le varie fasi dell'ORR in Order Entry, Preshop Pool Management e Order Release.

Nella sezione successiva verranno presentate in maniera dettagliata le tre fasi individuate secondo lo schema di Bechte, 1988.

3.4 Order entry phase (mid term capacity planning)

Questa fase iniziale è l'interfaccia del sistema con la fase a monte di pianificazione degli ordini. Gli ordini in ingresso possono derivare da due fonti differenti: MRP e richieste dirette dei clienti. Unitamente all'ingresso degli ordini vengono svolte le attività di ingegnerizzazione se richieste, si verificano le disponibilità di materiali, si identificano le lavorazioni e gli utensili necessari, infine si stima una Due Dates di consegna del prodotto. Più nel dettaglio:

1. Si recupera o si definisce la sequenza delle operazioni che il job deve eseguire, e si controlla la disponibilità degli utensili e dei programmi per il comando delle macchine a controllo numerico computerizzato;
2. Si genera una lista di prelievo del materiale necessario e si verifica la disponibilità degli articoli richiesti;
3. Si assegna una data di completamento per ciascun ordine, nel caso in cui le date di consegna siano stabilite all'interno del sistema di pianificazione e controllo
4. Non appena si verifica la disponibilità di informazioni, materiali, utensili, attrezzature e di tutte le altre risorse richieste, l'ordine viene inserito nel portafoglio degli ordini da realizzare.

Nella sua analisi Bechte identifica inoltre lo stretto legame necessario tra order entry e mid term capacity, ciò significa riuscire a creare una corrispondenza nel medio periodo tra la propria capacità produttiva e gli ordini presenti nella Preshop Pool.

Un'assunzione comune della letteratura sviluppatasi a partire da Bechte, che ben simula il comportamento delle aziende MTO, consiste nell'accettazione di tutti gli ordini giunti a sistema, senza effettuare dei controlli sulla capacità. Ciò comporta un sistema produttivo difficilmente bilanciabile, dove i miglioramenti delle performance sono ridotti rispetto a sistemi dove il controllo del carico avviene già nella prima fase.

I primi a sviluppare questa teoria e ad introdurre un controllo del carico in questa fase sono Philipoom e Fry nel 1992, creando una procedura euristica che consente di rifiutare gli ordini giunti

a sistema nel momento in cui la Preshop Pool sia satura in termini di giorni di lavorazione. Utilizzando questa tecnica dimostrano come le performance di sistema migliorino considerevolmente principalmente per una diminuzione consistente del WIP, che quindi determina un carico minore di sistema e minore complessità. Studi successivi di Zapfel & Missbauer 1993, Hendry & Wong 1994 portano alle medesime conclusioni e all'identificazione degli stessi fattori di successo.

Kingsman ed Hendry nel 1993 sviluppano una metodologia di controllo del carico conosciuto come LUMS (Lancaster University) basato sul controllo dell'input già nell'entry stage. Anch'essi validano il tutto mediante simulazione, mostrando i miglioramenti ottenuti nelle performance. Hendry, et al., 1998 mostra come il controllo del carico effettuato in questa fase consenta un raggiungimento di migliori performance in termini di Due Dates. Kingsman & Hendry 2002 mostrano come il solo controllo dell'input non basti, sviluppa di conseguenza una metodologia in cui non si eliminano gli ordini che sovraccaricano il sistema ma agendo sull'output, si aumenta la capacità produttiva nel periodo in cui è necessario, per esempio aggiungendo un operatore o un turno di lavoro.

Land & Gaalman 1996 mostrano che una fase di order entry che garantisca l'ingresso in Preshop Pool di ordini molto simili dal punto di vista produttivo, permette performance decisamente migliori e Due Dates più facilmente stimabili e preventivabili. In particolare si individua come fondamentale la riduzione del numero di job in Preshop Pool e di conseguenza una riduzione importante del tempo di attraversamento di sistema.

3.5 Preshop pool management phase

La Preshop Pool è un'area di immagazzinamento, solitamente un database, composta dagli ordini di produzione già processati dalla fase di ingresso ma non ancora rilasciati. Questa vasca può contenere il materiale richiesto per la produzione oppure, semplicemente, può essere composta da fogli di carta che descrivono le lavorazioni da compiere. Nessun ordine può raggiungere l'impianto senza passare dalla Preshop Pool Hendry & Wong 1994, in cui gli ordini sono disposti in coda secondo diverse regole di priorità. Fatta eccezione di Baker 1974 che presenta un sequenziamento degli ordini in base alla logica FCFS, gli autori presenti in letteratura utilizzano delle modalità di sequenziamento differenti, riportate di seguito:

1. **Earliest Due Dates (EDD)**, logica che ordina gli ordini in base alla data di consegna preventivamente determinata. Al momento del rilascio si rilasciano gli ordini secondo la sequenza determinata finché non viene saturata la capacità del sistema. (Mabert, et al., 1988)
2. **Earliest release date (ERD)**, logica secondo la quale si pongono ai primi posti gli ordini caratterizzati da una data di rilascio preventivamente determinata minore. Anche in questo caso al momento del rilascio si rilasciano gli ordini finché non viene saturata la capacità. (Bechte, 1988), (Perona, et al., 1996))
3. **Critical Ratio (CR)**. Metodologia sviluppata da (Bobrowsky, 1989), si basa sul calcolo di un rapporto, il critical ratio, che indica l'anticipo o il ritardo del tempo di completamento di un job rispetto alla schedulazione. Calcolando quindi il rapporto tra il tempo di completamento derivante dalle attuali condizioni del sistema e il tempo di completamento preventivato si cerca di bilanciare il carico tra le varie stazioni, ordinando gli ordini in base al critical ratio.
4. **Capacity slack based rule (CSBR)**. Si assegna la priorità ai job aventi minore differenza tra la Due Dates e il tempo di lavorazione. Tale tempo di lavorazione considera la capacità del sistema in tempo reale, cercando un miglior sequenziamento. (Philipoom e Fry 1992)

Appare evidente come la funzione principale della Preshop Pool sia quella di impedire un rilascio eccessivamente anticipato dei job presenti. Agendo tramite il sequenziamento vengono considerati solo quei job la cui Due Dates o data di rilascio o altri indicatori particolari siano entro valori desiderati, evitando poi il manifestarsi di WIP inutile o di prodotti ultimati troppo presto che devono essere stoccati con relativi costi. Tale scelta spinta dalle politiche di gestione come il Just in Time o il Lean Manufacturing sono molto importanti ai fini del raggiungimento degli obiettivi proposti di razionalizzazione e riduzione del WIP nello Shop Floor.

Philipoom, et al., 1993 mostra come la scelta di una politica di sequenziamento adeguata all'interno delle Preshop Pool sia fondamentale nel garantire l'efficacia delle procedure ORR e quindi ha un impatto significativo sulle performance complessive.

3.6 Order Release phase

La chiave del successo di una strategia ORR risiede nella disponibilità di una buona tecnica per selezionare gli ordini dalla Preshop Pool. I criteri utilizzati per determinare quale job deve essere rilasciato sono chiamati “ meccanismi di controllo dell'input” e possono richiedere tre tipologie di informazioni:

1. Stato corrente delle Preshop Pool ovvero quanti e quali ordini sono presenti nel portafoglio
2. Stato corrente dello shop ovvero quali ordini sono già stati rilasciati a sistema, a quale centro di lavoro sono in attesa di lavorazione e quale sia la capacità dello shop ancora disponibile.
3. Le prestazioni pianificate dell'impianto in termini di manufacturing lead times e quindi tempo di attraversamento del sistema e di puntualità delle consegne.

La selezione degli ordini da inserire nel sistema garantisce un controllo molto più accurato del WIP e di conseguenza dei Lead Times produttivi. Tramite il rilascio degli ordini è inoltre possibile determinare il mix di ordini presenti, andando quindi a livellare la produzione su tutte le macchine evitando la formazione colli di bottiglia (Bechte, 1988). Sempre secondo Bechte 1988 il funzionamento del meccanismo di rilascio degli ordini in produzione è il seguente : avendo determinato a partire da Lead Times prevedibili le Due Dates, si determina una time limit, ovvero un intervallo creato per evitare il rilascio di ordini troppo presto. Partendo da ordini con priorità più elevata, si vanno a rilasciare nel sistema tutti quelli che permettono di rispettare le Load Limit. Il risultato è che una parte degli ordini rimane in un pool di job non realizzati, che bufferizza sistema . La fase di rilascio degli ordini persegue quindi implicitamente un duplice obiettivo di timing e bilanciamento dei carichi, andando a rilasciare gli ordini sulla base delle Due Dates e dello stato in cui si trova lo Shop Floor (Bechte, 1988)(Land & Gaalman, 1996).

Secondo Land & Gaalman 1996, la fase di release è fondamentale in quanto determina il WIP di sistema e la lunghezza delle code di fronte alle macchine, molto importanti per ottenere delle ottime performance in termini di Lead Times e Due Dates. Effetto principale dell'Order Release è il buffer che aiuta il sistema a ripararsi oltre che da variabilità esterna anche da una serie di problemi accessori come ordini cancellati, ordinazioni posticipate di materiali.

La fase di Order Release è la più studiata all'interno dell'ORR, numerose sono le attenzioni dedicate dagli autori negli anni a questa parte e di conseguenza può essere considerata come la parte più importante. Data la forte rilevanza della fase di Order Release, molti autori hanno proposto vari modelli con caratteristiche differenti. Il lavoro di Bergamaschi, et al., 1997 mostra le diverse componenti strutturali dei modelli di rilascio ed è quindi rilevante da essere analizzato.

3.7 La classificazione di Bergamaschi et al 1997

La classificazione presentata si sviluppa in otto dimensioni differenti:

1. Order Release mechanism (modalità di rilascio degli ordini)
2. Timing convention (convenzione temporale)
3. Workload measure (modalità di misurazione del carico intesa come numero di job o tempo di lavorazione)
4. Aggregation of workload measure (aggregazione delle misure del carico di lavoro)
5. Workload accounting overtime (modalità di rilevazione del carico)
6. Workload control (modalità di limitazione o controllo del carico di lavoro)
7. Capacity planning (pianificazione della capacità)
8. Schedule visibility (visibilità della schedulazione)

Si analizzano ora punto per punto le diverse dimensioni in modo da fornire un quadro esauriente della letteratura in merito alle tecniche di Order Review e Release.

3.7.1 Order Release mechanism

Le differenti modalità di rilascio degli ordini presenti in letteratura sono suddivisibili in due categorie:

1. Load Limited
2. Time Phased

La prima categoria è quella che ha ricevuto maggiore attenzione da parte dei ricercatori e dei production manager e consiste nel rilascio periodico, solitamente giornaliero, degli ordini sulla base del carico presente all'interno dello Shop Floor e del contenuto di lavoro per ogni stazione dei singoli job. Utilizzando questa modalità bisogna identificare delle regole che consentano una scelta ottimale dei job presenti nella Preshop Pool da rilasciare.

La seconda categoria invece si preoccupa di calcolare una data di rilascio degli ordini ricevuti e di rilasciarli al momento opportuno. Non si ha quindi un momento particolare in cui vengono rilasciati più job sulla base della situazione presente nello Shop Floor. Al contrario il rilascio avviene senza tenere in considerazione il carico all'interno del sistema produttivo, si considerano solamente le informazioni relative ai vari job come Due Dates, Routing e tempi di lavorazione.

In letteratura si ritrovano maggiormente tecniche di ORR che utilizzano la prima modalità di rilascio dei job per via della maggiore semplicità ed efficacia nel controllo del WIP di sistema e nel controllo del bilanciamento del carico nelle varie stazioni. Questa modalità sarà poi utilizzata sia nel modello di bilanciamento dei carichi di lavoro proposto, sia nel metodo di limitazione EDD utilizzato come riferimento.

Altri autori come Mabert & Ragatz 1988 e Philipoom, et al., 1993 hanno mostrato come una procedura Time Phased sia maggiormente performante nel momento in cui si utilizzino delle regole di dispatching non orientate alle Due Dates, suggerendo quindi un facile utilizzo di questa modalità per l'uso in contesti reali.

3.7.2 Timing convention

La convenzione temporale determina quando può avvenire il rilascio di un ordine. Anche in questo caso ci si riferisce a due differenti categorie:

1. Continuo
2. Discreto

Come è facilmente intuibile nel primo caso il rilascio può avvenire in qualunque istante di tempo. E' una modalità che ben si accompagna con una modalità di rilascio Time Phased in cui si ha la necessità di poter rilasciare un ordine in un qualunque momento, in modo da rispettare le date di

rilascio prestabilite. Un rilascio continuo lo si può trovare nelle più classiche tecniche di gestione delle scorte come l'EOQ che richiede un controllo e un ripristino continuo degli stock.

Più utilizzata per la maggiore praticità e di conseguenza più studiata dai ricercatori è la convenzione temporale discreta in cui si effettua un rilascio periodico degli ordini che ben si associa al reale funzionamento dei sistemi produttivi in cui di norma si fanno rilasci periodici giornalieri.

Spinti dalla maggiore diffusione e praticità della convenzione discreta, nel modello di bilanciamento si utilizzerà tale modalità.

3.7.3 Workload measure

Per una corretta valutazione dell'impatto causato sullo Shop Floor da parte del rilascio dei job è necessario identificare la modalità migliore di misurazione del carico di lavoro. Anche in questo caso ci si riferisce a due categorie:

1. Numero di job
2. Work quantity

Nel primo caso per controllare il carico rilasciato ci si limita a considerare il numero dei job. Tale modalità è poco utilizzata e studiata in letteratura in quanto tutti gli autori ritengono che essa eserciti un controllo troppo blando sul carico. Lavorando in un contesto con elevata variabilità sia in termini di tempi produttivi che di routing, la sola informazione del numero di job rilasciati non consente un controllo puntuale del carico nel sistema.

Nel secondo caso invece la misurazione del carico di lavoro avviene in due modalità:

1. Misurazione del tempo di lavorazione espresso in ore
2. Misurazione del tempo di lavorazione espresso come percentuale della capacità produttiva occupata.

In letteratura fatta eccezione di due pubblicazioni ad opera di Melnyk 1988 e Philipoom et al 1993, si ritrovano solamente approcci di misurazione del carico basati sulla quantità di lavoro.

Anche nel modello di bilanciamento studiato si è scelto di utilizzare tale modalità.

3.7.4 Aggregation of workload measure

Utilizzando una modalità di Order Release Load Limited l'aggregazione delle misure dei carichi di lavoro può essere suddivisa in tre categorie differenti:

1. Total shop load
2. Aggregazione per bottleneck
3. Aggregazione per singola stazione

Tali modalità di aggregazione del carico di lavoro si traducono nella pratica in investimenti più o meno ingenti per quanto riguarda il controllo dello Shop Floor ed i relativi costi da sostenere a livello di sistema informativo. Le tre modalità sono completamente differenti da questo punto di vista: mentre per quanto riguarda la modalità Total Shop Load non è necessario conoscere la posizione dei job all'interno del sistema, evitando qualunque tipologia di costo annesso, per le altre due modalità è necessario disporre di sistemi di controllo più sofisticati e costosi. È facilmente comprensibile come una modalità di aggregazione stazione per stazione sia di difficile implementazione rispetto ad una modalità Total Shop Load in cui si registrano solamente i job entrati ed usciti dal sistema produttivo. Viene ora presentata una descrizione più dettagliata delle tre categorie andando ad analizzare i principali contenuti presenti in letteratura.

Parlando di Total Shop Load si fa riferimento alla modalità sviluppata da Melnyk & Ragatz1989 in cui l'aggregazione del carico era sull'intero sistema e il rilascio avveniva nel momento in cui il carico di sistema scendeva oltre una determinata soglia.

Questa modalità però non consentiva un'agevole gestione di sistemi in cui erano presenti dei colli di bottiglia, per questo motivo successivamente si è scelto di controllare non più il carico complessivo o total shop load, ma il carico presente nelle stazioni più critiche, cercando di evitare l'idle time.

Infine utilizzando una modalità di rilevazione più complessa è possibile aggregare il carico per ogni singola stazione, consentendo una migliore gestione dello Shop Floor. Questo maggior controllo comporta un suo maggiore utilizzo nella letteratura inerente i job shop dove il controllo di ogni singola stazione è fondamentale. Una misurazione per ogni stazione richiede un sistema di raccolta dati più completo e complesso rispetto all'aggregazione total shop o bottleneck purtroppo non facilmente ottenibile in un sistema reale.

Tutti gli autori compresi gli stessi Melnyk & Ragatz 1989 concordano sulla necessità di un'aggregazione della misura per stazione in quanto consente il raggiungimento di performance decisamente migliori a dispetto della maggior complessità di implementazione.

Una delle maggiori problematiche (Bergamaschi, et al., 1997) inerenti l'implementazione di un sistema di aggregazione del carico differente dal Total Shop Load consiste nella raccolta delle informazioni necessarie. Un'aggregazione del carico per singola stazione necessita di un sistema di data collection e data reporting per ogni singola macchina, con conseguente aumento dei costi di impianto.

E' necessario risolvere un trade-off tra i vantaggi derivanti da un maggiore controllo sul sistema e il costo che questo maggiore controllo comporta.

Nel modello di bilanciamento presentato si è scelta una modalità di aggregazione di tipo total shop load, di gran lunga più economica rispetto alle altre aggregazioni.

3.7.5 Workload accounting over time

Questa dimensione è particolarmente critica in quanto se si sceglie di misurare il carico per ogni stazione, esso deriva da tre componenti non facilmente calcolabili ed identificabili:

1. Load on hand, ovvero il carico presente in coda in ogni stazione
2. Load in transit, ovvero il carico derivante da job non ancora in coda alla stazione in quanto impegnati nelle lavorazioni a monte
3. Load released, ovvero il carico rilasciato che diventa Load on hand per la macchina successiva e Load in transit per le altre stazioni più a valle.

Le difficoltà pratiche nella quantificazione delle tre componenti identificate derivano dalla necessità ancora una volta di conoscere la posizione di ogni singolo ordine all'interno del sistema produttivo, il che comporta investimenti a livello informativo in modo da avere sempre sotto controllo tutti i job che transitano per lo Shop Floor.

Per le stazioni definite Gateway , poste all'inizio del routing dei job calcolare il carico presente è molto semplice in quanto non risentono del Load in transit essendo le prime. Diventa un problema più complesso per stazioni generiche dove non è facilmente identificabile il momento specifico in cui i job entrano in coda.

Per risolvere tale problema sono presenti tre modalità di calcolo dei carichi di lavoro:

1. Approccio atemporale
2. Approccio probabilistico
3. Time bucketing

L'approccio atemporale è il più semplice dei tre e consiste nell'allocare direttamente al momento del rilascio il contenuto di lavoro del job nelle stazioni senza che esso sia necessariamente presente in coda. Questa modalità comporta un'approssimazione del carico realmente presente in macchina in quanto non distingue il Load on hand dal Load in transit. Hendry 1991 sviluppa un modello basato su un approccio atemporale molto citato in letteratura.

L'approccio Time bucketing si preoccupa di calcolare il carico di lavoro presente in ogni stazione suddividendo l'orizzonte temporale in periodi (o time bucket) e determinando il momento in cui i vari job si trovano in coda nelle diverse stazioni. Questa tecnica calcola solo il Load on hand preoccupandosi di determinare in quale periodo o bucket il job entra in coda ad ogni stazione. Sono necessarie delle operazioni di schedulazione iniziale per una corretta allocazione delle operazioni nei periodi di tempo.

Il terzo e ultimo approccio detto Probabilistico è la base del Load Oriented Manufacturing Control sviluppato da Bechte 1988. Questo particolare approccio differisce dall'Atemporale in quanto esiste la differenziazione tra Load on hand e Load in transit. L'approccio di Bechte si preoccupa di calcolare il carico presente in ogni stazione come prodotto tra il tempo di lavorazione del job e la probabilità che il job raggiunga la coda della stazione nel periodo di riferimento. A differenza del Time bucket però l'allocazione dei tempi avviene solo per il primo periodo e non per i successivi.

In letteratura non è possibile individuare una categoria prevalente sulle altre in quanto ognuna pare funzionare se inserita nel giusto contesto.

Per una migliore comprensione delle differenti modalità di workload accounting si riportano brevemente nei prossimi due paragrafi le metodologie più importanti che si ritrovano in letteratura per quanto riguarda l'approccio probabilistico ed atemporale.

Per il modello di bilanciamento presentato si è scelto l'approccio Atemporale, a nostro avviso più indicato per la gestione di uno Shop Floor molto complesso.

3.7.5.1 Metodo WLC sviluppato all'IFA di Hannover

La procedura di rilascio ideata da Bechte nel 1988 si basa sulla teoria dell'input output, grazie alla quale agendo sul carico di lavoro nel sistema produttivo si ottengono delle performance importanti in termini di Lead Time e livello del Wip. Per questo motivo uno dei parametri fondamentali della procedura è la Load Limit ovvero il carico di lavoro massimo che può essere presente in macchina o a sistema. Tale parametro viene definito nel seguente modo:

$$\text{Load Limit} = ((\text{Planning period} + \text{Planned lead time}) / \text{Planned period}) * 100$$

La Load Limit indica la percentuale di carico oltre la capacità produttiva nel periodo di riferimento che vado a considerare. Tale misurazione del carico a sistema consente di livellare la produzione su tutte le macchine e di conseguenza permette una stima molto più efficace dei tempi di attraversamento di sistema in quanto sono meno variabili.

Il rilascio dei job avviene all'inizio di ogni periodo di rilascio, prendendo in considerazione i job presenti nella Preshop Pool ordinati per data di consegna. Vengono considerati validi per il rilascio solo quei job la cui data di consegna rientra nella time limit, un periodo di qualche giorno entro il quale la data di rilascio deve cadere per evitare due eventi: un rilascio preventivo che causi scorte inutili o un rilascio ritardato, che crei ritardi nelle consegne. Vengono rilasciati quindi quei job la cui data di rilascio sia entro valori stabiliti, che si trovano nelle prime posizioni della Preshop Pool, finché il carico di lavoro allocato alle stazioni non superi la Load Limit. I rimanenti job attendono nella Preshop Pool fino al prossimo periodo.

La Load Limit per Bechte di una stazione è composta da due componenti: l'output pianificato durante il periodo di rilascio e la lunghezza della coda pianificata alla fine del periodo (Land & Gaalman 1996, Oosterman et al 2000). Il tutto deve bilanciare la seguente equazione :

$$Q_s^E + O_s = Q_s^B + I_s$$

Con:

- Q_s^E la lunghezza delle code nella stazione s al termine del periodo di rilascio precedente.
- Q_s^B la lunghezza delle code nella stazione s all'inizio del periodo di rilascio corrente

- O_s l'Output nella stazione s nel periodo di rilascio precedente
- I_s l'Input nella stazione s del periodo di rilascio corrente

Il rilascio deve garantire che il primo membro dell'equazione sia minore della Load Limit.

Il secondo membro dell'equazione indica il carico diretto all'inizio del periodo di rilascio che deriva dalla somma di due componenti: i job presenti in coda alla stazione s Q_s^B , e l'input derivante dal rilascio e dai job che nel periodo di riferimento entreranno in coda I_s , dopo aver effettuato le lavorazioni a monte.

Il primo membro corrisponde all'output della stazione nel periodo di riferimento e ai job in coda alla macchina al termine del periodo di rilascio.

Le due parti non sono facilmente identificabili in quanto l'output dipende dalle caratteristiche del sistema, e il carico diretto dipende a sua volta dall'output della stazione. Per tale motivo Bechte sviluppa il meccanismo della Load Conversion che permette di stimare il carico diretto nelle varie stazioni.

La stima del carico di lavoro diretto alle macchine mediante un approccio probabilistico avviene associando a una stazione il carico diretto del job moltiplicato per la probabilità che nel periodo di rilascio il job entri in lavorazione nella stazione stessa. Questo espediente è generato dalla seguente osservazione: applicare una Load Limit alle macchine dette gateway, ovvero poste a monte del sistema produttivo, non crea grosse difficoltà, in quanto la maggior parte del lavoro per la macchina è già presente in coda, viceversa andando a valle del sistema, il carico di ogni macchina è sempre più indiretto, proveniente dalle altre stazioni e non dal rilascio diretto di ordini. Bechte sviluppa per questa ragione un approccio probabilistico di allocazione dei tempi di lavorazione alle macchine, il cui principio base di funzionamento è il seguente: definire la probabilità che il job j entri in coda alla macchina i nel periodo di rilascio e quindi allocare alla macchina la quantità di lavoro del job moltiplicata per la probabilità determinata. Semplificando, questo metodo alloca bassi tempi produttivi per i job a monte rispetto alle macchine a valle, permettendo a queste ultime di avere sempre job da lavorare. La formulazione matematica è la seguente :

LL = Load Limit, ovvero il carico di lavoro massimo presente nell'intero sistema. Solitamente equivale alla capacità produttiva nel periodo di riferimento più una norma.

Ln = Load Portion, ovvero il carico di lavoro diretto in macchina derivante dal job j

D_n = Load distance, ovvero il numero di stazioni comprese nel routing tra la stazione i e la stazione in cui si trova il job j

$L_n^* = L_n * (100 / LL) ^{D_n}$, in questa formulazione avviene il calcolo del carico allocato alle varie stazioni.

La formulazione mostrata permette di regolare il carico allocato da un job alle varie stazioni a seconda della distanza nel proprio routing e dal livello di Load Limit selezionato. I due fattori sono infatti determinanti in quanto se il sistema è molto carico è poco probabile che i job raggiungano stazioni lontane nel routing nel breve periodo o comunque entro il periodo di rilascio; è molto probabile invece che trascorreranno molto tempo in coda. Al diminuire invece della Load Limit e della distanza nel routing il carico aumenta così come la probabilità annessa.

3.7.5.2 La metodologia sviluppata ad Eindhoven e Lancaster

La procedura di rilascio di Bertrand utilizza una misurazione del carico di lavoro alle varie stazioni di tipo aggregato. A differenza di Bechte che come mostrato in precedenza usa un approccio probabilistico, in questo caso il carico di una stazione è composto da due componenti, il carico diretto e il carico indiretto. In questo caso però il carico indiretto è allocato completamente ad ogni stazione, evitando così la necessità di tenere conto della posizione del job nel routing (Oosterman et al 2000). Tale modalità come dimostrato da Oosterman et al 2000 si presta maggiormente al controllo del carico di sistemi in cui si riesce a definire un flusso predominante, assimilabili a dei General Job Shop, oggetto di tesi.

Da un'analisi effettuata da Land & Gaalman 1996 si identifica l'equazione da bilanciare per ottenere un carico sottoposto a Load Limit. La procedura è molto simile a quella di Bechte 1988, la differenza sostanziale consiste nel carico aggregato e non probabilistico.

$$(U_s^E + Q_s^E) + O_s = (U_s^B + Q_s^B) + R_s$$

Con:

- U_s^E il carico upstream della stazione s al termine del periodo di rilascio precedente
- Q_s^E il carico diretto della stazione s al termine del periodo di rilascio precedente
- O_s l'Output della stazione s al termine del periodo di rilascio precedente
- U_s^B il carico upstream della stazione s all'inizio del periodo di rilascio corrente
- Q_s^B il carico diretto della stazione s all'inizio del periodo di rilascio corrente
- R_s la quantità di carico rilasciata nel periodo corrente per la stazione s

Il secondo membro è completamente nota al momento del rilascio in quanto composta da R_s , la quantità rilasciata, U_s^B la quantità di lavoro a monte della stazione s all'inizio del periodo di rilascio, Q_s^B la quantità di lavoro in coda alla stazione s. Di conseguenza anche il primo membro è noto e può dunque essere sotto posta a norma o Load Limit, senza bisogno delle stime effettuate da Bechte sul carico di lavoro.

Particolarmente critico risulta il calcolo delle norme in quanto è difficile definire il livello obiettivo di carico al termine del periodo di rilascio per il carico upstream. Bertrand risolve il problema definendo la norma come combinazione di due componenti: il Planned Output nel periodo di rilascio PO_s e il carico medio di lavoro stimato nel sistema nello stesso periodo.

$$LL = PO_s + \frac{PO_s}{T} * \frac{\sum_{j \in J} NPFT_{js} * p_{js}}{\sum_{j \in J} p_{js}}$$

Questa definizione di norma garantisce norme adeguate per le stazioni più a valle essendo determinate dal Norm Pre Station Flow Time (NPFT) che determina il tempo di attraversamento del job dalla prima stazione alla stazione s. In questo modo si assegnano alle macchine più a valle delle norme più elevate, basandone il calcolo sui tempi produttivi dei job rilasciati e sull'output pianificato nel periodo di rilascio. Determinante risulta quindi la determinazione dei NPFT, argomento ancora in via di discussione, che lascia molti spazi alla ricerca.

3.7.6 Workload control

Il controllo del carico di lavoro presente nello Shop Floor può essere ottenuto mediante due modalità differenti:

1. Workload bounding o limitazione del carico
2. Workload balancing o bilanciamento del carico

Essendo le due differenti modalità oggetto di tesi, verranno descritte esaurientemente nei prossimi due paragrafi.

3.7.7 Workload limiting.

Parlando di workload bounding ci si riferisce all'utilizzo di parametri per limitare il carico presente all'interno dello Shop Floor. Controllando il carico di lavoro si riesce ad ottenere il disaccoppiamento tipico dell'approccio WLC che protegge il sistema produttivo dalla variabilità esterna ed interna. Se così non fosse il rilascio immediato dei job comporterebbe la risoluzione di tutte le problematiche produttive all'interno dello Shop Floor stesso causando inefficienze ed allungamento dei tempi produttivi.(Mitchell 2006)

Inoltre la limitazione del carico facilita i compiti in fase di pianificazione in quanto l'impianto produttivo è sotto controllo e garantisce dei tempi di attraversamento decisamente più stabili. (Breithaupt, et al., 2002)

La limitazione del carico è ottenuta andando a selezionare gli ordini in Preshop Pool ordinati solitamente secondo una logica EDD e rilasciandoli finché non viene superato un limite o bound detto norma. In questo modo si persegue un bilanciamento implicito del sistema in quanto l'algoritmo di limitazione cercherà di caricare le stazioni con un quantitativo il più possibile vicino alle norme imposte.((Land, et al., 2006), (Land & Gaalman 1998))

La limitazione del carico può essere suddivisa in tre tipologie differenti:

1. Upper bound only
2. Lower bound only

3. Upper and Lower bound

La prima categoria applica una limitazione del carico di lavoro mediante un limite superiore che non deve mai essere superato da parte del contenuto di lavoro degli ordini rilasciati. Agendo in questa maniera è possibile limitare il WIP di sistema ed ottenere manufacturing lead time con media e coefficiente di variazione minore, come dimostrato da Bechte, 1988.

La seconda categoria al contrario si preoccupa di garantire alle varie stazioni un quantitativo minimo di lavoro necessario a prevenire idle time, garantendo quindi per le stazioni collo di bottiglia il carico di lavoro necessario a prevenire inattività. Nel 2002 Cigolini e Portioli hanno dimostrato come tale modalità di limitazione del carico non sia particolarmente performante, a prescindere dalla modalità di calcolo del carico di lavoro.

La terza e ultima categoria applica una limitazione inferiore e superiore, cercando di raggiungere un bilanciamento dei carichi impedendo che l'upper limit imposto comporti un carico basso ad alcune stazioni.

Una delle problematiche di queste limitazioni consiste nel fatto che non è possibile rilasciare ordini il cui contenuto di lavoro causi un superamento dei limiti imposti. Può quindi accadere che ordini il cui rilascio garantirebbe un miglior carico di sistema non vengano rilasciati per via dei limiti superiori.

La tematica del workload bounding è stata molto studiata in letteratura, essendo il fulcro dell'approccio WLC. Uno dei primi studi effettuati da Land & Gaalman 1998 dimostrano come dei limiti troppo rigidi non consentano il rilascio di alcuni job causando di fatto un peggioramento delle performance in termini di Due Dates. Viceversa dei limiti meno rigidi appaiono come un carico di riferimento tendenziale ottenendo una limitazione non ottimale. Come conclusione delle sue ricerche Land afferma che per livelli bassi di WIP, quindi per norme non troppo elevate, un cambiamento dei limiti comporta delle grandi variazioni nelle performance del sistema.

Ricerche successive di Enns & Costa 2002 sostengono che un livello di carico troppo basso non consente di raggiungere delle performance in termini di throughput ottimali, mentre con livelli di carico troppo alti non si esercita il controllo necessario rendendo inefficace la limitazione.

Proseguendo le sue ricerche Land et al 2004 ha dimostrato come utilizzando dei limiti particolarmente bassi con una modalità di allocazione delle priorità nel rilascio di job grandi in termini di contenuto di lavoro, si ottengano delle performance di sistema soddisfacenti.

Cigolini & Portioli 2002 analizzano le performance della limitazione con le tre differenti tipologie di bounding dimostrando la superiorità del metodo upper bound only. Gli autori mostrano come l'applicazione di un lower e upper bound comporti una funzione obiettivo troppo sofisticata che si trova ad affrontare il problema di dover rilasciare molti job per superare i limiti inferiori ed allo stesso tempo di minimizzare il WIP di sistema. Tale obiettivo rende meno performante la doppia limitazione nei confronti dell'upper bound only.

In letteratura si trovano altre due modalità di limitazione del carico che utilizzano dei limiti meno rigidi allo scopo di migliorare le performance come suggerito da Land & Gaalman 1996. Come prima modalità ci si riferisce in particolare alla tecnica SLAR “superfluous load avoidance release”, sviluppata da Land & Gaalman 1998. Questa tecnica si concentra sulle macchine collo di bottiglia, andando a rilasciare ordini in modo tale da minimizzarne la starvation. Agendo in questa maniera si impedisce l'inutilizzazione della stazione più critica minimizzando allo stesso tempo il WIP. Il lavoro effettuato dagli autori prosegue quello di Glassey & Resende 1988 i quali furono i primi a proporre un metodo in cui si poneva un limite inferiore per le macchine collo di bottiglia, evitandone la starvation. Il rilascio avviene nel momento in cui il carico di lavoro delle macchine critiche scende sotto un determinato valore. Queste tecniche comportano quindi delle modalità di rilascio continue in modo da poter sempre sopperire a carenze nel buffer delle macchine collo di bottiglia.

La seconda metodologia che utilizza una limitazione non rigida è stata creata da Bechte nel 1988. Il funzionamento è il seguente: nel momento in cui il limite di carico su una stazione è raggiunto si cerca nella Preshop Pool un altro job da rilasciare anche se causa un superamento dei carichi nelle stazioni. Questo metodo in pratica garantisce il rilascio dei job con contenuto di lavoro elevato che invece con limitazioni rigide verrebbero rilasciati solo se le stazioni fossero molto scariche, causando quindi molto probabilmente un ritardo. Questa seconda metodologia si avvicina molto al bilanciamento di cui si parlerà più approfonditamente nel successivo paragrafo.

Infine Perona & Portioli 1998 mostrano come le performance della limitazione sono fortemente legate al tempo che trascorre tra due rilasci successivi. Per job grandi è necessario che le stazioni si trovino molto al di sotto del limite di carico imposto, condizione ottenibile nel caso in cui il rilascio non avvenga molto frequentemente e le varie stazioni abbiano il tempo di scaricarsi a sufficienza. Inoltre dei periodi di rilascio troppo brevi non consentono il rispetto delle Due Dates preventivate per job a contenuto di lavoro elevato. Dei periodi di rilascio brevi invece garantiscono un maggiore

controllo sul sistema produttivo e favoriscono l'inserimento di job piccoli che solitamente hanno Due Dates più brevi.

3.7.7.1 Il paradosso del Workload Control

Stevenson, et al., 2006 espone in maniera chiara il problema del paradosso del Workload Control. Si è osservato come nella pratica ci siano delle forti differenze rispetto ai risultati sperimentali ottenuti tramite simulazione sulle performance del Workload Control. Nonostante alcune implementazioni di successo (Bechte, 1988) le simulazioni hanno mostrato in certi casi delle performance in termini di Lead Times peggiori nel caso di utilizzo della Preshop Pool. (Bertrand e Van Ooijen 2002) mostrano come nella pratica si ottengano riduzioni dei Lead Times pari al 40-50% mentre nelle simulazioni i miglioramenti sono solo di pochi punti percentuali nei casi migliori mentre per alcune simulazioni come già precisato in precedenza ci sono addirittura dei peggioramenti. (Breithaupt, et al., 2002) cerca di spiegare questa incongruenza andando ad analizzare i modelli simulati e concludendo che le peggiori performance sono dovute ad un set di ordini tra cui scegliere quali rilasciare troppo piccolo, provocando di fatto delle performance peggiori per via del peggiore bilanciamento di sistema ottenibile.

Un altro aspetto trattato da (Van Ooijen e Bertrand 2003) vede nelle caratteristiche del comportamento umano che aumenta la produttività a seconda del carico di lavoro, un aspetto non modellizzato e comunque difficilmente modellizzabile tramite simulazioni. Sempre Bertrand e Van Ooijen mostrano come nei job shop reali ci sia un livello di carico ottimale che ottimizza la produttività. Mediante le tecniche WLC in particolare viene facilitata la riduzione della congestione delle varie stazioni ottenendo una maggiore trasparenza dello shop, riducendo la pressione sui singoli operatori, permettendo inoltre alla pianificazione della produzione di avere un ruolo decisionale maggiore e con effetti decisamente più visibili. Nelle simulazioni inoltre si utilizza spesso un rilascio periodico dei job, mentre in un sistema reale può capitare che grazie alla maggiore trasparenza i lavoratori stessi abbiano la possibilità di chiedere il rilascio di job in modo che le stazioni si trovino con carichi vicini ai limiti imposti.

Kanet et al 1988 mostra come in realtà le tecniche di ORR riducendo lo Shop Floor Throughput Time causino un aumento del Preshop Pool Time non modificando o addirittura peggiorando i Lead Times totali. Queste considerazioni non trovano però fondamento nelle implementazioni pratiche

come Bechte, 1988 dove viene mostrato senza ombra di dubbio che le tecniche ORR comportano un grosso miglioramento nei Lead Times complessivi.

Un altro problema che concerne il Workload Control è il necessario feedback di informazioni da parte dello Shop Floor. Se da un lato questo è facilmente ottenibile durante le simulazioni, non lo è nei sistemi reali spesso carenti delle infrastrutture necessarie allo scambio di informazioni in tempo reale.

Come mostrato da Oosterman, et al., 2000 non tutte le simulazioni sono state negative. L'autore analizzando le performance delle varie tecniche di limitazione esistenti su differenti sistemi produttivi mostra come alcune tecniche siano molto performanti in certi casi mentre altre lo siano in altri sistemi. Oosterman, et al., 2000 mostra come approcci di tipo probabilistico funzionino meglio per i job shop mentre altri di tipo Aggregato ottengano migliori prestazioni con i flow shop, spiegando di fatto buona parte delle cattive prestazioni ottenute nelle ricerche precedenti.

3.7.8 Workload balancing

La seconda modalità di controllo del carico detta Workload balancing elimina il problema dei limiti rigidi andando a rilasciare ordini in modo da bilanciare i carichi tra le varie stazioni a costo di superare i limiti imposti. Secondo Bergamaschi et al 1997 la sola limitazione della lunghezza delle code non è sufficiente in quanto può accadere che alcune stazioni rimangano molto più insature di altre. Intervenire solamente sulla lunghezza media delle code e non anche sulla sua varianza può creare dei gravi problemi all'interno dello Shop Floor. Il bilanciamento invece garantendo dei livelli delle code decisamente più omogenei e meno variabili cerca di evitare i problemi sopra citati.

L'obiettivo del bilanciamento dunque è quello di minimizzare gli scostamenti dei carichi rilasciati nelle varie stazioni rispetto alla norma fissata. Il rilascio può comportare il superamento della norma su alcune stazioni a patto del raggiungimento di un miglior bilanciamento di sistema. A differenza della limitazione dove i job in Preshop Pool sono ordinati secondo criteri prestabiliti e vengono rilasciati in quell'ordine finché non viene superata una norma, nel bilanciamento la visibilità è estesa su tutta la Preshop Pool in modo tale da poter considerare ogni singolo ordine ai fini di minimizzare gli scostamenti tra contenuto di lavoro e capacità disponibile. Tramite il bilanciamento si ottengono tempi di attraversamento più stabili e stazioni con saturazioni omogenee, migliorando le performance di timing del sistema (Land & Gaalman, 1996).

Irastorza & Deane 1974 furono i primi a trattare il problema del bilanciamento dei carichi di lavoro nella fase di Order Release. La soluzione da loro proposta comprendeva la risoluzione di un problema di programmazione lineare mista intera che andasse a minimizzare lo scostamento dei carichi sulle singole stazioni nel rispetto delle date di consegna. La funzione obiettivo proposta era molto complessa e richiedeva dei tempi computazionali elevati. In particolare tre sono i termini che compongono la funzione obiettivo:

- 1- I sovra caricamenti delle stazioni
- 2- I sotto caricamenti delle stazioni
- 3- La data di consegna attesa, variabile a seconda del carico

I loro risultati sono soddisfacenti e dimostrano la superiorità del bilanciamento rispetto alla limitazione. Il livello di WIP a parità di throughput è inferiore per via del miglior dislocazione dei carichi di lavoro, garantendo dunque le stesse performance con meno ordini circolanti nel sistema.

Shimoyashiro, et al., 1984 confronta un modello di bilanciamento con orizzonte di schedulazione esteso con la limitazione. Anche in questo caso viene dimostrato come il bilanciamento dei carichi di lavoro garantisca dei tempi di attraversamento e dei ritardi inferiori, aumentando allo stesso tempo la saturazione delle macchine.

Questa capacità del bilanciamento di estendere l'orizzonte di schedulazione viene investigata da Melnyk & Ragatz 1989, confrontandola con la limitazione che invece persegue una schedulazione di breve periodo andando a rilasciare gli ordini su base periodica senza considerare i rilasci futuri.

Frendall & Melnyk, 1995 così come Perona & Portioli, 1998 ed Hendry, et al., 1998 dimostrano come la vera potenzialità di un meccanismo di rilascio si ottenga andando a schedulare su un orizzonte ampio, perseguendo un'ottimizzazione sul medio termine, minimizzandone la variabilità.

Di notevole interesse è la funzione di bilanciamento presentata da Cigolini & Portioli, 2002, dalla quale si è preso spunto per la creazione del modello di bilanciamento.

Tale funzione obiettivo si preoccupa di minimizzare gli scostamenti inferiori e superiori rispetto ai limiti imposti dei carichi rilasciati alle macchine. In particolare lo scostamento superiore è pesato maggiormente rispetto allo scostamento inferiore come appare nella formulazione.

$$\min \sum_{1}^{N \text{ stazioni}} p_i (\text{Limite superiore}_i - \text{Carico rilasciato}_i)^2$$

Con

$$p_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{se Carico rilasciato}_i \geq \text{Limite superiore}_i \\ 1 & \text{se Carico rilasciato}_i < \text{Limite superiore}_i \end{cases}$$

Infine Breithaupt, et al., 2002 schematizza i vantaggi e gli svantaggi del bilanciamento dei carichi di lavoro.

Vantaggi:

- 1- A parità di prestazioni il WIP è decisamente inferiore
- 2- Trasparenza dell'avanzamento della produzione
- 3- Maggiore prevedibilità dei lead time
- 4- Regole di dispatching poco influenti
- 5- Possibilità di modifiche o cancellazione degli ordini in istanti temporali avanzati

Svantaggi:

- 1- Il sequenziamento dei job non offre molte possibilità. Il che può essere un problema nel caso di job con tempi di set-up molto variabili
- 2- Se il bilanciamento non è ottimale il funzionamento è peggiore della limitazione, comportando minori prestazioni o Preshop Pool più grandi
- 3- Conflittualità tra bilanciamento e rispetto delle date di consegna. Questo problematica fondamentale verrà trattata nel successivo paragrafo.

Il modello di bilanciamento presentato appartiene a questa seconda categoria in quanto si è ritenuto il bilanciamento dei carichi molto più vantaggioso della semplice limitazione in un contesto molto variabile e complesso come quello analizzato.

3.7.9 Il conflitto tra bilanciamento e rispetto delle date di consegna

Il concetto di base dell'approccio Workload Control consiste nel posticipare il rilascio degli ordini che invece di essere rilasciati immediatamente a sistema vengono inseriti in una Preshop Pool dove rimangono in attesa. Questa tecnica comporta uno spostamento dei tempi di attraversamento nello Shop Floor in tempi di attesa in Preshop Pool. Per tutto il tempo in cui i job rimangono in attesa essi non sono altro che fogli di carta permettendo cancellazioni e modifiche per periodi di tempo molto maggiori e consentendo al modello di bilanciamento di scegliere tra un numero sufficiente di job da rilasciare in modo da minimizzare gli scostamenti dei carichi. La presenza di questo portafoglio ordini non rilasciati protegge il sistema dalla variabilità esterna garantendo al modello di bilanciamento una certa omogeneità dei carichi dei job provenienti dal mercato.

Molte simulazioni hanno tuttavia dimostrato come nel caso in cui siano presenti dei limiti al rilascio il bilanciamento dei carichi non porti a performance di rilievo. Tale problema definito Workload Paradox da Land & Kingsman, 1998 e deriva da un maggiore incremento dei tempi di attesa in Preshop Pool rispetto alla riduzione dei tempi di attraversamento del sistema produttivo.

Per evitare questo problema si è scelto di ridurre le Preshop Pool cercando di diminuire il tempo di attraversamento complessivo. Questa riduzione comporta però un conflitto tra due obiettivi che divengono contrapposti: il bilanciamento dei carichi ed il rispetto delle date di consegna. Capita spesso che se sono presenti dei limiti per i carichi alcune commesse che devono essere rilasciate secondo la loro data di consegna pianificata rimangano in Preshop Pool deteriorando le performance in termini di rispetto delle date di consegna. Di conseguenza è necessario favorire il rilascio degli ordini che altrimenti sarebbero ultimati in ritardo. Se però i carichi degli ordini che devono essere rilasciati obbligatoriamente sono fortemente variabili non è possibile raggiungere un buon bilanciamento di sistema (Land & Kingsman, 1998). Questo problema deriva essenzialmente da due fattori:

- 1- Tempi produttivi per ogni job fortemente variabili e quindi non attenuabili da una Preshop Pool estesa.
- 2- Nel caso in cui sia presente una certa stazionarietà dei job una Preshop Pool troppo poco estesa non consente di selezionare ordini in modo da livellare i carichi di lavoro.

Questo condizione è spesso verificata nelle aziende MTO dove difficilmente i tempi di lavorazione dei vari ordini avranno una certa stazionarietà.

3.7.9.1 Limitazione e bilanciamento

Le due tecniche appena presentate presentano delle peculiarità comuni. Il concetto di bilanciamento per esempio è ugualmente condiviso, con delle differenze però:

- Nella limitazione del carico di lavoro il bilanciamento è implicito al modello in quanto l'algoritmo di rilascio tenderà a portare tutti i carichi il più possibile vicino alla norma
- Nel bilanciamento invece il tutto è esplicito, facendo parte di una funzione obiettivo che si preoccupa di minimizzare gli scarti rispetto a dei parametri predeterminati.

Entrambe le procedure perseguendo anche se con modalità completamente differenti lo stesso obiettivo eliminano o almeno cercano di eliminare il problema della sindrome dei lead time, descritta da Breithaupt, et al., 2002. Tale sindrome è sintomatica di un fenomeno preciso: l'aumento dei tempi di attraversamento causa un innalzamento del carico di sistema, creando un circolo vizioso schematizzato nella figura seguente.

Le cause e gli effetti di questa sindrome sono:

- 1- Maggiori tempi di attraversamento causano un rilascio anticipato degli ordini nel sistema, limitando l'utilità della Preshop Pool
- 2- L'eccessivo rilascio anticipato di ordini causa un aumento del carico di sistema con conseguente aumento dei tempi di coda
- 3- Il carico di sistema causa tempi di attraversamento maggiori che non consentono il rispetto delle Due Dates, facendo ripartire il ciclo.

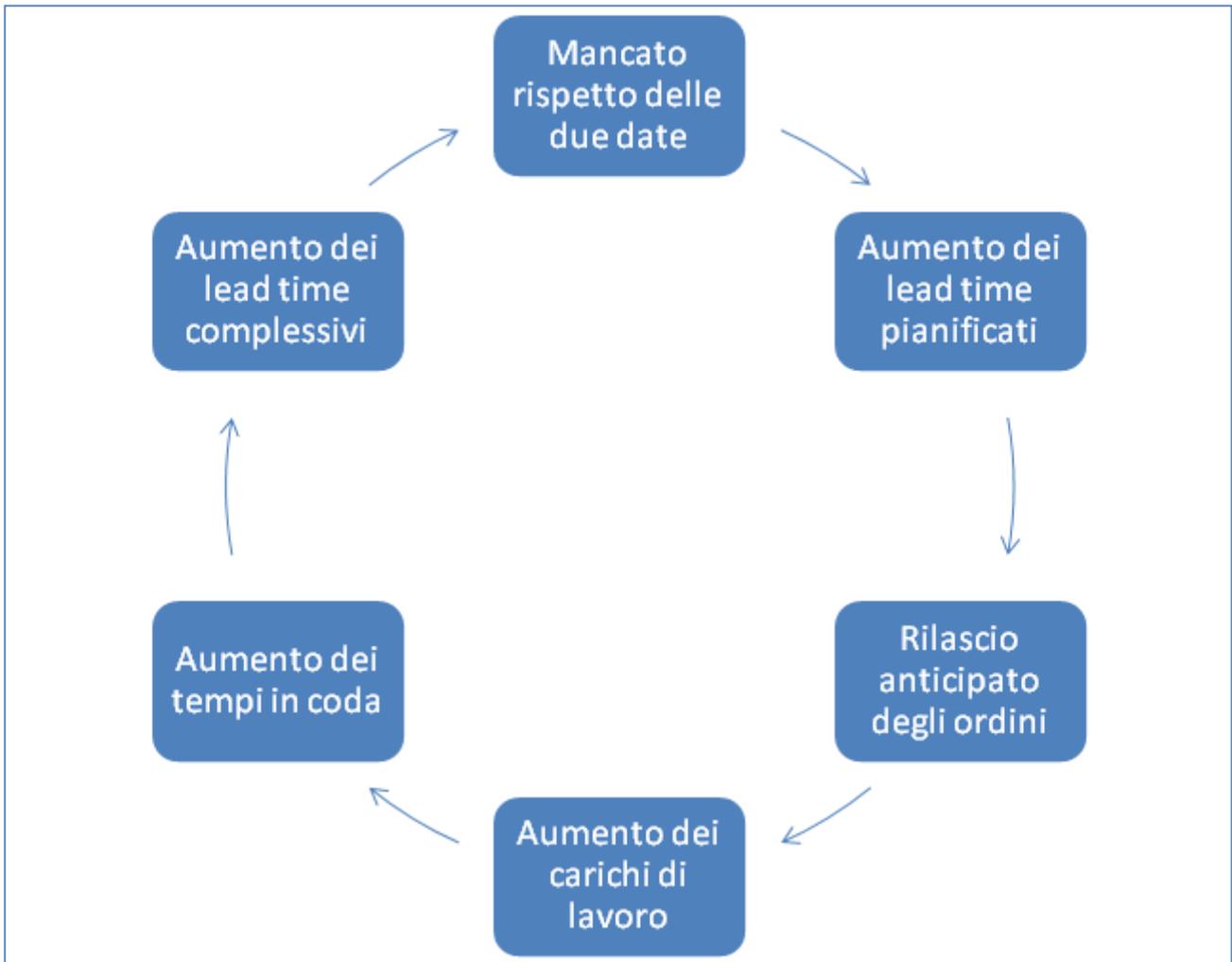


Figura 9 La sindrome dei lead time

Sempre Breithaupt, et al., 2002 individua e schematizza le caratteristiche principali della limitazione del carico, elencandone vantaggi e svantaggi.

Vantaggi:

1. Tramite l'utilizzo di norme lo Shop Floor è protetto dalla variabilità esterna ed interna
2. Esclusione della sindrome dei lead time
3. La pianificazione è facilitata
4. Il WIP è tenuto su livelli bassi
5. Shop floor più trasparente
6. Indipendenza dalle regole di priorità o dispatching rules
7. Lead time più facilmente prevedibili
8. Gli ordini possono essere cancellati o modificati più tardi

Svantaggi:

- 1- Forte sensibilità delle prestazioni al variare della norma per bassi livelli di WIP
- 2- Forte sensibilità alla lunghezza dell'orizzonte di schedulazione
- 3- Necessità di un continuo monitoraggio dei parametri
- 4- Possibilità di sequenziamento limitate, particolarmente critico nel caso di set-up molto influenti
- 5- Le prestazioni possono diminuire oppure il tempo speso in Preshop Pool supera il tempo risparmiato nello Shop Floor
- 6- Norme costanti non considerano le naturali fluttuazioni dei carichi nei sistemi produttivi reali

3.7.10 Capacity planning

Le tecniche di Order Release basano il loro approccio sul controllo dell'input ovvero del carico rilasciato nel sistema per ottenere le performance di timing e work in process desiderate.

Capita in alcuni modelli presentati come in Kingsman & Hendry, 1991 che sia possibile, oltre ad un controllo sugli input, aumentare la capacità produttiva in modo da poter rispondere con prontezza a carichi di lavoro eccessivi. I modelli che presentano tale capacità sono definiti attivi, ovvero tramite il ricorso a straordinari o a turni di lavoro aggiuntivi riescono ad aumentare la capacità produttiva.

La maggioranza dei modelli in letteratura sono invece passivi, difatti si occupano di controllare il sistema solamente tramite il rilascio degli ordini.

Nelle aziende Make To Order reali difficilmente è possibile aggiustare a piacimento la capacità produttiva per un duplice motivo:

1. Disponibilità effettiva di manodopera disponibile a straordinari o aumento dei turni
2. Competenze della manodopera spesso molto specifiche, il che non consente un agevole riallocazione del personale in stazioni differenti

Spinti dalle motivazioni appena elencate il modello di bilanciamento presentato rientra nella categoria dei passivi, controllando il sistema produttivo solamente mediante il rilascio.

3.7.11 Schedule visibility

La visibilità della schedulazione è un punto molto importante per quanto riguarda il rilascio degli ordini. In letteratura si ritrovano due categorie ben distinte:

1. Visibilità limitata
2. Visibilità estesa

Fanno parte della prima categoria la maggioranza dei modelli analizzati dove l'obiettivo primario era il raggiungimento di un corretto carico di lavoro nel periodo successivo. Per questo motivo si parla di visibilità limitata, in quanto il rilascio degli ordini è basato solamente sul raggiungimento di ottime performance nel breve periodo.

La visibilità estesa al contrario tramite il rilascio degli ordini cerca di raggiungere un bilanciamento ottimale di sistema nel lungo periodo, a discapito del periodo successivo. Questa focalizzazione sul lungo periodo comporta la ricerca di un bilanciamento globale che porta notevoli vantaggi nei periodi successivi.

Il modello di bilanciamento presentato ha una visibilità estesa in quanto si è ritenuta molto più vantaggiosa la possibilità di rilasciare gli ordini con un particolare riguardo al medio-lungo periodo. Dovendo lavorare con un sistema produttivo sottoposto a notevole variabilità si è pensato che un bilanciamento globale in più periodi portasse notevoli vantaggi riuscendo a reagire meglio agli imprevisti.

Capitolo 4: Gli obiettivi del lavoro di tesi.

Capitolo 4 Gli obiettivi del lavoro di tesi

4 Il contesto Make to Order

Nei capitoli precedenti sono state presentate due possibili modalità di approccio alle difficoltà di gestione della produzione che si incontrano nel settore Make-To-Order (MTO).

I prodotti realizzati in modalità MTO presentano alcune caratteristiche che rendono la gestione della produzione più complessa e sfidante di quanto non lo sia in un contesto, per esempio, Make-To-Stock (MTS); il mercato stesso del MTO, inoltre, richiede alle aziende che vogliono essere competitive la realizzazione di un certo livello di prestazioni diverse e difficili da conciliare fra loro.

In particolare, per quanto riguarda le caratteristiche dei prodotti che vengono realizzati in modalità MTO, essi hanno requisiti produttivi molto variabili: numero di lavorazioni richieste, durata delle lavorazioni richieste, quantità e qualità delle componenti necessarie. Ciò rende ogni ordine difficilmente ripetibile, ma soprattutto rende difficoltosa la gestione della produzione, la quale deve fronteggiare una continua variabilità nelle richieste, pur contenendo il consumo di risorse quali capacità produttiva disponibile, spazio consumato per le scorte di semilavorati, capitale investito nelle scorte. Una grande variabilità nelle richieste a cui deve rispondere la produzione, infatti, costringe sostanzialmente ad aumentare la quantità di pezzi in attesa di essere processati davanti alle stazioni di lavoro, al fine di mantenere elevata la saturazione delle macchine e quindi di meglio impiegare la capacità produttiva disponibile. Una saturazione delle stazioni più basse ridurrebbe infatti l'output del sistema, a parità di capacità installata.

Una buona gestione della produzione è in grado di superare il trade off presente, realizzando maggiore output a parità di Work-In-Process (WIP) oppure richiedendo meno WIP a parità di output.

Per quanto riguarda invece le prestazioni che sono richieste alle imprese operanti nel mercato MTO è necessario che un'impresa, per avere successo, si trovi a dover fronteggiare la richiesta di tempi di consegna sempre inferiori, la riduzione del numero e dell'entità di ritardi, pur senza penalizzare la propria flessibilità, né l'ampiezza della gamma di prodotti offerti.

Per raggiungere questi ambiziosi risultati si rende necessario il massimo miglioramento possibile a livello di gestione della produzione, la quale è responsabile di realizzare le prestazioni richieste.

Una buona gestione della produzione riesce a migliorare queste prestazioni senza richiedere risorse superiori, o quantomeno riesce ad ottenere ottimi risultati con un lieve aumento delle risorse richieste.

I due filoni di letteratura presentati nei capitoli precedenti descrivono le due possibili strategie che sono comunemente impiegate per raggiungere gli effetti desiderati e per fronteggiare le sfide presentate dal contesto MTO.

Come mostrato in precedenza l'introduzione di politiche Lean come il livellamento dei carichi di lavoro, Takt Time e l'utilizzo di una logica Pull porta, in contesti fortemente variabili come quelli in cui si trovano ad operare le aziende Make to Order, a dei miglioramenti in termini di performance di sistema (Bokhorst, et al., 2008), (Papadopoulou, et al., 2008) (Slomp, et al., 2009), (Lander, et al., 2007).

L'utilizzo di un approccio WLC come indicato da Stevenson, et al., 2005 risulta la scelta migliore per quanto riguarda il settore Make to Order, in quanto permette di controllare e livellare al meglio i carichi presenti nel sistema produttivo, generando dei tempi di attraversamento poco variabili in termini medi e di conseguenza più facilmente prevedibili. L'analisi finora effettuata da parte dei ricercatori si è fermata ai job shop, ai general flow shop ed ai pure flow shop. Poca attenzione è stata rivolta ad oggi verso sistemi produttivi caratterizzati da n linee parallele che convergono in un'unica linea di assemblaggio. Spinti dalla convinzione che un approccio così performante per i sistemi finora analizzati dovesse mostrare delle buone performance anche nei Two Stage Assembly Systems si è scelto di analizzarne le potenzialità. In particolare questo approccio meno rigido rispetto al sequenziamento dei job proposto in letteratura per gestire il sistema da noi analizzato permette di ottenere in contesti fortemente variabili una pianificazione maggiormente robusta rispetto agli algoritmi di schedulazione NP-Hard presentati nel capitolo 2.

All'interno delle tecniche WLC si è scelto di analizzare le performance ottenute dal modello di bilanciamento dei carichi di lavoro presentato, allo scopo di mostrare come il miglior livellamento dei carichi di lavoro ottenibile rispetto alla semplice limitazione garantisca delle performance migliori.

4.1 Gli obiettivi del lavoro di tesi

La tesi si è dunque sviluppata in tre passi principali, ognuno dei quali caratterizzato da domande di ricerca differenti che saranno presentate nei prossimi paragrafi.

Domanda 1:

Come impatta la variabilità di sistema, in particolare di routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Essa si declina nelle seguenti domande:

- 1. quale logica di rilascio permette di realizzare un maggiore output e dunque un minore tempo di attraversamento del sistema (Gross Throughput Time)?*
- 2. Quale logica di rilascio permette di ridurre la percentuale di ordini consegnati in ritardo? È possibile osservare una contemporanea riduzione dell'entità del ritardo medio?*
- 3. Quale logica di rilascio permette di ridurre sostanzialmente il Work-In-Process del sistema produttivo, con i benefici effetti collegati a questa riduzione?*

Per questa prima domanda di ricerca vengono analizzate le due tipologie di sistema produttivo che verranno descritte nel dettaglio nel capitolo 5 contraddistinte da due livelli di variabilità: basso e alto. La dimensione della Pipeline o del carico di lavoro presente nell'intero sistema è fissato per la prima domanda di ricerca a 210000 minuti. Ulteriori chiarimenti circa le configurazioni simulate sono presenti nel capitolo 5.

Domanda 2:

Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-In-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Questa seconda domanda è rivolta a determinare la robustezza delle soluzioni trovate per la prima domanda di ricerca variando il livello di carico di sistema detto Pipeline. Per questa domanda di ricerca si analizzano gli stessi due sistemi analizzati per la prima domanda apportando una drastica riduzione della Pipeline da 210000 minuti a 130000 minuti.

Domanda 3:

La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?

Essa si declina nelle seguenti domande:

- 1- È possibile per le soluzioni individuate andare a ridurre la Pipeline utilizzata ed ottenere performance molto simili dal punto di vista dell'Output riducendo contestualmente i ritardi?*
- 2- Le soluzioni trovate sono robuste rispetto ad una riduzione delle Due Dates, oltre che della Pipeline?*

Nel parte finale del lavoro di tesi, spinti dalle buone performance ottenute per il modello di bilanciamento dei carichi di lavoro, si è cercato di mostrare dei vantaggi ulteriori derivanti dall'implementazione di tale modello.

Maggiormente nel dettaglio quello che si è cercato di dimostrare è che applicando un modello di bilanciamento dei carichi di lavoro è possibile ridurre la Pipeline utilizzata a patto di effettuare una riduzione inferiore delle Due Dates utilizzate. Questo comporta per i punti di funzionamento individuati per le quattro configurazioni studiate la possibilità di migliorare di molto le performance in termini di ritardi percentuali e di Gross Throughput Time nel caso in cui si riesca a mantenere un'Output comunque elevato.

Questa parte finale del lavoro di tesi è rivolta principalmente ai gestori dei sistemi produttivi in esame, in particolare alla definizione di linee guida che è possibile utilizzare nel caso di cui si disponga di uno strumento potente come il bilanciamento dei carichi di lavoro. La riduzione della Pipeline a parità di performance produttive portando migliorie in termini di timing è un grosso vantaggio competitivo per le aziende che possono essere più flessibili a costi decisamente più contenuti ottenendo una contestuale riduzione della complessità gestionale di un sistema che lavora con meno ordini.

Il sistema produttivo analizzato

In questo capitolo viene presentato il sistema produttivo oggetto di studio insieme ai modelli di rilascio implementati. Nella parte finale è presente la formulazione matematica del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.

Capitolo 5: Il sistema produttivo analizzato

5 Presentazione del sistema produttivo analizzato

5.1 Il sistema produttivo

In questa sezione viene presentata una dettagliata descrizione del sistema produttivo considerato ed a cui sono riferiti tutti i risultati mostrati successivamente.

Si è scelto di sviluppare una piattaforma che potesse rappresentare la più vasta gamma di sistemi possibile, in modo da garantire la possibilità di analizzare le prestazioni dei modelli proposti nel maggior numero di contesti differenti che possono essere rilevati in azienda, senza dover per questo effettuare modifiche significative al modello di simulazione. Nella fase di progettazione è stato scelto di orientarsi ad un sistema caratterizzato da una grande versatilità; questo ha permesso di valutare l'effetto di diversi fattori di contesto oltre che di diverse scelte produttive. Non da ultimo, la versatilità rende questo lavoro applicabile a svariati contesti produttivi. Verranno esplicitate nella trattazione le scelte che contribuiscono a raggiungere questo fine. Per semplicità ci si riferisce ad un sistema di tipo manifatturiero, in cui cioè il prodotto finito è tangibile; l'astrazione, tuttavia, può essere estesa a rappresentare il processo di erogazione di un servizio, come verrà mostrato più avanti.

Il sistema produttivo è composto da diverse linee parallele che convergono in una singola linea finale. E' stato fissato a tre il numero delle linee di fabbricazione; su queste linee sono lavorate le diverse componenti che vanno a comporre il prodotto finito, il quale è assemblato e rifinito nella linea nella quale convergono le tre linee di fabbricazione. Questa linea sarà denominata "di assemblaggio".

In ogni linea sono presenti cinque stazioni per un totale dunque di quindici stazioni di fabbricazione e cinque di assemblaggio e finitura.

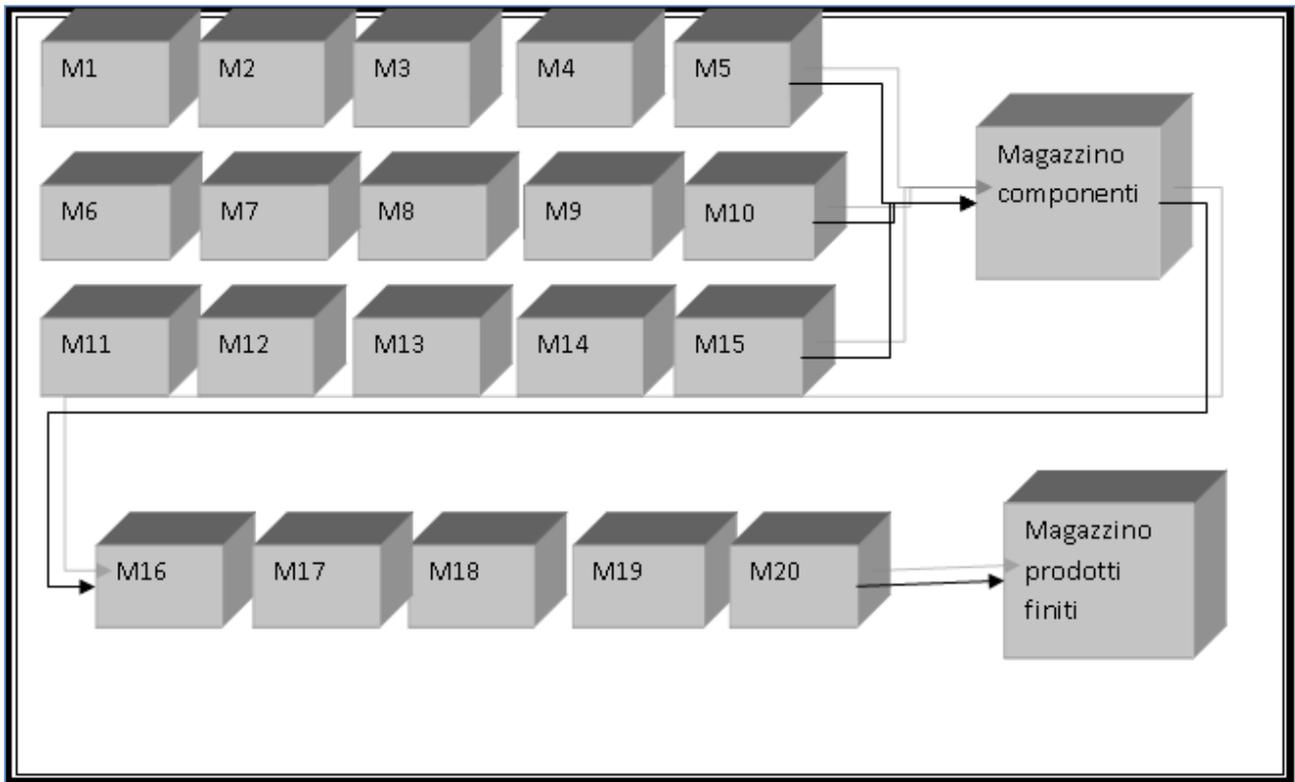


Figura 10 Il sistema produttivo analizzato

I prodotti realizzati devono essere coerenti con il tipo di domanda che si presenta nel contesto MTO: ciascun ordine è diverso da ogni altro, in quanto diverso può essere il numero di componenti che il prodotto finito richiede, diverso è il numero di lavorazioni che ciascun componente richiede per essere completato e diversa è la durata delle lavorazioni che il pezzo deve subire anche sulle medesime stazioni.

E' stato considerato un sistema che tenga conto di questi fattori nella seguente misura:

1. **diverso numero di componenti:** ogni linea di fabbricazione è associata casualmente al 90% degli ordini in ingresso al sistema; guardando dal punto di vista del prodotto finito, esso può essere composto da una, due o tre componenti diverse;
2. **diverso numero di lavorazioni:** ogni ordine richiede lavorazioni mediamente sullo 80% delle stazioni presenti nel sistema;
3. **diversa durata delle lavorazioni richieste:** il tempo di lavorazione di ogni pezzo su ogni stazione è frutto di una distribuzione casuale 2-Erlang, con media di 32 minuti e coefficiente di variazione 0,7.

Il sistema produttivo che si è scelto di rappresentare rientra, secondo la classificazione di (Oosterman, et al., 2000), nella categoria dei General Flow Shops. Il flusso dei pezzi è infatti orientato in una sola direzione, mentre i pezzi potrebbero non attraversare tutte le stazioni (routing).

Un sistema di questo tipo può inoltre ben rappresentare il flusso di un processo di erogazione di servizio. Si pensi al processo di erogazione di un mutuo (a titolo di esempio si può pensare anche ad un rimborso assicurativo o all'apertura di un nuovo conto): la pratica può richiedere un diverso numero di accertamenti (linee di fabbricazione) a seconda della richiesta ricevuta dall'azienda; ciascun accertamento richiede diverse operazioni ed, una volta completate tutte le operazioni preliminari, la pratica richiede di essere completata con ulteriori operazioni (linea di assemblaggio). A seconda della pratica elaborata, infine, il tempo richiesto dalle operazioni può essere differente.

Gli ordini che arrivano all'impresa hanno un contenuto di lavoro che è comprensibilmente molto variabile. Ciò è dovuto al tipo di mercato su cui si affacciano le imprese di riferimento per la nostra ricerca: ogni ordine è in larga parte diverso dagli altri ordini in attesa di essere processati e la ripetitività degli ordini nel tempo è molto scarsa. Per questo motivo è necessario attribuire ad ogni ordine in ingresso nel sistema una data di consegna (Due Dates) che tenga conto del diverso contenuto di lavoro dei pezzi. Si è scelto, basandoci su queste ipotesi, di calcolare la Due Dates come il prodotto fra TWK (Total Work Content, espresso in minuti di lavoro) e lo Slack k (nel seguito è precisato come viene calcolato il valore dello slack). Il valore risultante è poi arrotondato per eccesso, non essendo contemplata nella nostra ricerca la possibilità di consegnare a diversi istanti della stessa giornata. È stato considerato poco verosimile in quanto i jobs hanno date di consegna dell'ordine di qualche settimana.

Alla variabilità presentata poco sopra vengono aggiunte due tipologie di disturbo, facilmente riscontrabili nella realtà dei sistemi produttivi e dunque necessarie ai fini di una realistica comprensione dei fenomeni:

1. **controllo qualità:** un controllo di qualità è posto dopo la quarta stazione della prima linea di fabbricazione ed un'altro dopo la penultima stazione del sistema produttivo (quindi dopo la quarta stazione della linea di assemblaggio). La stazione di controllo qualità intercetta dei difetti di lavorazione nel 10% dei pezzi che la attraversano; ciascuno di essi è costretto ad essere rilavorato a partire da una delle quattro stazioni che la precedono, con probabilità uguale per ciascuna stazione. Ciò significa che il pezzo può essere costretto a rientrare nella coda di una delle quattro stazioni precedenti il controllo qualità con una probabilità del 2,5%. Quando il pezzo rientra nella coda stabilita, esso ripete le lavorazioni che ha già

subito durante il primo attraversamento, impiega lo stesso tempo e poi non necessita di ulteriori controlli di qualità.

2. **Tempi effettivi:** i tempi di lavorazione realizzati nella realtà differiscono in minore o maggiore misura dai tempi di lavorazione previsti. Per questo motivo vengono introdotte due categorie di tempi. I tempi standard sono i tempi di lavorazione previsti; questi sono gli unici tempi che possono essere visti a livello di programmazione (fase di Order Entry, fase di Order Release, determinazione del carico presente a sistema). I tempi effettivi sono i tempi che il sistema realmente deve versare per effettuare le corrispondenti lavorazioni; questi tempi sono impiegati dal software che simula il funzionamento del sistema produttivo (Arena). Non sono invece in alcun modo prevedibili né visibili dai modelli di pianificazione della produzione. Le diverse classi di tempi hanno identica media ed identica distribuzione probabilistica; ogni tempo effettivo può però differire dal corrispondente tempo standard in diversa misura. Si rimanda ai prossimi paragrafi per vedere la tabella con il dettaglio delle distorsioni.

Anche per le caratteristiche appena presentate, che per semplicità vengono presentate come riferite ad un contesto manifatturiero, è immediato fare il collegamento con il mercato dei servizi ed immediata appare anche la loro necessità ai fini di una corretta rappresentazione anche di questo contesto produttivo.

Il controllo di qualità rappresenta il rilevamento di un errore nello svolgimento delle operazioni precedenti, che quindi devono essere svolte nuovamente; la presenza di una differenza fra i tempi effettivamente impiegati ed i tempi inizialmente previsti è estremamente comune in tutte le operazioni in cui sono coinvolte delle persone.

Per quanto riguarda, infine, la modalità di gestione delle code si è scelto di utilizzare una delle modalità più diffuse sia in letteratura che nella realtà produttiva, cioè la modalità First-In First-Out. Questa modalità prevede che, fra gli ordini in attesa di essere serviti da una stazione di lavoro, venga scelto il primo ordine che è arrivato in coda, senza possibilità per quelli che sono arrivati dopo di essere serviti prima.

Questa modalità è particolarmente diffusa grazie alla semplicità di implementazione ed alle pochissime risorse che richiede per essere gestita. Non da ultimo permette di realizzare buone prestazioni in gran parte dei sistemi produttivi.

Come ultima considerazione, il sistema produttivo in esame si presta a rappresentare il funzionamento di una supply chain e non solo i processi interni ad un'impresa. Ogni stazione rappresenta in questo caso una singola impresa (i cui processi produttivi non sono considerati), la quale riceve i semilavorati dalle imprese che la precedono nella filiera produttiva (che sono quindi situate a monte) e vende i propri prodotti finiti all'impresa immediatamente successiva. Le imprese rappresentate dalle stazioni nella linea di assemblaggio sono le più vicine all'utilizzatore finale e ricevono dalle stazioni poste più a monte nella filiera produttiva un diverso numero di componenti. Si pensi, a titolo d'esempio, all'industria dell'automobile: la casa produttrice riceve svariati pezzi da fornitori esterni (motori, componenti elettroniche, pneumatici, ecc...) e si limita ad assemblare gli stessi effettuando le ultime lavorazioni necessarie a completare il prodotto finito.

5.1.1 Configurazioni simulate

Obiettivo della tesi è di valutare la robustezza delle due metodologie di Order Release all'aumentare o diminuire sia del livello di variabilità, sia del livello di Work In Process (WIP), ovvero livello di carico nel sistema. Per questa ragione è stato studiato il comportamento del sistema produttivo al variare dei due diversi fattori presi singolarmente, simulandone il funzionamento in quattro diverse configurazioni.

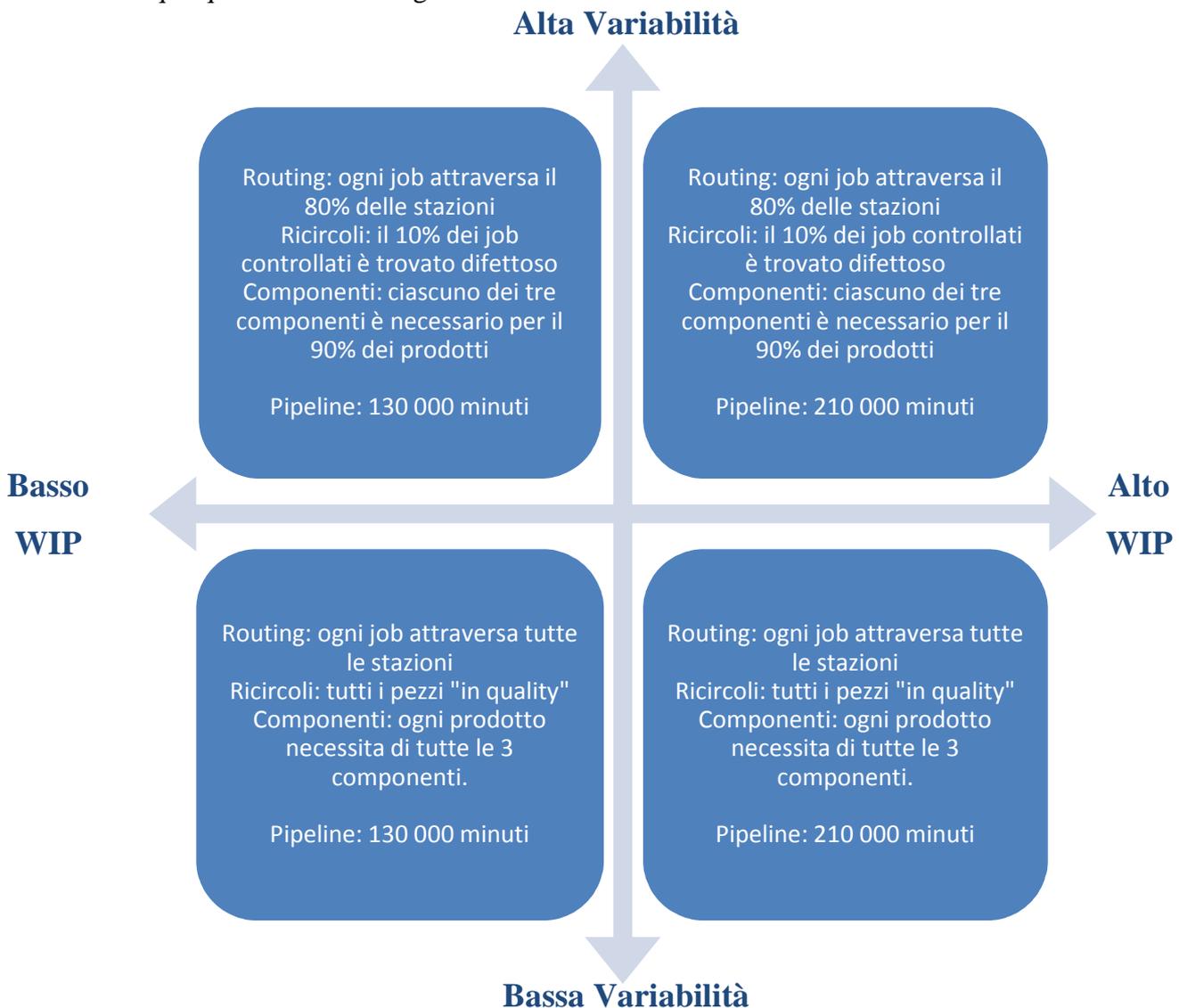
Per quanto riguarda il livello di variabilità, esso può essere "alto" o "basso"; la Pipeline, ovvero il totale di WIP contenuto nel sistema, può avere dimensione di 210000 minuti o 130000 minuti.

Per quanto riguarda il livello di variabilità, nel precedente paragrafo è stata descritta ogni possibile causa di variabilità presente nel sistema produttivo su cui si è svolta la ricerca e le corrispondenti simulazioni; quella che comprende tutti i fattori elencati è quindi la configurazione più complessa e più potenzialmente difficile da gestire. Come già esplicitato, questa configurazione rientra nella categoria dei General Flow Shops. Al fine di valutare l'effetto della variabilità sulle prestazioni che il sistema produttivo realizza grazie ai diversi criteri di Order Release, è stata testata anche la configurazione di tipo Pure Flow Shop. Per fare ciò si è esclusa la possibilità che un ordine richieda un numero di componenti diverso da tre (cioè il numero totale delle linee di fabbricazione); si è inoltre esclusa la possibilità che un pezzo possa saltare delle stazioni (che quindi il routing sia variabile); infine sono state eliminate le stazioni di controllo qualità, in modo da escludere la possibilità che un pezzo sia costretto a ricircolare su stazioni poste più a monte, interrompendo in

questo modo il regolare ed uniforme scorrimento del flusso di produzione. Questa è la configurazione con basso livello di variabilità.

La seconda modifica, come già anticipato, riguarda la dimensione della Pipeline, che può essere fissata a 210000 oppure a 130000 minuti. La dimensione della Pipeline rappresenta il massimo contenuto di lavoro che può essere mantenuto nell'intero sistema: è la somma del carico di lavoro presente nel sistema produttivo e del carico presenta in Preshop Pool, cioè in attesa di essere rilasciato nel sistema produttivo. La dimensione della Pipeline rappresenta il Work-In-Process (WIP) presente nel sistema; è quindi molto importante che essa sia fissata perché i tempi di attraversamento, a parità di output giornaliero realizzato, dipendono dal livello del WIP. Little ha dimostrato la validità della seguente relazione: $WIP = \text{Gross Throughput Time (GTT)} * \text{Output medio}$. La dimensione della Pipeline viene mantenuta costante dalla fase di Order Entry, come vedremo più approfonditamente nella prossima sezione.

Ecco dunque quali sono le configurazioni risultanti:



Si precisa infine che in ciascuna delle quattro configurazioni elencate nello schema è comunque presente un certo livello di variabilità dovuto alla necessità di simulare un sistema che risponde al mercato in modalità Make To Order e che dunque opera secondo commesse non ripetitive. Per tali motivi è sempre presente un livello di variabilità dato dai seguenti fattori:

- **variabilità dei tempi di lavorazione:** i tempi di lavorazione sono distribuiti come una 2-Erlang;
- **imprevedibilità dei tempi di lavorazione:** i tempi effettivamente impiegati per realizzare le lavorazioni differiscono dai tempi inizialmente preventivati effettuare l'operazione.

Infine sono stati valutati gli effetti di una parziale riduzione della pipeline, da considerare come “configurazioni supplementari” ed aggiuntive a quelle attorno alle quali è stato imperniato questo lavoro di ricerca. Per quanto riguarda la sola configurazione con basso livello di variabilità è stata operata una riduzione di circa il 20% alla dimensione di ciascuna delle due pipeline, portando la prima a diventare di 105000 minuti e la seconda a 170000. Questo ha permesso di ulteriormente valutare la robustezza delle tecniche di Order Release al variare della dimensione della pipeline e, soprattutto, di esplicitare le possibili conseguenze della scelta di preferire una o l'altra tecnica di rilascio, in particolare per quanto riguarda l'effetto sulle due date.

Nei prossimi paragrafi saranno descritte nel dettaglio tutte le componenti delle configurazioni.

5.1.2 I tempi di lavorazione

Vengono definite due classi di tempi di lavorazione: i tempi standard ed i tempi effettivi. I primi sono impiegati per pianificare la produzione: la somma dei tempi standard associati ai job presenti nel sistema produttivo rappresenta il carico presente a sistema; sulla base di questo carico, come vedremo nella prossima sezione, viene determinato il carico da rilasciare. Il carico da rilasciare è determinato a partire dai tempi standard ed infine anche il carico da accettare nel sistema (e di conseguenza il numero di ordini in arrivo all'impresa) è calcolato sulla base dei tempi standard. I tempi effettivi, invece, sono i minuti che effettivamente il sistema produttivo spende per lavorare i jobs; questi differiscono dai tempi standard a causa di due fattori: distorsioni dovute all'aleatorietà dei tempi di lavorazione realizzati, rispetto ai tempi preventivati; presenza di ricircoli dovuti alla

difettosità riscontrata nelle stazioni di controllo qualità. I tempi effettivi non sono conosciuti dal sistema di pianificazione della produzione, ma sono impiegati esclusivamente dal software che si occupa di simulare lo Shop Floor.

Come anticipato nel paragrafo precedente, i tempi di lavorazione sono ricavati da una distribuzione 2-Erlang con media 32 minuti e coefficiente di variazione 0,7. A partire da questo dato, è assolutamente necessario che siano verificate due condizioni, non banali a causa della variabilità del sistema: i carichi mediamente presenti su tutte le stazioni devono essere bilanciati (in caso contrario una o più stazioni fungerebbero da collo di bottiglia permanente, inficiando la validità dei risultati ottenuti); i tempi standard devono mediamente essere uguali ai tempi effettivi (si ipotizza che i dati a disposizione della pianificazione di produzione siano realistici).

È stata posta particolare cura nel rispetto di queste condizioni, superando le distorsioni derivanti dalla variabilità presente nel sistema e già descritta nel paragrafo precedente. In particolare sono state effettuate le seguenti correzioni dei tempi di lavorazione.

Correzioni effettuate sia sui tempi standard che sui tempi effettivi:

- presenza di routing: nella configurazione con livello di variabilità “alto” ogni stazione del sistema produttivo riceve mediamente l'80% del carico che riceverebbe in caso di livello di variabilità “basso”; questo è dovuto alla presenza del routing, cioè alla possibilità per un ordine di non richiedere un certo numero di lavorazioni. Al fine di ottenere una media dei tempi di lavorazione pari a 32 minuti come stabilito è quindi necessario che la media dei tempi di lavorazione su ogni stazione per i jobs che ne richiedono una lavorazione sia incrementata di una certa percentuale. Ecco come determinare il valore della media di questi tempi di lavorazione: $x * 0,8 + 0 * 0,2 = \text{media desiderata} * 1$. La media desiderata è 32 minuti.
- Bilanciamento del carico fra la fase di fabbricazione e la fase di assemblaggio: ogni linea di fabbricazione riceve un carico inferiore alla linea di assemblaggio a causa della possibilità per gli ordini di non richiedere tutte le componenti. La probabilità che un ordine non sia associato ad una linea di fabbricazione è del 10%, ciò significa che la media dei tempi di lavorazione dei pezzi che invece passano per ciascuna linea di fabbricazione deve essere incrementata affinché la media dei tempi di lavorazione sia pari al valore stabilito (32 minuti) nonostante i jobs che non attraversano le linee di fabbricazione. In caso contrario la linea di assemblaggio si troverebbe ad essere mediamente più carica di ogni linea di fabbricazione. Ecco come determinare il valore della media reale: $x * 0,9 + 0 * 0,1 = \text{media}$

desiderata * 1. La media desiderata è 32 minuti, x è il valore della media che devono avere i tempi di lavorazione dei jobs che richiedono il componente prodotto sulla linea di fabbricazione.

Correzioni effettuate sui soli tempi effettivi:

- 1- i pezzi che ricircolano in seguito ad una difettosità rilevata aumentano il carico delle stazioni su cui devono essere rilavorati; la media dei tempi di lavorazione dei pezzi su queste stazioni deve quindi essere ridotta, altrimenti il carico supplementare dovuto ai ricircoli porterebbe queste stazioni ad essere mediamente più cariche delle stazioni che non sono soggette a ricircoli. Complessivamente otto stazioni sono interessate dai ricircoli: le prime quattro della prima linea di fabbricazione e le prime quattro della linea di assemblaggio. Ogni pezzo che attraversa la stazione di controllo qualità ha il 2.5% di probabilità di ricircolare su ognuna delle quattro stazioni precedenti, quindi il carico supplementare per le stazioni che precedono il controllo di qualità è pari a 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%, in quanto i pezzi ricominciano il loro processo di fabbricazione o di assemblaggio a partire dal punto in cui sono ricircolati. I tempi di lavorazione medi per ogni stazione devono essere quindi ridotti di una percentuale coerente con il numero di ricircoli che la stazione riceve.

Questa modifica è da effettuare sui soli tempi effettivi perché i ricircoli non sono visibili dalla pianificazione di produzione; al contrario i ricircoli si verificano con le probabilità elencate nel solo sistema produttivo. Sono quindi i tempi effettivi a dover essere ridotti di una giusta misura, mentre si ipotizza che i tempi standard, mediamente pari a 32 minuti, considerino già la possibilità di un pezzo di ricircolare, a partire dalle difettosità mediamente riscontrate.

È stata posta particolare attenzione affinché i diversi effetti (routing, numero di componenti per ordine, ricircoli) fossero trattati separatamente e le correzioni non avessero interferenze fra di loro.

Come spiegato in precedenza i tempi standard non subiscono le stesse modifiche dei tempi effettivi di lavorazione. La loro distribuzione rimane sempre una 2-erlang con media 32 minuti e coefficiente di variazione di 0.7.

Per una migliore comprensione si rappresenta nella prossima figura la distribuzione dei tempi standard utilizzata nel lavoro di tesi:

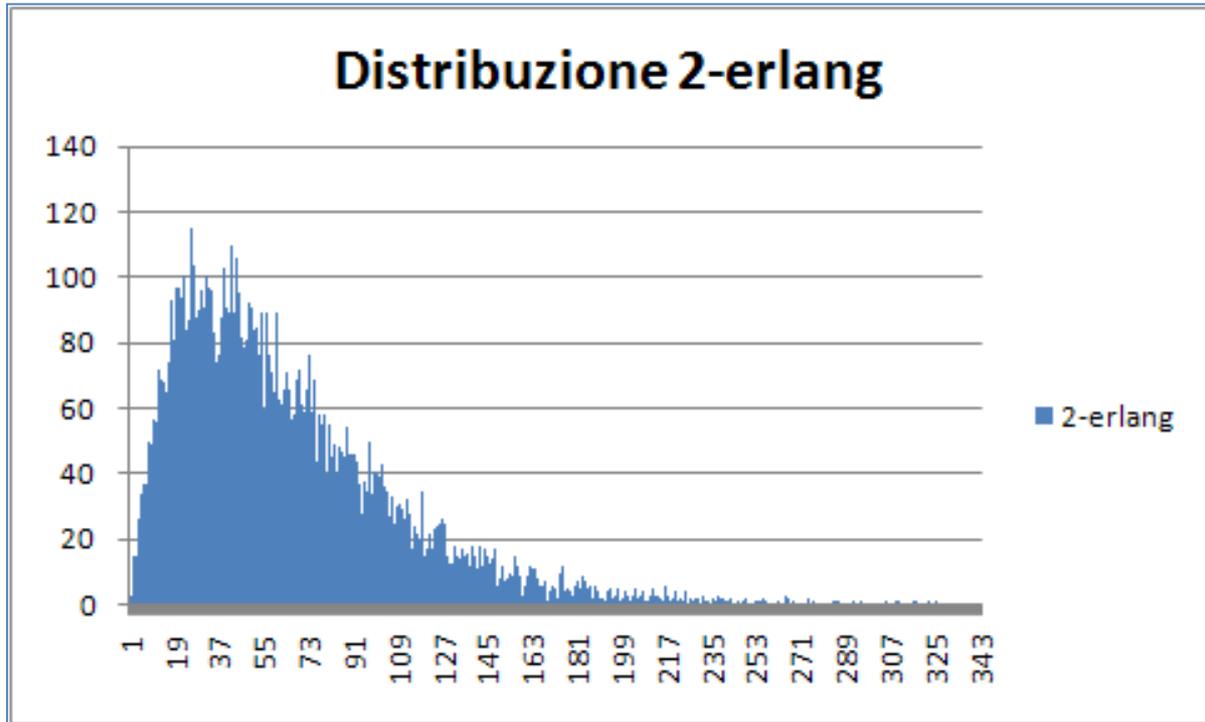


Figura 11 La distribuzione dei tempi standard di lavorazione

I tempi standard vengono poi suddivisi in quattro fasce di 32 minuti ciascuna che subiscono delle distorsioni in positivo o in negativo provenienti da una distribuzione casuale. In questo modo vengono ottenuti i tempi effettivi di lavorazione.

La tabella seguente schematizza l'entità delle distorsioni per fasce di tempo.

Fascia tempi	0-32	32-64	64-96	96-128	128-160
Media	0	0	0	0	0
Dev.std	4.548697	5.997867	7.475438	11.25441	12.63051
Max	33.43883	26.69101	31.36245	37.34928	26.83472
Min	-6.56996	-14.7485	-17.6365	-22.9965	-20.6955
Media >0	1.896123	2.332043	2.798481	4.209368	4.967642
Media <0	-1.46283	-2.40099	-3.10463	-4.83841	-5.91151

Figura 12 La tabella delle distorsioni dei tempi standard

Come si nota dalla tabella le distorsioni hanno media pari a zero in modo da non modificare la media totale della distribuzione ma portano distorsioni differenti a seconda della fascia.

E' ragionevole supporre che le distorsioni siano in media tanto più alte quanto più i tempi standard sono elevati. Agendo in questo modo si è cercato di porre delle distorsioni con media crescente all'aumentare della fascia. Le massime variazioni invece si ottengono per i tempi delle prime fasce dove è ragionevole supporre che degli imprevisti causino degli aumenti percentuali maggiori con tempi bassi rispetto ad imprevisti che avvengono per tempi maggiori di due volte la media.

La distribuzione dei disturbi è la seguente:

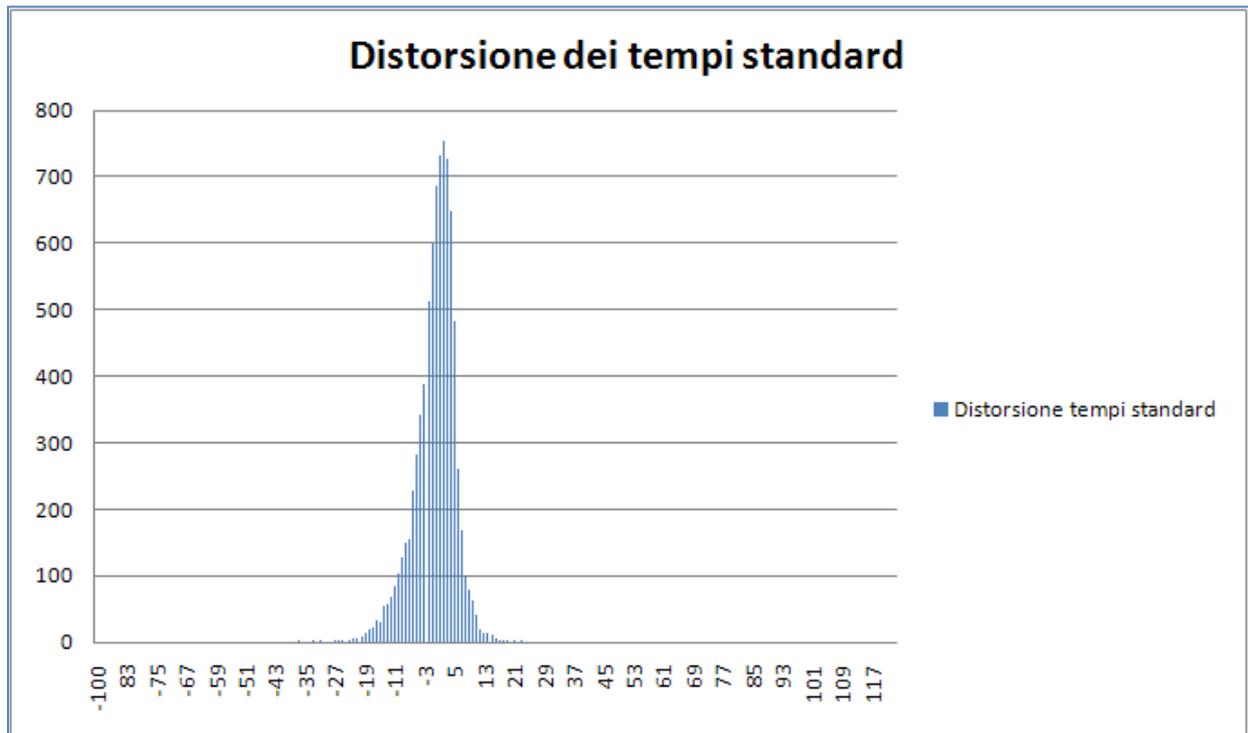


Figura 13 La distribuzione delle distorsioni

La distribuzione dei tempi effettivi risultante dalle distorsioni applicate è rappresentata in figura:

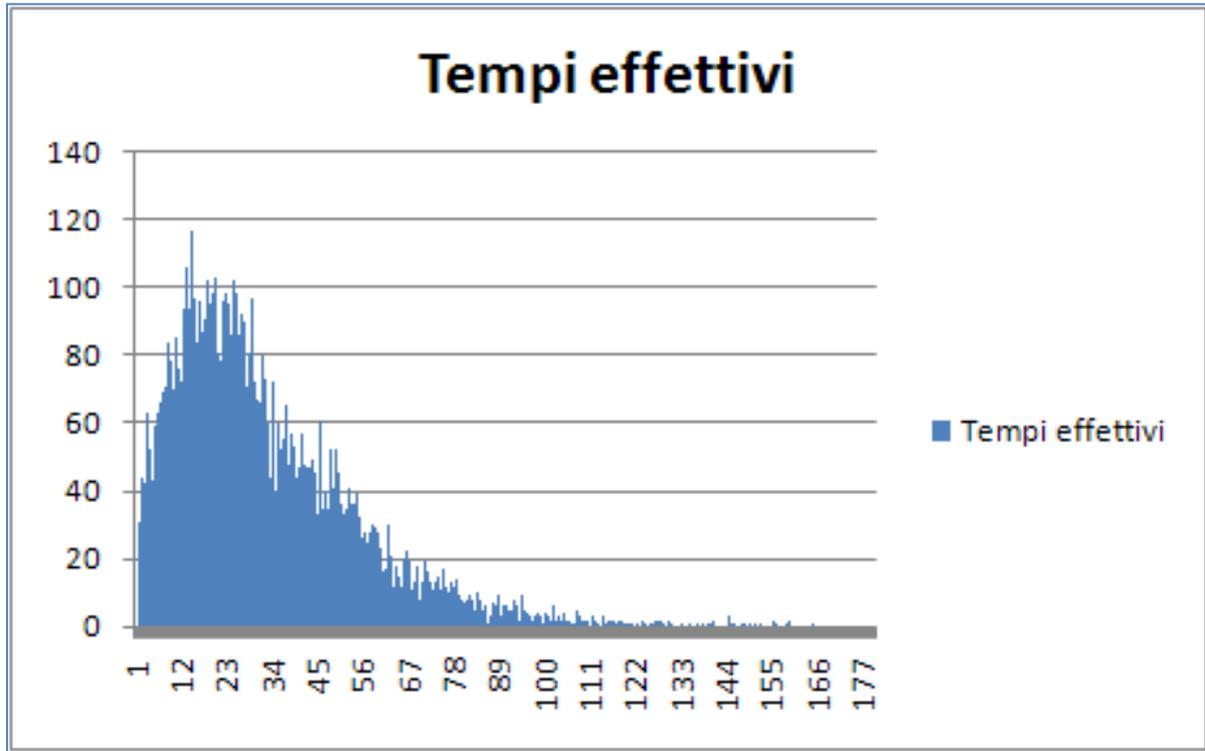


Figura 14 La distribuzione dei tempi effettivi

5.1.3 Riepilogo delle medie e coefficienti di variazione delle distribuzioni utilizzate per simulare i sistemi con variabilità e senza variabilità.

Nella tabella seguente si riporta un schema riassuntivo delle medie dei tempi per ogni stazione utilizzato nel caso di sistema produttivo senza variabilità.

		Sistema senza variabilità	
		Media	Coeff variazione
Prima linea di fabbricazione	Stazione 1	32	0.7
	Stazione 2	32	0.7
	Stazione 3	32	0.7
	Stazione 4	32	0.7
	Stazione 5	32	0.7
Seconda linea di fabbricazione	Stazione 6	32	0.7
	Stazione 7	32	0.7
	Stazione 8	32	0.7
	Stazione 9	32	0.7
	Stazione 10	32	0.7
Terza linea di fabbricazione	Stazione 11	32	0.7
	Stazione 12	32	0.7
	Stazione 13	32	0.7
	Stazione 14	32	0.7
	Stazione 15	32	0.7
Linea di assemblaggio	Stazione 16	32	0.7
	Stazione 17	32	0.7
	Stazione 18	32	0.7
	Stazione 19	32	0.7
	Stazione 20	32	0.7

Figura 15 Schema riassuntivo dei tempi per sistema senza variabilità

Tale tabella vale sia per i tempi standard che per i tempi effettivi.

Per il sistema con variabilità invece le medie dei tempi sono differenti tra tempi standard ed effettivi e sono riassunte nella seguente tabella.

		Sistema con variabilità			
		Media tempi std	Coeff variazione	Media tempi eff	Coeff variazione
Prima linea di fabbricazione	Stazione 1	32	0.7	30.99445536	0.7
	Stazione 2	32	0.7	30.01159798	0.7
	Stazione 3	32	0.7	28.87187151	0.7
	Stazione 4	32	0.7	28.06887439	0.7
	Stazione 5	32	0.7	32	0.7
Seconda linea di fabbricazione	Stazione 6	32	0.7	32	0.7
	Stazione 7	32	0.7	32	0.7
	Stazione 8	32	0.7	32	0.7
	Stazione 9	32	0.7	32	0.7
	Stazione 10	32	0.7	32	0.7
Terza linea di fabbricazione	Stazione 11	32	0.7	32	0.7
	Stazione 12	32	0.7	32	0.7
	Stazione 13	32	0.7	32	0.7
	Stazione 14	32	0.7	32	0.7
	Stazione 15	32	0.7	32	0.7
Linea di assemblaggio	Stazione 16	32	0.7	31.07315692	0.7
	Stazione 17	32	0.7	30.05486769	0.7
	Stazione 18	32	0.7	29.18851887	0.7
	Stazione 19	32	0.7	28.40086449	0.7
	Stazione 20	32	0.7	32	0.7

Figura 16 Schema riassuntivo dei tempi per il sistema con variabilità

5.2 L'impatto della variabilità sulle prestazioni del sistema

In letteratura si trovano pubblicazioni di autori che hanno affrontato il tema della variabilità nei sistemi produttivi, andando ad analizzare gli impatti che routing, ricircoli e tempi di lavorazione hanno sulle performance di sistema. Allo scopo di contestualizzare la nostra ricerca viene presentato un breve riassunto delle principali conclusioni cui i ricercatori sono giunti.

5.2.1 Variabilità dei tempi di lavorazione

Nel contesto Make-To-Order (MTO) è comune trovare tempi di lavorazione estremamente variabili: ogni ordine richiede infatti lavorazioni specifiche che, sebbene effettuate sulle stesse macchine, impiegano tempi diversi per essere completate. Questa è la naturale conseguenza della diversità

degli ordini stessi: le caratteristiche diverse che richiedono i clienti comportano lavorazioni diverse (in termini qualitativi ed in termini quantitativi).

Il sistema produttivo che si trova a dover affrontare un'accresciuta variabilità nei tempi di lavorazione dei pezzi risente di questa variabilità stessa e, se non correttamente gestito, vede deteriorarsi le prestazioni. In generale le stazioni di lavoro si trovano, nel tempo, a dover affrontare carichi di lavoro sempre diversi con il risultato che nel sistema produttivo possono esserci temporaneamente stazioni estremamente cariche (colli di bottiglia temporanei) a fronte di stazioni scariche, cioè in attesa di pezzi da processare; il risultato è che la saturazione media delle stazioni diminuisce, così come la produttività delle stesse. Da ciò consegue la necessità di installare più capacità produttiva di quella che sarebbe sufficiente se il carico sulle stazioni fosse bilanciato. Altre conseguenze negative di uno sbilanciamento del carico sono (Miltenburg e Sinnamon 1989):

1. difficoltà di schedulazione della manodopera;
2. difficoltà di programmazione della produzione;
3. difficoltà di sviluppo di procedure per migliorare la qualità;
4. maggiore necessità di scorte di materie prime e prodotti finiti;
5. maggiori tempi di consegna.

Tutti questi svantaggi possono essere superati grazie ad un livellamento del carico presente sulle stazioni, ma ciò risulta più difficile se i tempi di lavorazione sono molto diversi da un ordine all'altro. In tutti i casi il controllo del carico è ciò che si propone di fare l'approccio di tipo Workload Control.

5.2.2 Variabilità del routing

Secondo Land, et al., 2004 la variabilità del routing porta a preferire la scelta di una gestione della produzione secondo un approccio orientato al carico (Workload Control, o WLC). Il WLC gode in particolare della presenza della Preshop Pool, ai fini di contrastare gli effetti di un'aumentata variabilità del routing: la Preshop Pool permette infatti di difendere il sistema produttivo dallo sbilanciamento del carico che si troverebbe a dover fronteggiare nel caso in cui gli ordini fossero rilasciati secondo criteri che non tengono conto del carico (per esempio criteri incentrati sulla data di consegna fissata o sull'intervallo di tempo fra l'arrivo dell'ordine e la consegna prevista dello stesso).

Una seconda caratteristica tipica del WLC che permette di contrastare gli effetti di una eccessiva variabilità del routing è la presenza di un adeguato buffer a monte di ogni stazione; questo buffer permette alla stazione di avere carico da lavorare anche se alcuni pezzi, in uscita dalle stazioni poste più a monte, non richiedono lavorazioni sulla stazione stessa.

L'ultima leva mediante la quale il WLC contrasta l'effetto del routing variabile è l'accentramento delle decisioni di rilascio: un sistema di rilascio che ha visibilità sull'intero sistema produttivo permette di meglio bilanciare i carichi e raggiungere i livelli di saturazione e produttività delle macchine desiderati.

Tutte le caratteristiche appena elencate portano l'approccio WLC ad essere preferibile rispetto agli altri approcci alla produzione, in particolare in presenza di un routing molto variabile.

5.2.3 Presenza di rilavorazioni

Sia nelle aziende manifatturiere, sia nelle aziende che si occupano di erogare servizi, è comune incontrare il caso in cui un semilavorato (o una pratica) viene ritenuto difettoso e deve quindi essere rilavorato per rientrare nelle tolleranze qualitative.

A tale scopo sono normalmente presenti all'interno o al termine del sistema produttivo (ci riferiremo per semplicità al solo caso della realtà manifatturiera) delle fasi di controllo qualità, che si occupano di rilevare i jobs difettosi e di inviarli verso una rilavorazione su una o più delle macchine che hanno appena attraversato.

Come descrive Mayer Nusswald 2001, la difettosità e la conseguente necessità di rilavorazione ha svariati effetti di carattere economico (è causa di un aumento dei costi), ma ai fini della nostra ricerca ci si concentra sugli svantaggi che comporta dal punto di vista della sola produzione.

Le rilavorazioni innanzitutto comportano un effetto sui tempi di produzione: i pezzi rilavorati aumentano il proprio tempo di attraversamento del sistema perché devono attraversare un maggior numero di stazioni; permanendo nel sistema produttivo, essi comportano anche un aumento del Work-In-Process (WIP) che ha come diretta conseguenza l'incremento del tempo di attraversamento del sistema produttivo di tutti gli ordini e non solo di quelli che subiscono le rilavorazioni.

Le conseguenze delle rilavorazioni e, soprattutto, degli scarti possono essere gestite mediante un'opportuna politica di rilascio: una prima possibilità è quella di rilasciare una maggiore quantità di ordini, che tenga conto a priori degli ordini che verranno scartati; la seconda possibilità è quella di rilasciare ordini aggiuntivi solo dopo che ne sia stata verificata la necessità. Se entrambe le decisioni hanno comunque effetti negativi sulle prestazioni del sistema produttivo, la seconda ha la caratteristica di aumentare il numero di ordini classificati come urgenti e di allungare ulteriormente i tempi di attraversamento degli ordini non urgenti.

5.3 Order Review and Release

La fase di Order Review and Release (ORR), come viene definita da Bergamaschi et al, 1997 si compone di tre fasi distinte: Order Entry, Preshop Pool Management, Order Release.

L'input della fase di ORR sono gli ordini in arrivo dai clienti, mentre l'output della stessa sono gli ordini rilasciati nel sistema produttivo.

5.3.1 Order Review Phase

Al fine di rendere confrontabili le prestazioni delle diverse configurazioni di sistema produttivo e dei diversi criteri di Order Release (che vedremo nel seguito e sono l'argomento di questa ricerca), è necessario che il Work-In-Process (WIP) di sistema sia mantenuto costante al variare delle configurazioni e dei diversi criteri di rilascio degli ordini. La fase di Order Entry si occupa di questo accettando, fra tutti gli ordini in arrivo, solo quelli che permettono di riempire la Pipeline, ma senza superare il limite di WIP prefissato. Questo permette, in accordo con Little, di confrontare le prestazioni di Gross Throughput Time (GTT) ed Output medio del sistema, in corrispondenza di diverse scelte gestionali.

Ecco nel dettaglio come funziona la fase di Order Entry nel sistema costruito. Si precisa che questo processo si ripete ogni mattina, prima dell'inizio della giornata lavorativa:

- 1) viene rilevato il carico totale presente nel sistema produttivo; questo carico è la somma dei tempi di lavorazione di tutti gli ordini che sono stati rilasciati nel sistema produttivo, ma non

- ne sono ancora usciti e quindi non hanno ancora completato tutte le lavorazioni;
- 2) a questo carico viene sommato il carico presente in Preshop Pool, che è dato dalla somma dei tempi di lavorazione di tutti gli ordini che sono stati accettati, ma che non sono ancora stati rilasciati nel sistema produttivo;
 - 3) la somma di questi due carichi è il carico iniziale del sistema; sarà uguale o inferiore alla prestabilita dimensione della Pipeline. Ciò che manca al raggiungimento della soglia fissata è uguale all'output del sistema e deve essere reintegrato;
 - 4) si scorre la lista degli ordini in attesa di entrare nel sistema, accettando ciascun ordine fino a quando non è possibile aggiungere il successivo senza superare la soglia.

In fase di Order Entry viene anche assegnata la Due Dates all'ordine, sommando il giorno attuale alla Due Dates originale. Esempio: l'ordine numero 2034 con Due Dates originale pari a 21 giorni (ricavata dal prodotto del Total Work Content * k), se entra nel sistema il giorno 230 dovrà essere consegnato entro il giorno 251, in caso contrario sarà segnalato come ordine consegnato in ritardo.

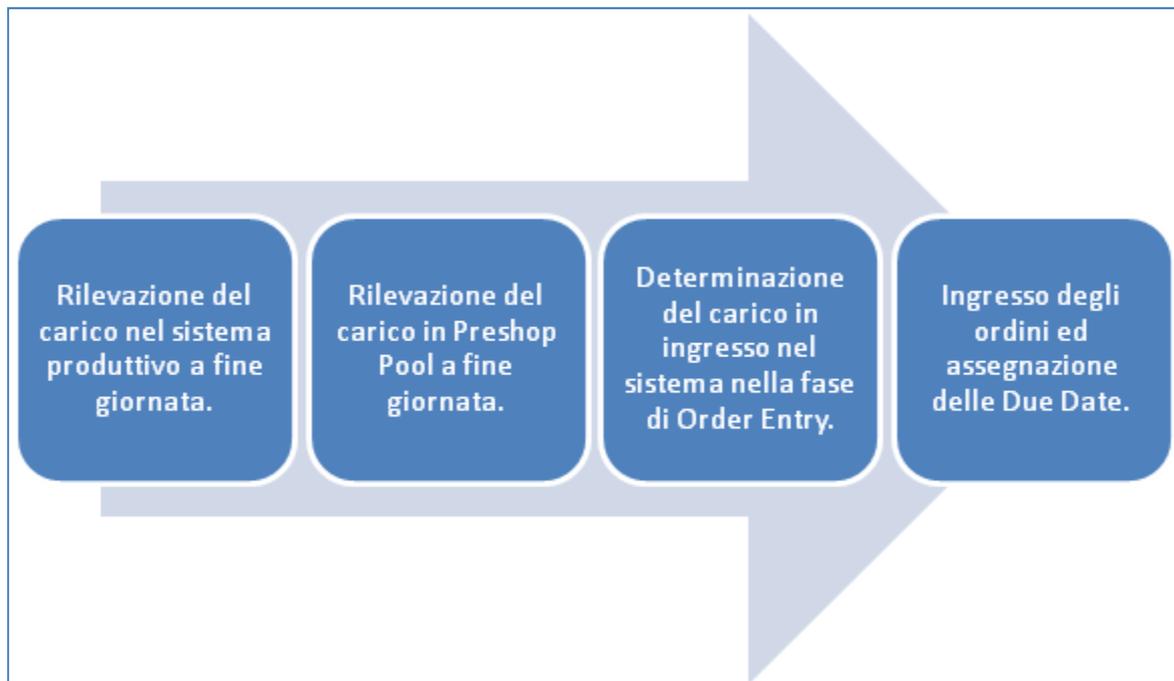


Figura 17 La fase di Order Entry

5.3.2 Preshop Pool Management

Quando la Preshop Pool è stata aggiornata con i nuovi ordini della giornata, questi ultimi vengono ordinati per Due Dates crescente (Earliest Due Dates _ EDD) in modo che gli algoritmi di Order Release scelgano prima gli ordini con priorità maggiore, dove la priorità è data dalla Due Dates.

5.3.3 Order Release Phase

Nella fase di Order Release sono selezionati, fra gli ordini disponibili nella Preshop Pool, gli ordini che dovranno essere rilasciati nel sistema all'inizio della giornata lavorativa. Dopo essere stati rilasciati, gli ordini vengono cancellati dalla Preshop Pool.

In questo lavoro di tesi si è scelto di confrontare due criteri di rilascio, valutando le prestazioni delle diverse configurazioni del sistema produttivo in corrispondenza dell'uno o dell'altro.

Nei prossimi capitoli descriveremo dettagliatamente come funziona ciascuno dei modelli: limitazione del carico e bilanciamento del carico. In estrema sintesi, il primo modello rilascia un numero di ordini sufficiente a raggiungere un certo livello di carico di ogni stazione senza superarlo, mentre il secondo rilascia gli ordini che meglio livellano il carico di ogni stazione attorno al livello prefissato.

Il carico di ogni stazione è dato dalla somma dei tempi di lavorazione riferiti a quella stazione per ogni job presente nel sistema produttivo; questo è ciò che in letteratura viene chiamato “carico aggregato”. Si dice aggregato perché il carico di ogni stazione non è dato esclusivamente dai tempi di lavorazione degli ordini che sono in coda sulla stazione stessa (*direct load*), ma anche dai tempi di lavorazione degli ordini che devono ancora attraversare quella stazione (*carico upstream*) e degli ordini che l'hanno già attraversata (*carico downstream*). Mentre è intuitivo comprendere la ragione della misura di carico diretto, è doveroso precisare per quale motivo è stato considerato anche il carico upstream e downstream: il carico upstream è un carico potenziale, nel senso che potrebbe nella giornata tramutarsi in carico diretto per la stazione, una volta che il pezzo ha ricevuto le lavorazioni delle stazioni precedenti; è importante includere nella misura del carico anche il carico downstream perché, se esso non fosse incluso, l'algoritmo di rilascio sarebbe portato a caricare

eccessivamente le prime stazioni a sfavore delle ultime. Ad incidere sul carico sarebbero infatti il carico diretto (indipendente dalla posizione della stazione all'interno del sistema produttivo) ed il carico upstream: per ovvie ragioni il carico upstream tende ad essere più alto per le stazioni più a valle rispetto alle stazioni più a monte.

Non da ultimo, il carico aggregato è una misura molto più facile (e dunque economica) da implementare in quanto non rende necessaria la rilevazione della posizione di ogni ordine contenuto nel sistema produttivo, ma è sufficiente conoscere i tempi standard di lavorazione degli ordini contenuti nel sistema produttivo e sommarli per ogni stazione.

Il livello di carico che deve essere raggiunto in ogni stazione è chiamato “norma”; all'aumentare di questo parametro il carico presente nella Pipeline (che è costante a causa dei criteri impostati nella fase di Order Entry) viene progressivamente spostato dalla Preshop Pool al sistema produttivo; in altre parole, all'aumentare della norma aumenta il WIP presente nel sistema produttivo. Agendo tramite la norma è possibile quindi valutare il comportamento del sistema produttivo e delle diverse configurazioni in corrispondenza di differenti livelli di carico oltre che di una Preshop Pool più o meno ampia.

Una norma più ristretta serve a contenere il livello di WIP del sistema produttivo ed a contenere conseguentemente il tempo di attraversamento dello stesso (o Shop Floor Time); una norma più ampia è scelta se si desidera massimizzare la saturazione delle stazioni di lavoro e conseguentemente aumentare l'output medio del sistema a fronte di una riduzione del tempo di attraversamento dell'intero sistema (o Gross Throughput Time). L'aumento della saturazione delle stazioni è dato dalla maggiore entità delle code di pezzi in attesa di essere serviti dalle stazioni di lavoro: ciò evita la possibilità che la stazione rimanga scarica durante il tempo di apertura degli impianti a causa della mancanza di pezzi in attesa di lavorazione su di essa.

Si riporta di seguito lo schema di funzionamento del processo di Order Release implementato.



Figura 18 Il processo di Order Release

5.3.4 L'Order Release della Limitazione di carico Total Shop Load (Upper Bound)

La limitazione del carico si occupa di rilasciare nel sistema produttivo, scegliendoli fra quelli presenti nella Preshop Pool, gli ordini che permettono di meglio raggiungere il livello di carico desiderato e fissato dalla norma, ma senza eccederla (in questa ricerca non considereremo la limitazione inferiore di carico, ma solo la limitazione superiore).

Per fare ciò, al momento dell'Order Release, sono eseguiti i seguenti passaggi:

1. è rilevato il carico totale presente nel sistema produttivo, tramite la somma dei tempi di lavorazione associati a ciascuno dei job presenti nel sistema produttivo, che quindi sono già stati rilasciati, ma non sono ancora stati ultimati e dunque consegnati al cliente;
2. il carico totale presente nel sistema produttivo viene ripartito sul numero di stazioni presenti nel sistema produttivo (nel nostro caso sono venti), considerando il carico residuo come equamente distribuito sulle diverse stazioni;
3. si determina il carico da rilasciare su ogni stazione calcolando la differenza fra la norma ed il carico inizialmente presente su ogni stazione; questa differenza, nell'approccio di limitazione di carico, sarà sempre non negativa;

4. si esegue l'algoritmo di selezione degli ordini, eseguendolo sulla Preshop Pool, al cui interno gli ordini sono disposti per Due Dates crescente, in seguito alle operazioni di Preshop Pool Management: se i tempi di lavorazione del primo ordine candidato al rilascio, quando sommati ai tempi di lavorazione degli ordini che sono già stati scelti per il rilascio, eccedono il carico da rilasciare, passare all'ordine successivo senza rilasciare l'ordine in esame; in caso contrario rilasciare l'ordine, aggiornare la somma dei tempi di lavorazione di ogni stazione per ogni ordine rilasciato e considerare l'ordine successivo. L'algoritmo termina quando si è considerato anche l'ultimo ordine candidato al rilascio;
5. gli ordini rilasciati vengono cancellati dalla Preshop Pool ed introdotti nel sistema produttivo.

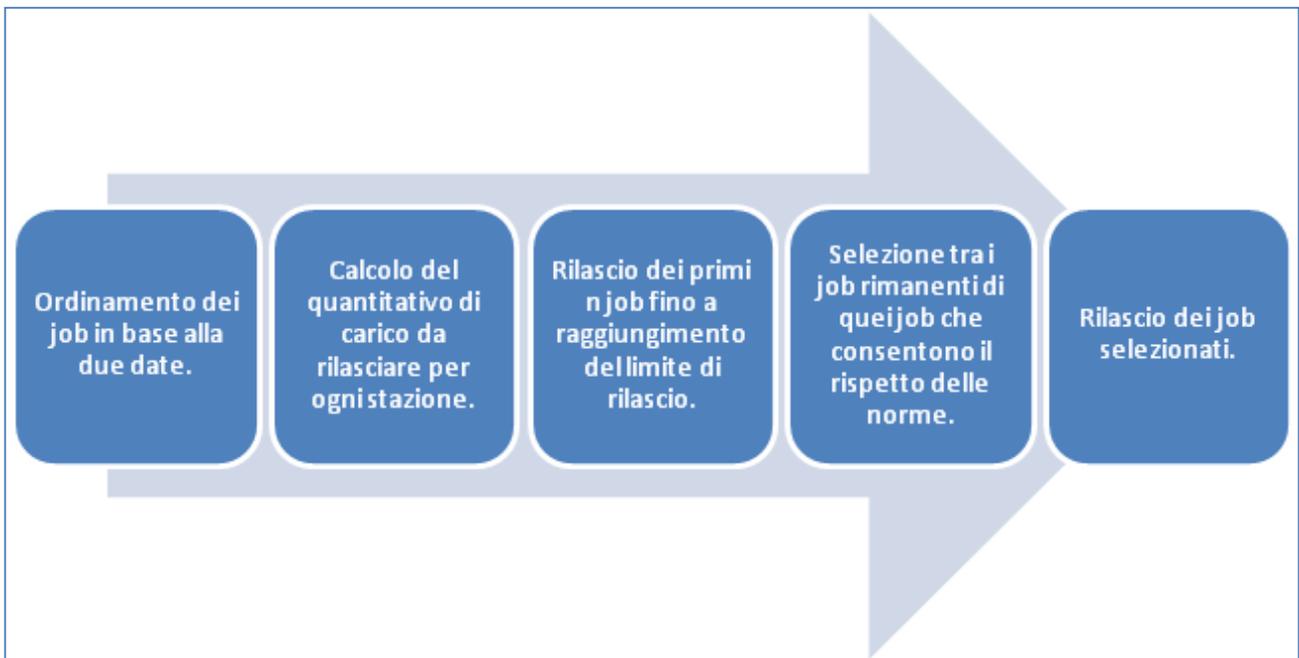


Figura 19 L'Order Release per la limitazione Total Shop Load

5.3.5 La fase di Order Release del Modello di Bilanciamento dei Carichi di lavoro.

Il modello di bilanciamento dei carichi di lavoro studiato si comporta in maniera molto simile alla limitazione nella fase di Order Release. La schematizzazione del funzionamento è il seguente:

- 1- rilevazione del carico totale presente nel sistema produttivo a fine serata.

2- Calcolo del quantitativo di lavoro rilasciabile per ogni stazione nel seguente modo:

Carico di lavoro per stazione =

$$\frac{(\text{Norma complessiva di sistema} - \text{Carico di sistema a fine giornata})}{N \text{ Stazioni}}$$

- 3- Lancio del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.
- 4- Sequenziamento EDD dei job prima del rilascio.
- 5- Rilascio dei job selezionati ed ordinati.



Figura 20 L'Order Release per il bilanciamento dei carichi di lavoro

5.4 Presentazione del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro

Viene presentato in questo capitolo il modello di bilanciamento dei carichi sviluppato ai fini di un corretto rilascio dei job in un sistema composto essenzialmente da due stadi: fabbricazione e assemblaggio.

Tale modello prende spunto da Cigolini e Portioli 2002, dove viene presentato il loro modello di bilanciamento dei carichi di lavoro. Il vantaggio rispetto alla semplice limitazione dei carichi come dimostrato dagli autori comporta un miglioramento complessivo delle performance. Nella nostra modellazione si prende spunto dal loro lavoro, andando ad aggiungere degli elementi mancanti

come la visibilità estesa della schedulazione e il rilascio in sistemi più complessi del semplice general flow shop, ovvero in sistemi dove la puntualità è una caratteristica fondamentale per la riduzione dei lead time e del WIP.

Il nostro modello prende spunto anche dalle ricerche di Bertrand 2002 nell'ambito della schedulazione in assembly shop. L'autore dimostra come il rilascio contemporaneo dei componenti risulti maggiormente performante dal punto di vista delle performance di timing. Bertrand 2002 suggerisce questa tipologia dopo averla messa a confronto con un metodo più tradizionale in cui i componenti vengono rilasciati singolarmente in base alla Due Dates. Partendo dal presupposto che i job shop e il contesto di variabilità in cui sono inseriti non consentono una stima puntuale dei tempi, dimostra come un rilascio congiunto sia maggiormente performante. Rimane aperta la questione del WIP necessario, in quanto molto spesso i componenti si trovano in attesa del completamento delle altre parti.

Riassumendo la modellazione che seguirà comporta due caratteristiche principali:

- 1- Funzione obiettivo volta ad ottimizzare il bilanciamento dei carichi di lavoro per ogni linea produttiva
- 2- Rilascio congiunto delle varie componenti del job

Tutte le altre caratteristiche e parametri necessari al corretto funzionamento del modello vengono descritti in seguito.

5.4.1 I parametri del modello.

La scelta dei parametri del modello è un'operazione molto delicata, Land et al 2006 suggerisce l'importanza di certi parametri nell'utilizzo delle tecniche WLC e ne indica delle linee guida per la loro determinazione. In seguito vengono presentati i vari parametri e le motivazioni che ci hanno spinto fissarli su determinati valori.

5.4.1.1 Time Limit

La Time Limit è il periodo di riferimento nel quale vengono considerati i job per il rilascio. Avendo una schedulazione giornaliera con visibilità estesa, si sceglie inizialmente una time limit pari a 15 giorni lavorativi quindi tre settimane. Tale scelta è motivata dalle analisi di Land et al 2006 in cui si mostra come le prestazioni migliori di sistema siano ottenute con Time Limit infinita. Altri autori in letteratura hanno trattato il problema della determinazione della Time Limit (Perona e Portioli 1998) comprendendone la grande importanza. Nel nostro caso una Time Limit di quindici giorni dovrebbe portare un buon compromesso tra i tempi di calcolo del modello di bilanciamento e i miglioramenti apportati da una Time Limit lunga.

5.4.1.2 Tempo di attraversamento

Il tempo di attraversamento viene determinato sulla base del carico già presente a sistema maggiorato del contenuto di lavoro degli ordini appena rilasciati. La formulazione utilizzata nel modello è la seguente:

$$T_{Att} = \frac{(Carico\ rilasciato + Coda) * Routing}{Minuti\ lavorati\ al\ giorno}$$

Questo T_{att} viene calcolato per ognuna delle 4 sub linee. Tale calcolo del tempo di attraversamento tiene conto del routing e del carico di sistema. Appare evidente come andando ad agire sui due parametri si possa aumentare o ridurre il tempo di attraversamento del sistema produttivo. Ad esempio job aventi un routing molto basso (50% delle stazioni) avranno un tempo di attraversamento inferiore rispetto a job più complessi. La norma stessa applicata al sistema influisce sul tempo di attraversamento in quanto va ad impattare sulle code delle varie stazioni che i job devono attraversare. In qualunque caso la stima dei tempi di attraversamento come identificato da Land et al 2006 non presenta delle criticità in termini di capacità di raggiungimento degli obiettivi del modello. Di conseguenza la stima del tempo di attraversamento presentata viene ritenuta sufficiente per il buon funzionamento del sistema.

5.4.1.3 Norma

Volendo utilizzare una modalità di rilevazione del carico di tipo aggregato secondo l'approccio Total Shop Load, conviene porre una norma costante. Il carico viene allocato direttamente in macchina e lo si elimina nel momento in cui il job lascia il sistema, si considera quindi anche il carico downstream associato ad un job e non solo il carico upstream più il carico diretto. Tale modalità benché non tenga conto della posizione del job all'interno del sistema risulta molto più robusta e meno nervosa rispetto alle altre, soprattutto in presenza di un'elevata variabilità nei tempi di lavorazione. Considerare il sistema produttivo nel suo carico totale garantisce una migliore applicazione del principio dell'input output, cui i modelli WLC fanno riferimento.

La norma di una stazione sarà quindi pari a :

Norma = Carico desiderato inizio giornata / NStaz

Inoltre tale modalità di aggregazione del carico è di più facile implementazione, fattore questo molto importante in un sistema composto da molte macchine con flussi che devono essere sincronizzati e forte variabilità. La norma è costante in quanto il contenuto di lavoro del job rimane a sistema finché non finisce l'ultima lavorazione, di conseguenza non è necessario porre norme crescenti come invece fanno Bechte 1988 o Land & Gaalman 1996.

5.4.1.4 Due Dates

La Due Dates viene determinata sulla base del contenuto di lavoro dell'ordine o total work content, moltiplicata per un fattore che riassume in sé il comportamento del sistema. La formulazione del calcolo della Due Dates è la seguente:

$$\text{Due Date} = \text{Total Work Content} * \text{Slack}$$

Lo Slack viene determinato tramite simulazione, sulla base dei dati ottenuti. Tale formulazione consente di ottenere Due Dates molto realistiche, e diverse a seconda del contenuto di lavoro del job. Lo Slack riassume in sé due componenti del sistema: il tempo trascorso in Preshop Pool e il tempo di lavorazione nel sistema produttivo. Grazie alla caratteristica dell'approccio WLC che

consente di ottenere un carico a livello di sistema sempre uguale, è facile determinare dei valori per parametri molto complessi come la Due Dates, fondamentale per il successo dell'azienda.

In particolare per le simulazioni lo Slack identificato dal coefficiente K è stato calcolato per ogni Pipeline in modo tale per cui i ritardi della limitazione all'immediate release fossero intorno al 15% per la configurazione senza variabilità. Questa scelta è stata fatta per permettere una valutazione il più possibile oggettiva circa i vantaggi del bilanciamento nei confronti della limitazione mantenendo dei K fissati per ogni Pipeline, non consentendo quindi di variare le Due Dates in maniera favorevole all'una o all'altra configurazione.

5.4.1.5 Istante di rilascio al più tardi

Un importante parametro necessario al corretto funzionamento del modello è l'istante di rilascio al più tardi. Questo parametro determinano una finestra temporale nella quale rilasciare i job in modo tale da non generare alcun ritardo. Per un corretto calcolo degli istanti di rilascio è necessario conoscere i valori di due parametri:

- 1- Due Dates.
- 2- Tempo di Attraversamento
- 3- La soglia di anticipo

Land et al 2006 prende in considerazione la soglia di anticipo, cercando di determinarne il valore ottimale. Le conclusioni alle quali giunge sono che mentre da un lato valori ampi di soglia consentono al modello un miglior bilanciamento avendo più job da considerare e potendoli gestire per più giorni, derivando quindi delle miglior performance in termini sia di timing che di bilanciamento, dall'altro una soglia eccessivamente elevata causerebbe troppi job in anticipo, con conseguente aumento del WIP o peggio ancora dei magazzini di prodotto finito. Nel nostro modello non è stata inserita una soglia di anticipo cercando di garantire al modello di bilanciamento il maggior numero possibile di job tra cui scegliere.

Passando ora alla formulazione vera e propria, gli istanti di rilascio vengono determinati nel seguente modo:

$$\text{Istante di rilascio al più tardi} = \text{Due Date} - \text{Tempo Attraversamento}$$

5.4.1.6 Pesi giornalieri

Per un corretto utilizzo della funzione di bilanciamento è necessario introdurre dei pesi che vadano a modificare l'impatto degli scarti superiori e inferiori rispetto al giorno nel quale sto schedulando. Difatti è facilmente comprensibile come in un modello di bilanciamento a visibilità estesa gli ultimi giorni contino relativamente poco, in quanto non sono nemmeno presenti gli ordini nuovi giunti a sistema. Per questo motivo risulta necessaria l'introduzione di pesi che diminuiscono esponenzialmente con il passare dei giorni all'interno del periodo di schedulazione. Si è scelto appunto per dare maggiore importanza ai primi giorni e meno agli ultimi di non utilizzare dei pesi che diminuissero linearmente, ma appunto esponenzialmente, secondo la formula:

$$Peso (giorno i - esimo) = \frac{1}{x^{giorno\ i-esimo}}$$

Con x numero positivo.

Nel grafico seguente sono riportati i valori dei pesi per quattro diversi valori di x, precisamente x = 2, x = 3, x = 4.

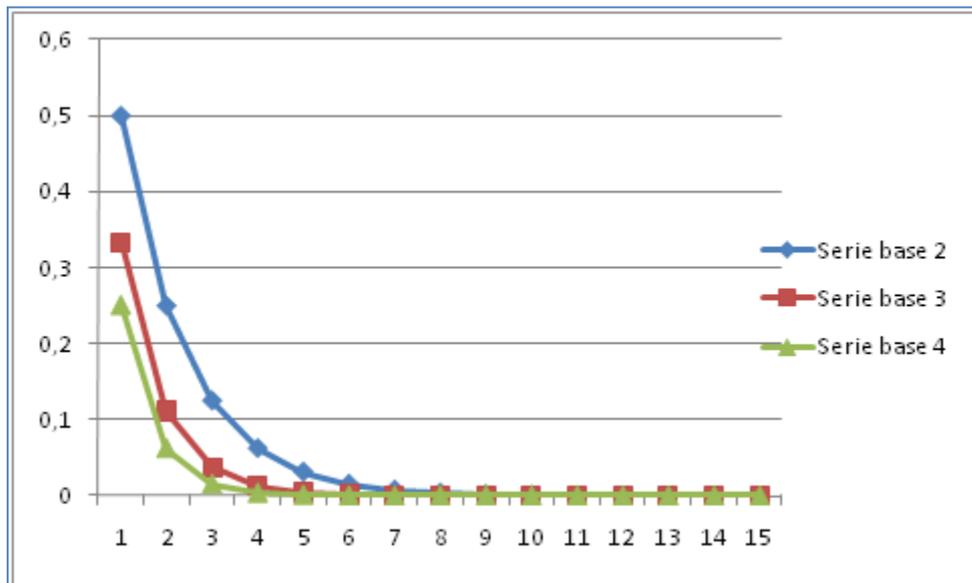


Figura 21 La serie di pesi con x intero

L'utilizzo di pesi interi comporta una notevole differenza già nei primi giorni, dando una notevole importanza alla schedulazione di breve periodo, minimizzando l'effetto della schedulazione estesa. Per questo motivo dopo aver effettuato varie prove di simulazione con differenti parametri si è deciso di optare per valori di x non interi, in modo da schedulare uniformemente nei primi giorni del periodo di schedulazione. Come è facilmente visibile in figura i pesi decrescono molto meno velocemente, garantendo una schedulazione con una effettiva visibilità di medio-lungo periodo.

La scelta finale del peso utilizzato è stata per $x = 1.5$.

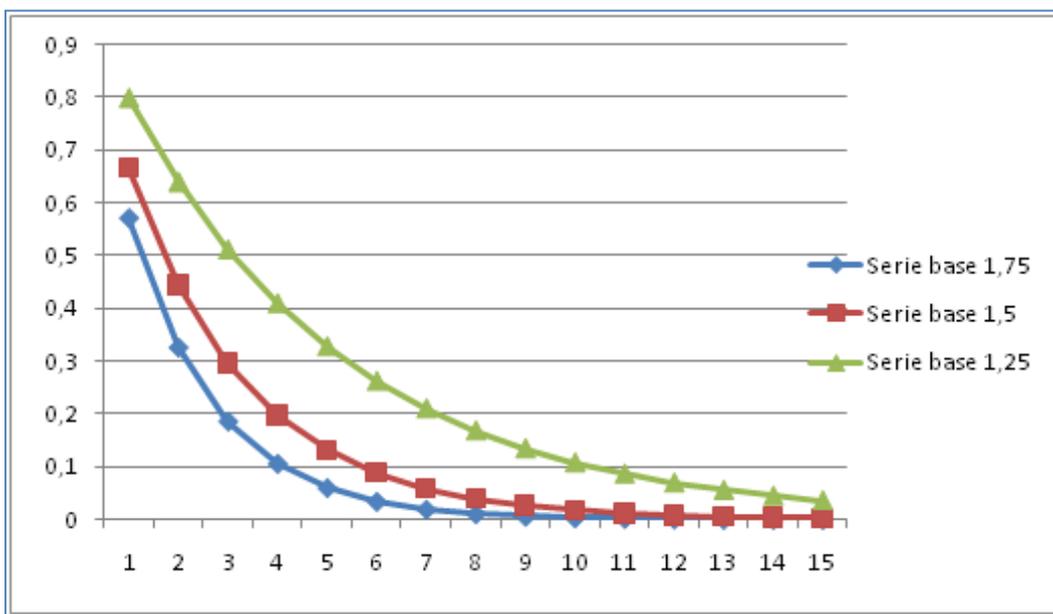


Figura 22 La serie di pesi con x non intero

5.4.2 Presentazione del modello.

Tale modello si preoccupa di bilanciare il carico di lavoro sulle macchine del sistema e prende spunto da Cigolini & Portioli, 2002. Il vantaggio del bilanciamento rispetto ad altri sistemi di Order Release basati sulla limitazione del carico è il punto fondamentale della tesi. Il modello assegnando una Due Dates comune ai vari componenti schedula la produzione a monte sulla base della Due Dates, del carico di lavoro presente a sistema e relative norme andando a considerare solo i job il cui momento di rilascio rientra nella time limit. (tutti i parametri sono stati definiti meglio in precedenza). Inoltre il modello, per una corretta gestione del rilascio dei componenti, effettua un

rilascio simultaneo dei componenti, essendo i tempi di attraversamento molto simili, per evitare l'eventualità in cui una parte venga rilasciata molto presto mentre l'altra viene rilasciata al più tardi, creando attese e WIP nella prima macchina dell'assemblaggio. Ciò è garantito dal vincolo (7), tale modalità di rilascio è stata indicata da Bertrand 2002 come meglio performante nel caso di sistemi aventi componenti da fabbricare ed assemblare. Nel suo modello di limitazione dimostra come il rilascio contemporaneo dei job sia migliore in termini di rispetto delle Due Dates a confronto di altre modalità in cui i componenti sono rilasciati in base alle loro date di rilascio. inoltre si introduce una variabile binaria che semplifica il modello, che indica che i componenti del job sono stati rilasciati e che quindi è possibile allocare alle macchine in assemblaggio il tempo di lavorazione preventivato. E' presente inoltre un vincolo (5), che obbliga il rilascio di un job se la data di rilascio al più tardi è stata superata. Successivamente al rilascio il primo sequenziamento dei job segue una logica FCFS, secondo la quale i job sono sequenziali in base al nome che poi altro non è che un numero. Il sequenziamento avviene in ordine di nome crescente essendo i job aventi un numero più basso arrivati prima nel sistema. Tale logica garantisce anche che i componenti siano sequenziali allo stesso modo sulle tre linee, garantendo tempi di attraversamento simili.

Si definiscono inoltre per il corretto funzionamento del modello:

NStaz = numero stazioni del sistema produttivo (si considerano 20 stazioni, in particolare 5 stazioni per ogni sub linea)

NOrdini = numero ordini presenti in Preshop Pool, varia da periodo a periodo, dipende dagli ordini in ingresso e dagli ordini già rilasciati. La variazione di ordini in Preshop Pool non è comunque casuale ma è volta a mantenere all'interno del sistema un contenuto di lavoro predeterminato.

A, B, C = identificatore dei tre differenti componenti da fabbricare. Il componente A viene prodotto sulla prima linea, il B sulla seconda, il C sulla terza e in seguito vengono assemblati insieme

$m = 1, \dots, \text{numero stazioni}$

$j = 1, \dots, \text{numero job}$

$x(j, A)$ = variabile binaria che vale 1 se il componente A del job j viene rilasciato.

$x(j, B)$ = variabile binaria che vale 1 se il componente B del job j viene rilasciato.

$x(j, C)$ = variabile binaria che vale 1 se il componente C del job j viene rilasciato.

$X(j, D)$ = variabile binaria, indica il prodotto ottenuto come assemblaggio di A, B, C si attiva nel momento in cui A, B, C sono rilasciati, ed è utile come si vedrà più avanti per allocazione dei tempi di lavorazione alle macchine.

Carico = valore del carico presente in ogni stazione. Deriva dal carico presente a fine serata nel sistema complessivo suddiviso per le venti stazioni.

Carico = Carico totale sistema / numero stazioni

Livello Obiettivo = Ore di lavoro giornaliera + norma, indica il carico di lavoro obiettivo che si intende avere nel sistema in seguito al rilascio. E' composto da due componenti, le ore di lavoro giornaliera per stazione (nel nostro caso 1 macchina x 8 ore al giorno), e la norma descritta in precedenza. Andando a moltiplicare il livello obiettivo per le 20 macchine si ottiene il carico totale del sistema.

Scarto Superiore (m) = max (0; (Quantità rilasciata m - (Livello Obiettivo - Carico))

Indica quindi di quanto supero la norma per ottenere un miglior bilanciamento di sistema.

Allo stesso modo si definisce lo scarto inferiore SI, con segni invertiti:

Scarto Inferiore (m) = max (0; (Livello Obiettivo - Carico) - (Quantità rilasciata m))

Oggi: indica la data in cui avviene la schedulazione. Viene usata come riferimento per capire se i job sono in ritardo o meno e in tal caso obbligarli a essere rilasciati.

Pesi giornalieri : determinati come mostrato nel paragrafo 5.4.1.6.

Funzione obiettivo:

$$\min \sum_{P=1}^{N \text{ giorni}} \sum_{L=1}^{N \text{ linee}} \sum_{m=1}^{N \text{ Staz}} \text{peso}(P) * (SS_m + SI_m)^2$$

Questa funzione obiettivo si preoccupa di bilanciare il carico di lavoro allocato alle m stazioni permettendo anche un esubero del carico allocato purché bilanci al meglio il sistema. Probabilmente sarebbe necessario dare un peso maggiore allo scarto superiore, per evitare sovraccarichi del sistema che porterebbero in pratica all'inutilità delle norme.

Vincoli del modello:

Per prima cosa si riportano i vincoli che consentono il calcolo dello scarto superiore ed inferiore, componenti la funzione obiettivo :

$$1. \text{ Scarto Superiore } (m) = \max (0; (\text{Quantità rilasciata } m - (\text{Livello Obiettivo} - \text{Carico})$$

$$\forall m = 1 \dots NStaz$$

$$2. \text{ Scarto Inferiore } (m) = \max (0; (\text{Livello Obiettivo} - \text{Carico}) - (\text{Quantità rilasciata } m))$$

$$\forall m = 1 \dots NStaz$$

Segue il calcolo della Quantità rilasciata m , ottenuta dal prodotto della variabile binaria $X (A, j)$ per il tempo di lavorazione sulla stazione m del job j $TLav (A, j, m)$.

$$3. \text{ Quantità rilasciata } (m) = \sum_{j=1}^{NOrdini} x (A, j) * TLav (A, j, m) \forall A, B, C, D \quad m =$$

$$1 \dots NStaz$$

Nel prossimo vincolo si riduce la scelta per il rilascio per quei job che hanno una data di rilascio al più presto e al più tardi minore della time limit.

Se (T Tardi (j) < Time Limit)

$$4. X (A, j) \in [0, 1] \forall A, B, C, j$$

Ora si obbliga la schedulazione di quei job non ancora rilasciati per cui la data di rilascio al più tardi è inferiore alla data odierna di schedulazione

Se (T Tardi in giorni(j) < Oggi)

$$5. X (A, j) = 1 \quad \forall A, B, C, j$$

Il prossimo vincolo collega il rilascio di un componente all'altro. Difatti essendo i tempi di attraversamento mediamente uguali da parte dei due componenti è opportuno rilasciarli insieme, di modo da evitare attese inutili nel buffer della prima stazione di assemblaggio. Tale motivazione è spinta anche dall'inserimento delle date di rilascio al più presto e al più tardi. Se infatti da un lato si riescono a considerare più job per il rilascio e quindi avere maggiore bilanciamento, dall'altro si rischia che alcuni componenti vengano rilasciati con troppo anticipo rispetto agli altri. Per questo motivo il modello da noi proposto vincola il rilascio di un componente solo se è stato rilasciato anche l'altro.

$$6. X (A, j) = X (B, j) \forall A, B, C, j$$

Ora risulta necessaria la creazione di un'altra variabile binaria, definita in precedenza come $X (C, j)$ che serve ad indicare che i due componenti del job j sono stati rilasciati, di conseguenza possono essere allocati alle stazioni di assemblaggio i tempi di lavorazione stimati per il prodotto C ottenuto dall'assemblaggio di A e B .

$$7. X (A, j) + X (B, j) = 2 * X (C, j) \quad \forall A, B, C, j$$

Riassumendo la formulazione del modello è la seguente:

Funzione obiettivo:

$$\min \sum_{m=1}^{NStaz} (SS m - SI m)$$

Vincoli:

- 1) **Scarto Superiore** (m) = $\max (0; (\text{Quantità rilasciata } m + \text{Carico } m) - \text{Livello Obiettivo})$
 $\forall m = 1 \dots NStaz$
- 2) **Scarto Inferiore** (m) = $\max (0; + \text{Livello Obiettivo} - (\text{Quantità rilasciata } m + \text{Carico } m))$
 $\forall m = 1 \dots NStaz$
- 3) **Quantità rilasciata** (m) = $\sum_{j=1}^{NOrdini} x (A, j) * TLav (A, j, m) \quad \forall A, B, C, m = 1 \dots NStaz$

Se (T Tardi (j) < Time Limit)

$$4) X (A, j) \in [0, 1] \quad \forall A, B, j$$

Se (T Tardi in giorni (j) < Oggi)

$$5) X (A, j) = 1 \quad \forall A, B, j$$

$$6) X (A, j) = X (B, j) \quad \forall A, B, j$$

$$7) X(A, j) + X(B, j) = 2 * X(C, j) \quad \forall A, B, C, j$$

5.4.2.1 Classificazione del sistema produttivo secondo lo schema di Bergamaschi

La proposta di classificazione di (Bergamaschi, et al., 1997) ci è utile per descrivere con maggiore chiarezza il sistema produttivo preso in considerazione. Nello schema seguente vengono riprese brevemente le otto dimensioni di analisi, precisando quali sono state le nostre scelte.

Modalità di rilascio degli ordini: gli ordini possono essere rilasciati a sistema secondo un criterio orientato al carico del sistema oppure secondo un criterio orientato alla data di consegna del singolo ordine. Il sistema preso in considerazione impiega un criterio di controllo del carico ed è in base a questo criterio che viene deciso il rilascio degli ordini. L'assunzione alla base di ciò è che un sistema il cui carico è correttamente gestito permette di realizzare delle prestazioni migliori rispetto ad un sistema di rilascio che trascura lo stato del sistema produttivo e rilascia gli ordini esclusivamente in base all'urgenza che essi presentano. La data di consegna è impiegata esclusivamente per ordinare i jobs nella Preshop Pool, ma senza limitare le possibilità del meccanismo di rilascio; qualunque sia la logica impiegata per selezionare gli ordini da rilasciare, essi possono essere scelti fra tutti quelli disponibili nella Preshop Pool (si dice che il rilascio ha una “visibilità completa della Preshop Pool”).

Convenzione temporale: il rilascio può essere effettuato in qualsiasi istante di tempo oppure ad intervalli di tempo prefissati. È stato scelto di effettuare il rilascio ad intervalli discreti di tempo, con frequenza giornaliera. Si suppone che gli ordini arrivino durante l'intera giornata lavorativa, ma le operazioni di aggiornamento della Preshop Pool e di scelta degli ordini da rilasciare viene effettuata sempre la mattina, appena prima dell'inizio della giornata lavorativa.

Misura del carico: il carico può essere espresso in numero di pezzi oppure in quantità di lavoro necessaria a produrre gli ordini. La stessa quantità di lavoro può essere espressa in ore (o equivalente unità di tempo) oppure in percentuale di capacità produttiva. Il contesto di riferimento di questo lavoro di ricerca (il Make-To-Order) presenta caratteristiche per cui la quantità di lavoro contenuta in un singolo pezzo (ordine) può essere molto variabile da un ordine all'altro; per questo

motivo è stato scelto di esprimere il carico in quantità di lavoro; fra le due possibili misure della quantità di lavoro è stata scelta la più intuitiva misura che sono i minuti di lavoro necessari ad eseguire le lavorazioni. La capacità produttiva disponibile è infatti uguale per tutte le stazioni di lavoro e dunque è ragionevole considerare semplicemente i minuti di lavorazione richiesti.

Aggregazione del carico: il carico può essere misurato a livello dell'intero sistema produttivo, esclusivamente sulle macchine "collo di bottiglia" oppure su ogni macchina. Ancora una volta è stata scelta la via della semplicità per ottenere risultati più chiari e significativi; il carico è stato quindi misurato sull'intero sistema produttivo. Questa è inoltre la modalità di misurazione del carico più diffusa nei contesti reali, a causa della sua semplicità ed efficacia.

Modalità di rilevazione del carico: il carico può essere rilevato secondo un approccio atemporale, che non tiene conto dell'istante in cui il carico incide effettivamente sulle stazioni, secondo un approccio di tipo "time bucketing", che prevede la suddivisione dell'orizzonte temporale in periodi entro i quali rilevare i carichi che prevedibilmente saranno sulle varie stazioni del sistema produttivo, oppure secondo un approccio di tipo probabilistico, che prevede la rilevazione del carico proporzionalmente alla probabilità con cui esso si realizzerà nell'orizzonte di programmazione. Per ragioni analoghe a quelle che ci hanno spinti a misurare il carico a livello dell'intero sistema produttivo, è stato scelto di effettuare la rilevazione del carico secondo un approccio atemporale; anche questa scelta, come la precedente, contribuisce a rendere il sistema più stabile.

Modalità di controllo del carico: sostanzialmente è possibile limitare il carico (superiormente, inferiormente, superiormente ed inferiormente) oppure bilanciare il carico. Questa ricerca prova a dare una risposta alla domanda su quale scelta sia più efficace nel contesto del Make-To-Order fra le due appena proposte: la limitazione superiore del carico e bilanciamento. Non viene considerata la possibilità di limitare inferiormente il carico, né quella di porre entrambi i limiti, superiore ed inferiore, in quanto (Cigolini, et al., 2002) hanno dimostrato lo scarso vantaggio di queste due modalità di limitazione. Le prestazioni del nostro sistema produttivo sono state quindi misurate in corrispondenza della limitazione superiore del carico e del bilanciamento del carico.

Pianificazione della capacità: può essere attiva (è possibile ricorrere ad extra capacità) o passiva (la capacità è fissata). Desiderando isolare gli effetti della sola variazione della modalità di rilascio, è stato scelto pertanto di non permettere il ricorso ad extra capacità produttiva. La capacità giornaliera è fissata a 480 minuti per ogni stazione di lavoro.

Visibilità della pianificazione: può essere limitata al breve periodo oppure estesa a diversi periodi successivi al primo e dunque orientata al lungo periodo. La modalità di rilascio può impattare su questa scelta: la limitazione del carico è naturalmente orientata al breve periodo in quanto il suo scopo è di evitare che il massimo livello di carico ammissibile (norma) venga superato nel periodo successivo; il bilanciamento del carico, invece, è orientato al medio termine. Per la limitazione infatti è sufficiente che il carico non sia superato su nessuna stazione e su nessun periodo, ma l'algoritmo che garantisce il soddisfacimento di questa condizione nel periodo successivo, lo garantirà automaticamente nei periodi successivi. Se il buon bilanciamento del carico fra le varie stazioni può essere effettuato ad ogni periodo (congruentemente alla limitazione), la bontà del bilanciamento dei periodi successivi al primo dipende dalle scelte che vengono fatte nei periodi precedenti; per tale motivo il modello di rilascio orientato al bilanciamento del carico deve tenere conto, seppure con peso progressivamente decrescente, della bontà del bilanciamento che potrà effettuare nei periodi successivi a quello in cui avverrà il rilascio.

Nella pagina seguente viene schematizzato il modello di bilanciamento secondo Bergamaschi, et al., 1997.

Modalità di rilascio degli ordini	• Load Limited
Convenzione temporale	• Discreta
Modalità di misurazione del carico	• Contenuto di lavoro dei job in minuti
Aggregazione del carico di lavoro	• Total shop load
Modalità di rilevazione del carico di lavoro	• Approccio atemporale
Controllo del carico di lavoro	• Bilanciamento del carico di lavoro
Pianificazione della capacità	• Passiva
Visibilità della schedulazione	• Visibilità estesa

Figura 23 La classificazione secondo Bergamaschi del modello sviluppato

Capitolo 6: La conduzione degli esperimenti

In questo capito viene affrontato un problema fondamentale per il corretto funzionamento delle simulazioni. Vengono affrontati i temi più importanti inerenti la progettazione di una campagna di simulazione, in particolare: la determinazione del transitori

La conduzione degli esperimenti: la progettazione della simulazione

6 La conduzione degli esperimenti, parametri e variabili.

Lo studio del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro oggetto di tesi ha richiesto il lancio di numerose run di simulazione, ognuna con determinate variabili e parametri differenti. Come enunciato nei capitoli precedenti le simulazioni erano volte essenzialmente a verificare la solidità del modello con differenti livelli di Pipeline e differenti livelli di variabilità.

Per prima cosa è opportuno identificare quali sono state le variabili ed i parametri degli esperimenti effettuati.

Variabili:

- 1- **Routing.** Il routing è una delle variabili utilizzate e permette di simulare due sistemi produttivi differenti:
 - a. General flow shop con routing pari all'80% delle stazioni per la configurazione con alta variabilità
 - b. Pure flow shop con routing pari al 100% delle stazioni per la configurazione senza variabilità.
- 2- **Possibilità di saltare le linee di fabbricazione.** Questa variabile consente ad alcuni job di non attraversare una o più linee di fabbricazione. In particolare :
 - a. Nel caso di sistema con alta variabilità il 10 % dei job salta una linea di fabbricazione
 - b. Nel caso di sistema senza variabilità tutti i job attraversano tutte le linee
- 3- **Presenza di rilavorazioni o ricircoli.** Questa variabile causa il ricircolo di alcuni job che vengono rilevati come difettosi dalle due stazioni di controllo qualità presenti nel sistema. Maggiormente nel dettaglio:
 - a. Nel caso di sistema con alta variabilità ogni stazione di controllo qualità individua delle difettosità nel 10 % dei job che la attraversano.
 - b. Nel caso di sistema senza variabilità non esistono job difettosi.

- 4- **Dimensioni della Pipeline.** Questa importante variabile permette di analizzare le performance dei due modelli analizzati al variare del livello di carico complessivamente presente all'interno del sistema. I livelli di carico analizzati sono quattro in totale: due per la prima parte del lavoro di tesi e due per la seconda ed ultima parte. In particolare:
- 130000 minuti. Dimensioni della Pipeline utilizzata per la seconda parte del lavoro di tesi nelle configurazioni con e senza variabilità.
 - 210000 minuti. Dimensioni della Pipeline utilizzata per la prima parte del lavoro di tesi nelle configurazioni con e senza variabilità.
 - 105000 minuti. Dimensioni della Pipeline utilizzata per la terza parte del lavoro di tesi nelle configurazioni con e senza variabilità.
 - 170000 minuti. Dimensioni della Pipeline utilizzata per la terza parte del lavoro di tesi nelle configurazioni con e senza variabilità.

La conduzione degli esperimenti si è basata sull'individuazione di due configurazioni con differente livello di variabilità, analizzate contemporaneamente su dei livelli di Pipeline differenti. In particolare la presenza di Routing, Possibilità di saltare linee di fabbricazione e Ricircoli caratterizzano la configurazione con alta variabilità, mentre la seconda configurazione con bassa variabilità non comprende le tre variabili appena elencate. Individuate le variabili di interesse per la definizione dei diversi esperimenti è necessario elencare ora i parametri comuni per le varie simulazioni.

Parametri:

- 1- **Norme utilizzate.** Il carico di lavoro allocato ad ogni stazione del sistema produttivo è un parametro della simulazione. Infatti i valori delle norme analizzate sono comuni a tutti gli esperimenti. Ovviamente l'unica differenza consiste nell'utilizzo di norme molto alte per le Pipeline più grandi, cosa non fattibile per le Pipeline minori. Per quanto riguarda il modello di bilanciamento dei carichi di lavoro il numero di norme analizzate è inferiore rispetto alla limitazione dei carichi di lavoro. Questo è dovuto alla forte criticità del tempo di calcolo necessario per svolgere una singola run di simulazione per il bilanciamento, all'incirca di 13 ore. Si è preferito analizzare meno punti ma con una maggiore evidenza statistica, anziché lo stesso numero di punti della limitazione ma con un numero di run per singolo punto non elevato.
- 2- **Due Dates.** Le Due Dates sono un parametro degli esperimenti. La loro determinazione dipende solamente dal coefficiente K utilizzato per moltiplicare il contenuto di lavoro di un singolo job, che a sua volta dipende dalla Pipeline.

- 3- **Transitorio, lunghezza e numero di run.**
- 4- **Distribuzione dei tempi.** La distribuzione dei tempi produttivi dei job per ogni stazione viene modellizzata tramite una 2-Erlang con media pari a 32 minuti e coefficiente di variazione 0.7.
- 5- **Distorsione dei tempi produttivi effettivi.** Le distorsioni dei tempi di produzione effettivi sono le medesime per tutte le configurazioni e garantiscono il mantenimento di una distribuzione 2-Erlang con media 32 minuti e coefficiente di variazione 0.7

Per ognuna delle otto configurazioni analizzate vengono riportati i valori delle variabili e dei parametri nelle tabelle sottostanti.

Primo sistema analizzato: Alta variabilità, Pipeline 130000	Algoritmo di limitazione EDD	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 2000 • 3000 • 4000 • 5000 • 6000 	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 3000 • 4000 • 5000 • 6000
Determinazione delle Due Dates	Due Dates = $k * \text{Total Work content}$ Il k utilizzato è pari a 10	Due Dates = $k * \text{Total Work content}$ Il k utilizzato è pari a 10
Modello di rilascio utilizzato	Limitazione superiore del carico di lavoro	Bilanciamento del carico di lavoro
Tempi di attraversamento stimati	-----	Tempi di attraversamento stimati variabili a seconda del routing del job in questione e maggiorati di un certo quantitativo per tenere conto dei riciccoli. $T_{ATT} = (\text{Norma per stazione} / \text{Capacità stazione}) * (N \text{ stazioni})$

		attraversate + maggiorazione) La maggiorazione è pari a 1.
Pipeline	130000	130000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 16	Vedi figura 16
Numero di run per ogni norma	10	10
Lunghezza run	500 giorni	500 giorni
Lunghezza transitorio	130 giorni	130 giorni
Planning Period	-	15 giorni
Funzione obiettivo	-	Quadratica
Pesi funzione obiettivo	-	Pesi in base $1,5^{-N \text{ Batch}}$, con N Batch che va da 1 a 15.
Routing	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.

Tabella 1 Il sistema ad alta variabilità e Pipeline 130000

In particolare lunghezza run, lunghezza transitorio, Planning Period, Funzione obiettivo, Pesi funzione obiettivo e numero di run per ogni norma sono comuni a tutti i sistemi studiati. Per semplicità si riporta nelle tabelle successive solo quelle caratteristiche che differiscono da sistema a sistema.

Secondo sistema analizzato: Alta variabilità, Pipeline 210000	Algoritmo di limitazione EDD	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico

	complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 2000 • 3000 • 4000 • 5000 • 6000 • 7000 • 10000 	complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 3000 • 4000 • 5000 • 6000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 16	Vedi figura 16
Determinazione delle Due Dates	Due Dates = k * Total Work content Il k utilizzato è pari a 17.5	Due Dates = k * Total Work content Il k utilizzato è pari a 17.5
Pipeline	210000	210000
Routing	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.

Tabella 2 Il sistema con alta variabilità e Pipeline 210000

Terzo sistema analizzato: Bassa variabilità, Pipeline 130000	Algoritmo di limitazione EDD	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 2000 • 3000 • 4000 	La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor <ul style="list-style-type: none"> • 3000 • 4000

	<ul style="list-style-type: none"> • 5000 • 6000 	<ul style="list-style-type: none"> • 5000 • 6000
Determinazione delle Due Dates	<p>Due Dates = $k * \text{Total Work content}$</p> <p>Il k utilizzato è pari a 10</p>	<p>Due Dates = $k * \text{Total Work content}$</p> <p>Il k utilizzato è pari a 10</p>
Pipeline	130000	130000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 15	Vedi figura 15
Routing	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.

Tabella 3 Il sistema con bassa variabilità e Pipeline 130000

Quarto sistema analizzato: Bassa variabilità, Pipeline 210000	Algoritmo di limitazione EDD	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Routing	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.
Norme analizzate	<p>La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2000 • 3000 • 4000 • 5000 • 6000 • 7000 	<p>La norma indicata rappresenta il carico di lavoro per ogni stazione presente nel sistema produttivo, tale contenuto è da moltiplicare per venti per ottenere il carico complessivamente ammesso nello Shop Floor</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3000 • 4000 • 5000 • 6000

	<ul style="list-style-type: none"> • 10000 	
Determinazione delle Due Dates	$Due\ Dates = k * Total\ Work\ content$ Il k utilizzato è pari a 17.5	$Due\ Dates = k * Total\ Work\ content$ Il k utilizzato è pari a 17.5
Pipeline	210000	210000

Tabella 4 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 210000

Per la parte finale del lavoro di tesi volta a mostrare i miglioramenti ulteriori ottenibili per i punti di funzionamento individuati derivanti da una riduzione della Pipeline sono state effettuate le seguenti simulazioni.

Primo sistema analizzato: Alta variabilità, Pipeline 105000	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	<ul style="list-style-type: none"> • 4000
Determinazione delle Due Dates	$Due\ Dates = k * Total\ Work\ content$ Il k utilizzato è pari a : <ul style="list-style-type: none"> • 9 • 10
Modello di rilascio utilizzato	Bilanciamento del carico di lavoro
Tempi di attraversamento stimati	Tempi di attraversamento stimati variabili a seconda del routing del job in questione e maggiorati di un certo quantitativo per tenere conto dei ricircoli. $T\ ATT = (Norma\ per\ stazione / Capacità\ stazione) * (N\ stazioni\ attraversate)$
Pipeline	105000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 16
Numero di run per ogni norma	10
Lunghezza run	500 giorni
Lunghezza transitorio	130 giorni
Planning Period	15 giorni
Funzione obiettivo	Quadratica
Pesi funzione obiettivo	Pesi in base $1,5^{-N\ Batch}$, con N Batch che va da 1 a 15.
Routing	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.

Ricircoli	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.
------------------	--

Tabella 5 Il sistema con alta variabilità e pipeline 105000

Secondo sistema analizzato: Alta variabilità, Pipeline 170000	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	<ul style="list-style-type: none"> • 4000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 16
Determinazione delle Due Dates	<p>Due Dates = k * Total Work content</p> <p>Il k utilizzato è pari a :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 17.5 • 16
Pipeline	170000
Routing	80% nella linea di assemblaggio, 70% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	10 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 10% ricircoli nella linea di assemblaggio.

Tabella 6 Il sistema con alta variabilità e pipeline 170000

Terzo sistema analizzato: Bassa variabilità, Pipeline 105000	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
Norme analizzate	<ul style="list-style-type: none"> • 4000
Determinazione delle Due Dates	<p>Due Dates = k * Total Work content</p> <p>Il k utilizzato è pari a :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 9 • 9.5 • 10
Pipeline	105000
Distribuzione dei tempi per stazione	Vedi figura 15
Routing	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.

Tabella 7 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 105000

Quarto sistema analizzato: Bassa variabilità, Pipeline 170000	Modello di bilanciamento dei carichi di lavoro
--	---

Routing	100% nella linea di assemblaggio, 100% nella linea di fabbricazione.
Ricircoli	0 % dei ricircoli nella prima linea di fabbricazione , 0% ricircoli nella linea di assemblaggio.
Norme analizzate	<ul style="list-style-type: none"> • 4000
Determinazione delle Due Dates	Due Dates = k * Total Work content Il k utilizzato è pari a : <ul style="list-style-type: none"> • 16 • 17.5
Pipeline	170000

Tabella 8 Il sistema con bassa variabilità e pipeline 170000

6.1 La progettazione della simulazione.

Uno degli aspetti fondamentali della simulazione consiste nella progettazione della simulazione stessa e nell'analisi statistica dei risultati. L'errore più comune consiste nella determinazione della lunghezza di ogni run in modo arbitrario, considerando i risultati ottenuti come delle stime rappresentative del sistema reale. Poiché in una simulazione capita spesso di utilizzare osservazioni casuali prese da una o più distribuzioni di probabilità ne deriva che queste stime sono realizzazioni di particolari variabili aleatorie che possono avere varianza molto elevata. Questo implica la possibilità di una forte differenziazione tra le stime e le reali caratteristiche del sistema modellizzato.

Affinché i risultati di uno studio effettuato attraverso la simulazione abbiano senso è necessario l'utilizzo di tecniche statistiche per progettare e analizzare gli esperimenti di una simulazione. Nel fare ciò si manifesta subito il problema derivante da i processi di output della simulazione che sono, in generale, auto correlati e non stazionari e questo rende inapplicabili direttamente le tecniche statistiche classiche che sono invece basate su osservazioni indipendenti, identicamente distribuite.

Per risolvere questo primo problema si agisce nel seguente modo: siano Y_1, Y_2, \dots, Y_i i dati di output di un singolo run di una simulazione; ciascuna Y_i può essere vista come una variabile aleatoria e quindi la collezione di variabili aleatorie $\{Y_i, i = 1, 2, \dots\}$ è un processo stocastico. Ad esempio, in un sistema di code, le Y_i possono rappresentare il tempo di attesa in coda dell'i-esimo utente.

In generale, le variabili aleatorie Y_i potrebbero non essere né indipendenti, né identicamente distribuite e quindi nell'analisi di questi dati non possono essere applicati direttamente i metodi di analisi statistica. Per ovviare a questo inconveniente, si effettuano più repliche della simulazione, ciascuna di lunghezza m e si basa l'analisi sulle varie repliche. Formalmente, siano $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}$ la realizzazione delle variabili aleatorie Y_1, \dots, Y_m ottenute con la prima replica. Nella seconda replica si avranno differenti realizzazioni delle variabili aleatorie Y_1, \dots, Y_m ; siano esse $y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2m}$. In generale, supponiamo di aver effettuato n repliche indipendenti di lunghezza m , ottenendo così m serie temporali del dato di output di interesse. Le realizzazioni di una stessa replica non sono indipendenti, identicamente distribuite, ma se per ogni $i = 1, \dots, m$ consideriamo le osservazioni $y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ni}$, ovvero l' i -esima colonna della matrice contenente le osservazioni provenienti dai vari run di simulazione allora esse costituiscono osservazioni indipendenti, 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 $i = 1, \dots, m$. Da qui deriva la necessità di effettuare per ogni run simulazione diverse repliche, in modo da ottenere dati indipendenti e non autocorrelati.

Un altro problema esistente nell'ottenere stime precise delle caratteristiche del vero modello è dato dal tempo di calcolo necessario per raccogliere la quantità necessaria di dati di output per effettuare un'analisi statistica efficace, che potrebbe essere anche molto elevato.

Occorre risolvere un trade-off tra il tempo messo a disposizione per le varie simulazioni e il costo che questo tempo comporta. Dal nostro punto di vista il problema si è risolto nella determinazione della lunghezza ottimale di ogni run mediante il metodo di Law e Carson basato sul metodo delle batch means (Law & Carson, 1979).

Riassumendo la progettazione della simulazione ci ha portato a risolvere i seguenti problemi:

1. Determinazione della lunghezza del transitorio
2. Determinazione della lunghezza del singolo run
3. Determinazione del numero di repliche o di run da effettuare per ogni simulazione

Successivamente devono essere definite le misure di prestazione di interesse per i dati di output.

6.1.1 La determinazione del transitorio. (Mosca, 2007)

L'analisi del transitorio viene trattata in letteratura con modalità differenti a seconda del tipo di simulazione. Una simulazione può essere classificata secondo due categorie principali:

1. Simulazione con terminazione
2. Simulazione senza terminazione

Alla prima categoria appartengono quei sistemi in cui all'avvenire di un particolare fenomeno il sistema cessa di funzionare. Si parla per esempio degli uffici postali, la cui condizione di termine è la fine della giornata lavorativa, che comporta lo svuotamento dell'ufficio.

Alla seconda categoria appartengono invece sistemi il cui funzionamento non ha un termine preciso, si tratta di sistemi in cui si ha un forte interesse all'analisi del funzionamento in condizioni di regime, il che si traduce nella necessità di simulare dei run di simulazione abbastanza lunghi da portare il sistema su un funzionamento stazionario.

Questo problema è detto anche problema del transitorio iniziale o dello start-up. Per superare questo problema si utilizza una tecnica di cancellazione dei dati iniziali detta anche "warming up" del modello che consiste nel non considerare nella stima le prime osservazioni, che sono quelle più influenzate dalle condizioni iniziali.

Formalmente il problema consiste nella determinazione del numero l di osservazioni da eliminare in modo che la media della variabile aleatoria di interesse, $\mu = \lim_{j \rightarrow \infty} E (Y_j)$ sia uno stimatore non distorto della media $E (Y)$.

Date m osservazioni Y_1, Y_2, \dots, Y_m , una stima di μ si può ottenere da:

$$Y_m = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j}{m}$$

Tuttavia a causa del transitorio iniziale dipendente dalla scelta delle condizioni iniziali, Y_m non è uno stimatore corretto in quanto è possibile che $E (Y_m) \neq \mu$ per ogni m .

Quindi anziché utilizzare la stima Y_m si considera:

$$Y_{(m-l)} = \frac{\sum_{j=l+1}^m Y_j}{(m-l)}$$

La scelta del parametro l è fondamentale in quanto un periodo di warm up troppo breve può comportare stime distorte mentre un periodo troppo lungo comporta dei costi in termini di tempo speso inutilmente per il calcolo.

Per risolvere tale problema sono presenti in letteratura numerosi metodi, nel nostro caso ci è sembrato più opportuna una modalità di determinazione di tipo grafico. Il funzionamento di base è molto semplice e consiste nel creare il grafico di $E(Y)$ e verificare in quale punto esso si stabilizzi intorno alla media μ .

La maggiore problematica consiste nella forte variabilità che i dati possono avere, per questo motivo prima di procedere alla rilevazione grafica del transitorio abbiamo scelto di applicare la procedura di riduzione della varianza nota come Procedura di Welch (Mosca, 2007).

Tale procedura si articola in quattro passi principali:

Passo 1: Si effettuano n repliche, ciascuna di lunghezza m

Passo 2: Si costruisce la successione Y_1, Y_2, \dots, Y_m , con Y_j :

$$Y_j = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i,j}}{n}$$

Passo 3: Dato $k \leq \left(\frac{m}{4}\right)$, si sostituisce ciascun termine della successione Y_1, Y_2, \dots, Y_m con

$$Y_j(k) = \begin{cases} \frac{\sum_{h=-k}^k Y_{j+h}}{2k+1}, & j = k+1, \dots, m-k \\ \frac{\sum_{h=-(j-1)}^{j-1} Y_{j+h}}{2j-1}, & j = 1, \dots, k \end{cases}$$

Passo 4: Si sceglie quel valore di l oltre il quale la successione $Y_j(k)$ appare giunta a convergenza.

Nel nostro caso per l'analisi del transitorio vengono effettuati dieci run di simulazione con un coefficiente k necessario al calcolo della media mobile del *Passo 3* pari a trenta. In questo modo la serie temporale appare sufficientemente chiara ed è possibile identificare il transitorio con certezza.

L'analisi del transitorio è stata effettuata per tutte le configurazioni analizzate, concentrandosi principalmente per i punti caratterizzati da norme elevate. Tale scelta è motivata dalla maggiore lentezza che dei sistemi aventi molto carico nello Shop Floor hanno nel superare il transitorio nei confronti di sistemi con poco carico nel sistema produttivo. La variabilità dei tempi produttivi così come le altre variabili presentate in precedenza sono la principale causa di questo fenomeno. I

valori individuati per il transitorio vengono poi applicati anche per tutti gli altri punti analizzati della configurazione in esame essendo certi che i valori individuati siano dei limiti superiori oltre cui gli altri punti non possono andare.

I valori di interesse da cui ricaviamo il transitorio sono essenzialmente tre:

1. Shop Floor Throughput Time
2. Gross Throughput Time
3. Output del sistema espresso come sommatoria del carico di lavoro di ogni job terminato su tutte le stazioni

La scelta di tali valori è motivata dall'importanza che essi hanno nell'analisi di un sistema produttivo. Il Gross Throughput Time così come l'Output rappresenta la misurazione della produttività di un sistema, basilare per il lavoro di tesi svolto. La scelta dello Shop Floor Time infine è stata fatta per garantire che anche le singole componenti del Gross Throughput Time superato il transitorio fossero stabili. Utilizzare lo Shop Floor Time o il Preshop Pool Time non avrebbe portato ad alcuna differenza, essendo la loro sommatoria uguale al Gross Throughput Time.

Si mostrano ora i grafici ottenuti tramite la procedura appena descritta dei valori di interesse da cui stimare il transitorio. I grafici fanno riferimento alla configurazione che necessita del transitorio maggiore, pari a 130 giorni, valore che è stato preso come riferimento per tutte le altre run simulate. Tale configurazione è contraddistinta da alta variabilità e Pipeline 210000 con norma pari a 10000 minuti. La parte evidenziata in rosso corrisponde al transitorio individuato graficamente.

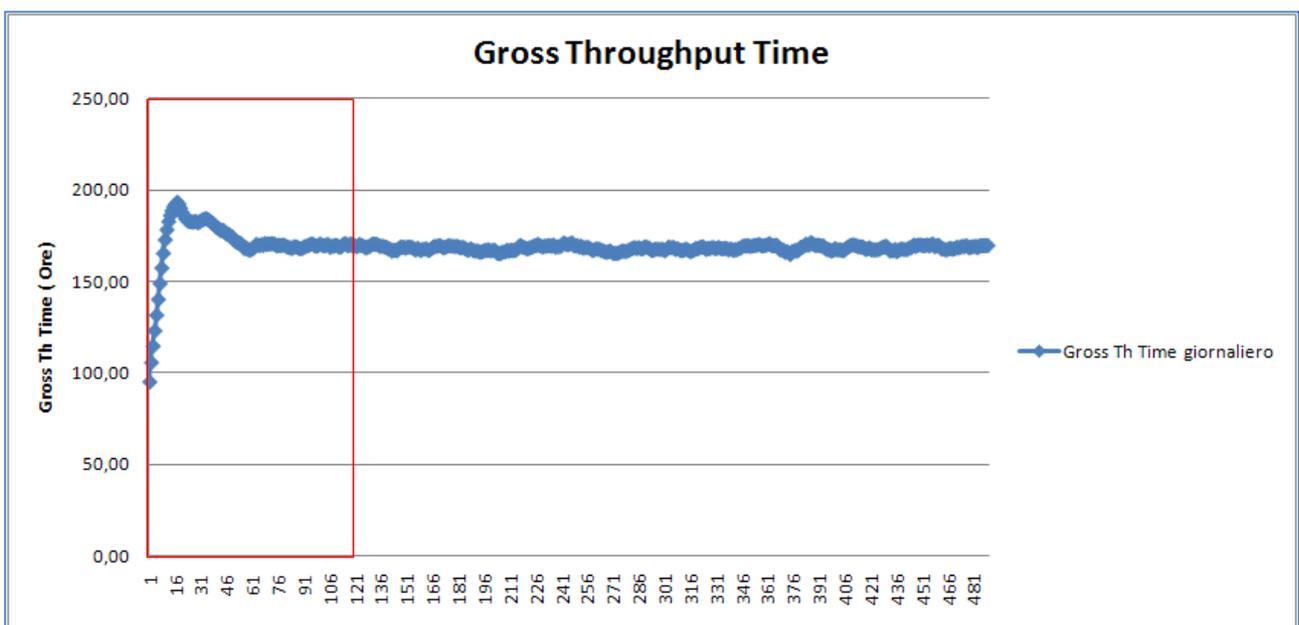


Figura 24 la determinazione del transitorio per il Gross Th Time

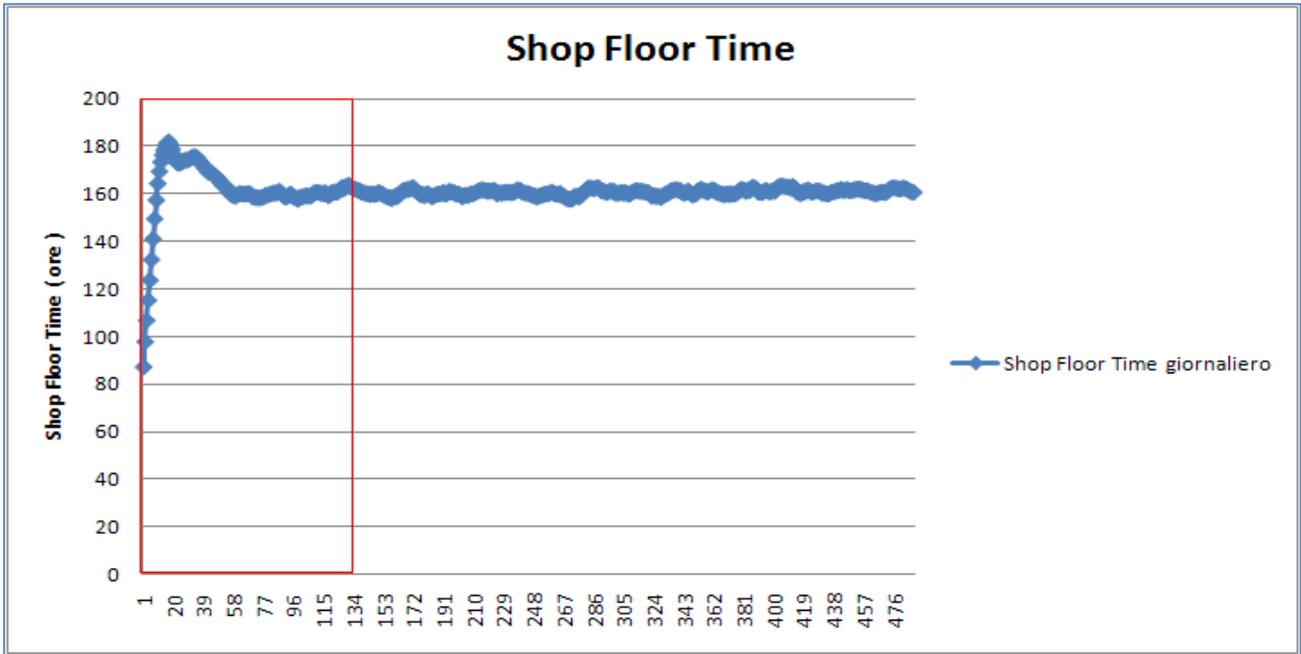


Figura 25 La determinazione del transitorio per lo Shop Floor Time

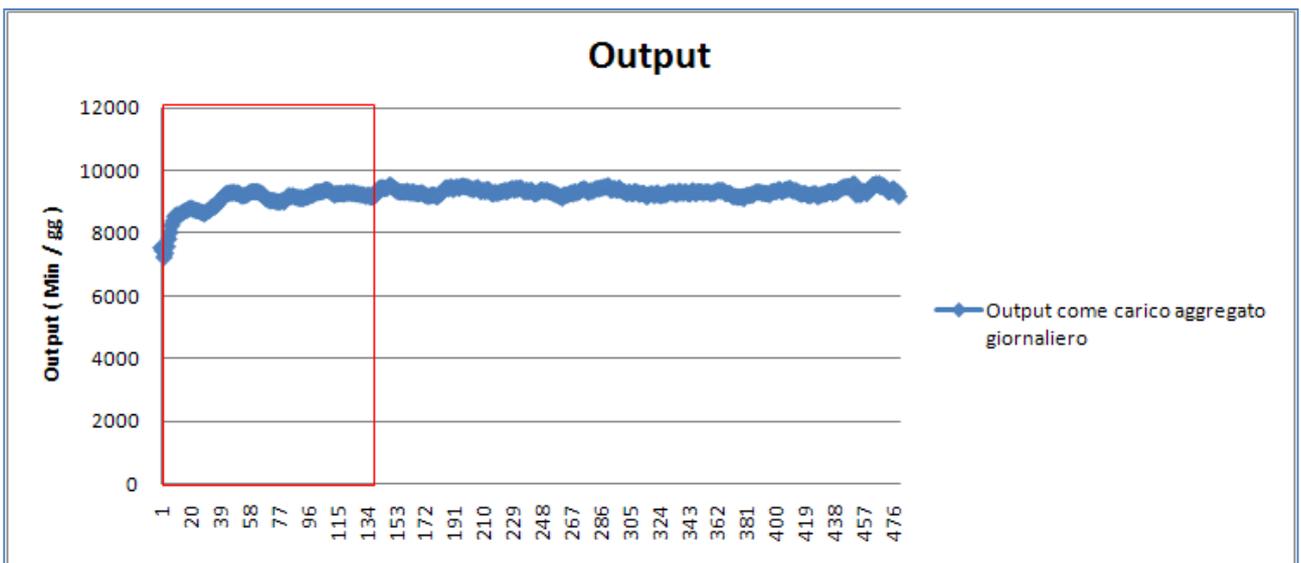


Figura 26 La determinazione del transitorio per l'Output

Tale procedura mostra una buona capacità di smorzamento della varianza, come dimostrato dai grafici che presentano un andamento costante o poco variabile intorno al valore medio una volta superato il transitorio. In questo caso il transitorio viene stimato intorno ai 130 giorni come confermato dai grafici.

Ai fini della determinazione di un valore più preciso per il transitorio oltre ad una prima analisi visiva ottenuta tramite Welch è stata utilizzata la procedura di Law e Carson 1979 che verrà sintetizzata nel prossimo paragrafo.

6.1.2 La determinazione della lunghezza di ogni run.

La determinazione della lunghezza del run è effettuata mediante la procedura di Law e Carson 1979. La tecnica utilizzata permette anche di ottenere un valore più preciso del transitorio come mostreremo in seguito. Anche in questo caso la lunghezza della singola replica comporta un trade off tra costi legati a maggiori tempi di simulazione nel caso di run molto lunghi e dei dati non particolarmente significativi nel caso di run troppo corti. La determinazione della lunghezza di ogni run è stata calcolata per ogni singola run effettuata di ogni configurazione.

Maggiormente nel dettaglio il problema della determinazione della lunghezza di ogni run consiste nel definire la lunghezza minima che consente di ottenere l'intervallo di confidenza per la media della prestazione di interesse desiderato.

La procedura seguita è la seguente:

Data la serie storica ottenuta tramite simulazione composta da n_1 osservazioni si determinano l e k in modo tale da suddividere le osservazioni in lk batch di lunghezza m . E' inoltre opportuno fissare un valore oltre il quale la procedura si arresta c e la precisione relativa γ .

Il secondo passo è composto da tre parti:

1. Suddividere le n_1 osservazioni nei kl batch di lunghezza m e calcolare $\rho_1(k, m) = 2 * \rho_1^0(k, m) - (\rho_1^1(\frac{k}{2}, m) + \rho_1^2(\frac{k}{2}, m))/2$

$$\text{Con } \rho(k, m) = \frac{(\sum_{j=1}^{k-1} (\bar{X}_j(m) - \bar{X}(k, m)) * (\bar{X}_{j+1}(m) - \bar{X}(k, m)))}{\sum_{j=1}^k (\bar{X}_j(m) - \bar{X}(k, m))^2}$$

Con $\bar{X}_j(m)$ si intende la media del j -esimo batch di dimensione m , mentre $\bar{X}(k, m)$ è la grande media delle medie di ogni singolo batch.

Per il calcolo di $\rho_1(k, m)$ è dunque necessario calcolare $\rho(k, m)$ su tutti i batch per ottenere $\rho_1^0(k, m)$, sui primi $k/2$ batch per ottenere $\rho_1^1(\frac{k}{2}, m)$ e sugli ultimi $k/2$ batch per ottenere $\rho_1^2(\frac{k}{2}, m)$ rispettivamente. Se $\rho_1(k, m) > c$ (con $c = 0,4$) significa che il run è troppo corto, per cui è necessario andare al passo 3 della procedura. Se $\rho_1(k, m) < 0$ è necessario andare al passo 1b, viceversa all'1c.

2. Dividere le n_i osservazioni in $lk/2$ batch di dimensione $2m$. Calcolare come in precedenza $\rho_1(lk/2, 2m)$ utilizzando i batch appena creati. Se $\rho_1(lk/2, 2m) < \rho_1(k, m)$ allora è necessario andare al passo 1c, viceversa al passo 3.

Dividere le n_i osservazioni in k batch di dimensione lm . Calcolare $\bar{X}(k, lm)$ e $\delta = t_{k-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\sigma^2(\bar{X}(k, lm))}$. Se $\frac{\delta}{\bar{X}(k, lm)} < \gamma$ con $\gamma = 0,075$ allora è possibile costruire un intervallo di confidenza per la media della prestazione desiderata. Viceversa andare al passo 3.

Porre $n_i = 2n_{i-2}$, collezionare le informazioni e tornare al passo 2a.

L'intera procedura è stata ripetuta su tutti i singoli run in modo da evitare errori. Inoltre l'algoritmo di Law e Carson 1979 si è rivelato utile per ottenere un valore più preciso del transitorio.

Per ottenere una stima accurata è bastato calcolare l'intervallo di confidenza mediante questa procedura andando di volta in volta ad eliminare i primi valori. Nel momento in cui si otteneva il primo intervallo di confidenza fattibile si è deciso di considerare come transitorio quei valori iniziali che non permettevano l'ottenimento dell'intervallo di confidenza desiderato.

In questo modo si è stimato un transitorio di 130 giorni oltre il quale sono necessari 300 giorni per avere l'intervallo di confidenza desiderato. Dato che il tempo computazionale per quanto riguarda la limitazione e bilanciamento non costituiva un problema si è deciso comunque di porre una lunghezza del run pari a 500 giorni, in modo da evitare ogni possibile errore.

6.1.3 La determinazione del numero di run

Come per la determinazione della lunghezza e del transitorio, anche in questo caso è necessario risolvere un trade off tra i tempi di simulazione derivanti da un gran numero di run e la significatività dei dati ottenuti. Questa problematica è molto importante specialmente per una campagna di simulazioni come la nostra dove l'input non è deterministico, bensì segue una distribuzione probabilistica. Ne consegue che l'output stesso della simulazione sia una variabile aleatoria che può portare con sé più variabilità di quanta effettivamente se ne possa trovare in condizioni reali. Se la simulazione si basasse su dati di input deterministici non sarebbe necessario ricorrere a diversi run di simulazione, in quanto l'output non sarebbe sottoposto a variabilità dovuta alla distribuzione statistica di partenza. Cercando quindi di garantire dei dati significativi si è scelto

di effettuare dieci run per ogni punto simulato. Questa scelta ha comportato la sperimentazione per quanto riguarda il bilanciamento dei carichi di lavoro di un minor numero di punti rispetto alla semplice limitazione dei carichi di lavoro, essendo la durata di ogni run di simulazione di circa 13 ore. Il vincolo del tempo di calcolo è risultato determinante essendo le risorse disponibili limitate, per questo motivo si è optato per la sperimentazione di un minor numero di punti cercando di garantirne la significatività statistica. In totale le ore di calcolo necessarie alla realizzazione del lavoro di tesi sono state all'incirca 3000, il che può far capire come lavorando con risorse limitate si sia rivelato necessario agire in tale maniera.

6.2 Le performance analizzate.

In questa fase della progettazione della simulazione sono state scelte le prestazioni di interesse da misurare partendo dai dati di output della simulazione. La scelta delle prestazioni è avvenuta basandosi su una prima suddivisione in due macro categorie:

1. Prestazioni legate al sistema produttivo. In questa categoria di prestazioni si effettuano delle misurazioni in merito al livello di WIP, al tempo medio di attraversamento del sistema, al gross throughput time e allo Shop Floor troughput time. Sono presenti inoltre altre misurazioni che vanno a verificare la capacità del sistema di produrre job rispettando le Due Dates, il livello di saturazione medio e le prestazioni nella parte immediatamente precedente la linea di assemblaggio. Tutte queste prestazioni verranno spiegate meglio nella prossima tabella, unitamente alle unità di misura e alla loro formulazione.
2. Prestazioni legate al job stesso. In questa categoria di prestazioni fanno parte tutte quelle misurazioni relative al singolo job. Si parla ad esempio del numero di giorni di ritardo o di anticipo, del tempo trascorso in Preshop Pool o nel sistema produttivo.

Questi dati vengono raccolti da tre file di testo creati da Arena, il cui funzionamento viene spiegato in maniera esauriente nelle Appendici finali mentre ora si riporta solamente il nome dei singoli file in modo che sia più semplice poi andare a verificare nell'Appendice cosa contengano.

I suddetti file di testo sono:

1. Dati_Mattina.txt
2. Dati_Sera.txt
3. Storico_Ordini.txt

Una volta creati i file esse vengono elaborati in “Storico.xlsx” creato appositamente e contenente le formulazioni necessarie al calcolo delle prestazioni di interesse. Anche in questo caso si possono trovare spiegazioni più dettagliate nell’Appendice.

Si riporta ora una schematizzazione delle prestazioni di interesse legate al sistema produttivo.

Prestazione	Descrizione	Formulazione	Unità di misura
WIP di sistema	Il numero di pezzi presenti nel sistema al termine della giornata lavorativa. Considera solamente i pezzi già lavorati e non quei job rilasciati ma che non hanno ancora subito lavorazioni.	Dato ottenuto da Arena mediante la funzione EntitiesWIP(Lavorato)	Pezzi
WIP a valle della linea di assemblaggio	Il numero di pezzi o meglio di componenti in attesa di essere rilasciati nella linea di assemblaggio	Dato ottenuto tramite Arena.	Pezzi
Idle Time	Indica il tempo di inattività delle stazioni dovuto alla mancanza di job in coda	Complemento a uno del coefficiente di saturazione medio	%
Tempo medio trascorso dagli ordini nel sistema	Indica il valore medio del Gross Throughput Time, quindi del tempo trascorso dalla fase di Order Entry all’uscita del job dallo Shop Floor	Media pesata per il contenuto di lavoro dei job del Gross Throughput Time dei job usciti dal sistema	Giorni
Tempo medio trascorso dagli ordini nel sistema produttivo	Valore medio dello Shop Floor Throughput Time, ovvero del tempo trascorso dal rilascio del job al suo completamento.	Media pesata per il contenuto di lavoro dei job dello Shop Floor Throughput Time dei job usciti dal sistema	Giorni

Tempo medio trascorso dagli ordini in Preshop Pool	Valore medio del tempo che intercorre tra la fase di Order Entry e il Rilascio dei job nello Shop Floor	Media pesata per il contenuto di lavoro dei job del tempo trascorso in Preshop Pool da parte dei job rilasciati	Giorni
Coefficiente di saturazione medio	La media della saturazione delle macchine	$\frac{\sum_{i=1}^{20} \text{Saturazione staz}}{20}$	%
Output	Output giornaliero del sistema	Numero di pezzi usciti a fine giornata	Pezzi
% Ritardi	Percentuale dei job in ritardo	$\frac{N \text{ job ritardo}}{N \text{ job usciti}}$	%
Conditional Mean Tardiness	Dei job che vanno in ritardo si misura il valore medio del ritardo	$\frac{\sum_1^N \text{ritardi} \text{ Giorni ritardo}}{N \text{ job ritardo}}$	Giorni
% Anticipi	Percentuale dei job in anticipo	$\frac{N \text{ job anticipo}}{N \text{ job usciti}}$	%
Conditional Mean Earliness	Dei job in anticipo di misura il numero medio di giorni di anticipo	$\frac{\sum_1^N \text{ritardi} \text{ Giorni anticipo}}{N \text{ job anticipo}}$	Giorni
Carico medio del sistema	Livello medio del contenuto di lavoro degli ordini a sistema a fine giornata	$\frac{\sum \text{Carichi fine giornata}}{\text{Numero stazioni}}$	Minuti
Caricamento medio del sistema	Quantità di carico mediamente rilasciata	Media dei rilasci giornalieri	Minuti
Stabilità del caricamento	Coefficiente di variazione dei caricamenti giornalieri	$\frac{\text{Dev std caricamenti}}{\text{Media caricamenti}} * 100$	%
Stabilità del carico	Coefficiente di variazione del carico a fine giornata	$\frac{\text{Dev std carico}}{\text{Media carico}} * 100$	%
Bilanciamento delle stazioni	Coefficiente di variazione del carico fine giornata sommato al rilascio delle singole	Media dei coefficienti di variazione del carico a fine giornata sommato al rilascio delle singole	%

	stazioni	stazioni	
Livello Medio di Magazzino	Livello medio dei prodotti finiti presenti a fine linea assemblaggio	Media del numero di job presenti a fine linea ogni giorno	Pezzi

Tabella 9 Le performance analizzate

Si passa ora ad una schematizzazione delle prestazioni legate al singolo job.

Prestazione	Descrizione	Formulazione	Unità di misura
Gross Throughput Time	Tempo trascorso dalla fase di order entry all'uscita dal sistema produttivo.	Giorno ingresso in Preshop Pool – Giorno uscita dal sistema produttivo	Giorni
Preshop Pool Throughput Time	Tempo trascorso dalla fase di Order Entry al rilascio del job nel sistema	Giorno ingresso in Preshop Pool – Giorno uscita Preshop Pool	Giorni
Shop Floor Throughput Time	Tempo trascorso nel sistema produttivo	Giorno Rilascio – Giorno uscita Shop Floor	Giorni
Giorni Anticipo	Differenza tra la Due Dates assegnata e il giorno di completamento	Due Dates – Giorno uscita Shop Floor	Giorni
Giorni Ritardo	Differenza tra il giorno di completamento e la Due Dates assegnata	Giorno Completamento - Due Dates	Giorni
Tempo trascorso a monte dell'assemblaggio	Tempo in attesa che tutte le componenti fossero pronte prima di poter essere assemblato	Istante arrivo ultimo componente a fine linea – Istante arrivo primo componente a fine linea	Ore

Tabella 10 Le performance analizzate

Le misure di prestazione appena evidenziate derivano dalle varie pubblicazioni presenti in letteratura. (Land, et al., 2006), (Oosterman, et al., 2000)

Capitolo 7: Analisi dei risultati

In questo capitolo viene presentata l'analisi dei risultati ottenuti tramite simulazione. Sono inoltre presenti degli spunti che permettono di valutare i vantaggi del bilanciamento in termini guadagno di flessibilità e risparmio di Pipeline.

Capitolo 7: Analisi e validazione dei risultati

7 Analisi dei risultati.

In questo capitolo viene proposta l'analisi dei risultati ottenuti per le varie configurazioni sperimentate.

Per garantire un paragone corretto tra le varie norme delle differenti modalità di rilascio analizzate si è deciso di utilizzare lo Shop Floor Time come termine di paragone. Essendo tale grandezza un indicatore del livello di carico del sistema produttivo si è ritenuto valido il suo utilizzo per il confronto tra norme differenti.

Tutti i dati che verranno mostrati sono stati validati mediante un T-Test con intervallo di confidenza del 95% effettuato sulle differenze tra ogni singola run di ogni norma. La stessa procedura è stata effettuata tra i vari punti di funzionamento del sistema in modo da poter garantire statisticamente che i punti di funzionamento del bilanciamento siano effettivamente migliori dei punti della limitazione. Per effettuare queste analisi si è scelto di utilizzare come variabile di interesse l'output in termini di pezzi prodotti giornalmente e il Gross Throughput Time in termini di ore trascorse mediamente da ogni singolo job nel sistema composto da Shop Floor e Preshop Pool.

L'analisi dei risultati è sviluppata secondo le tre domande di ricerca individuate e presentate nel Capitolo 4 che sono schematizzate di seguito per maggiore chiarezza:

- 1. Domanda 1: Come impatta la variabilità di sistema, in particolare di routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?*
- 2. Domanda 2: Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-In-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?*
- 3. Domanda 3: La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?*

7.1 Domanda 1: Come impatta la variabilità di sistema, in particolare del routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Per rispondere a questa prima domanda di ricerca sono state analizzate le prestazioni delle due tecniche di Order Review and Release nei sistemi caratterizzati da variabilità bassa e alta con Pipeline pari a 210000 minuti (Tabella 2 e Tabella 4 del Capitolo 6). Prima della presentazione dei risultati di ogni configurazione è presente comunque un breve riassunto delle principali caratteristiche delle configurazioni analizzate.

7.1.1 La prima configurazione analizzata: bassa variabilità e Pipeline 210000 minuti.

La prima configurazione presa in esame è caratterizzata da una capienza della Pipeline pari a 210000 minuti e dall'assenza di variabilità (Tabella 2). Con assenza di variabilità si intende che, sebbene gli ordini richiedano tempi di lavorazione variabili e sebbene i tempi di lavorazione effettivi differiscano dai tempi di lavorazione preventivati, tutti i job richiedono lo stesso numero di lavorazioni e lo stesso numero di componenti (pari a tre). Infine questa configurazione considera una difettosità nulla.

Sia la politica di rilascio degli ordini orientata al bilanciamento del carico che quella di limitazione del carico si avvalgono della misurazione del carico in modalità aggregata; ciò significa che ogni job presente nel sistema produttivo influisce nella stessa misura sul carico totale indipendentemente dal proprio stato di avanzamento, cioè dalla posizione in cui il job si trova all'interno del sistema produttivo stesso.

Infine è bene precisare che il modello di bilanciamento del carico si avvale di un vincolo che forza il rilascio di quegli ordini che hanno raggiunto la data di rilascio "al più tardi". Questa data di rilascio dipende sia dalla data di consegna desiderata, sia dalla tempo di attraversamento atteso del sistema produttivo; quest'ultimo parametro dipende dal livello medio di carico presente sulle macchine e quindi dalla coda che ogni job deve mediamente attraversare prima di essere lavorato. Questo valore, dovendo essere intero, è causa della tendenza non completamente lineare della curva di output del bilanciamento. Il tempo di attraversamento atteso potrebbe, infatti, essere lievemente troppo alto o lievemente troppo basso per il livello di carico impostato dalla norma.

Ecco dunque il confronto fra le prestazioni di Output e Gross Throughput Time (GTT) realizzate da bilanciamento del carico e limitazione del carico. L'output medio è espresso in [pezzi / giorno], il GTT medio in [ore]. L'asse delle ascisse misura le ore di Shop Floor Time mediamente rilevate per

i vari punti di carico. Le ore di Shop Floor Time sono un'ottima misura del livello di Work In Progress (WIP) presente nel sistema.

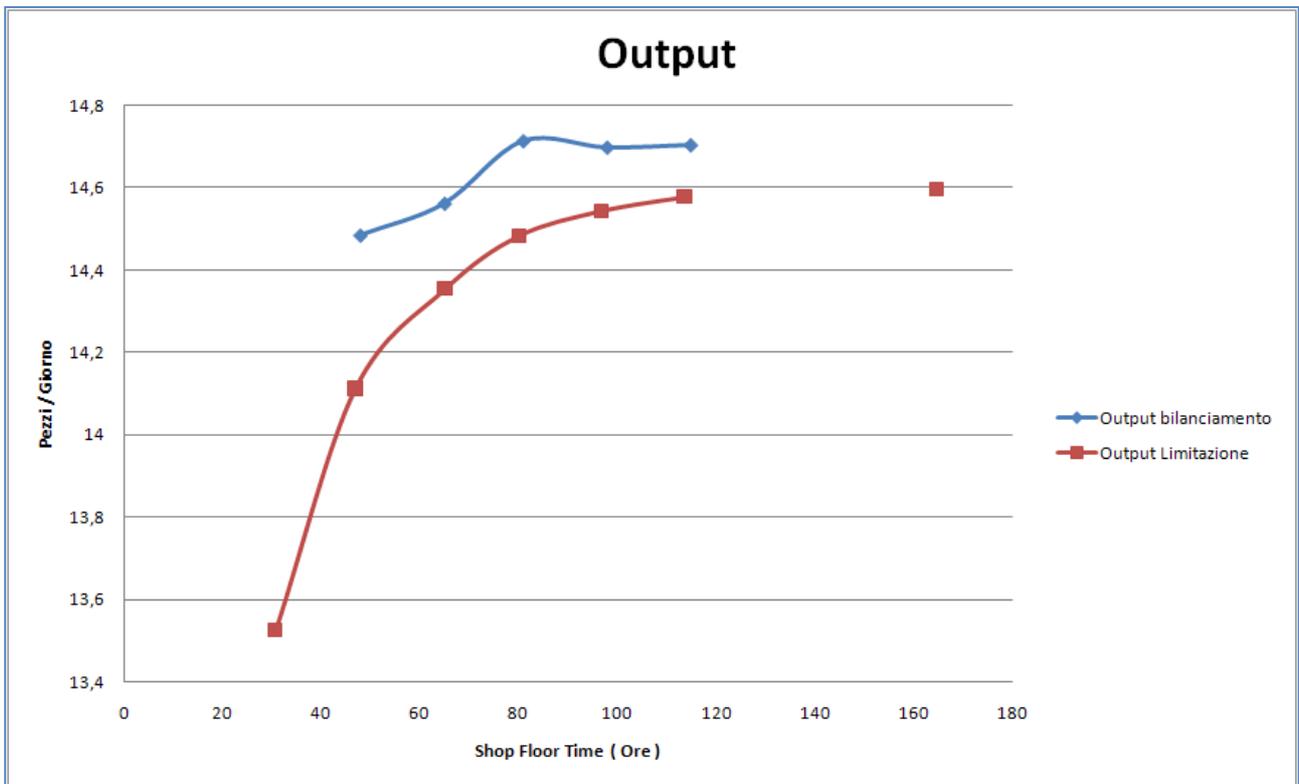


Figura 27 Output Pipeline 210000 bassa variabilità

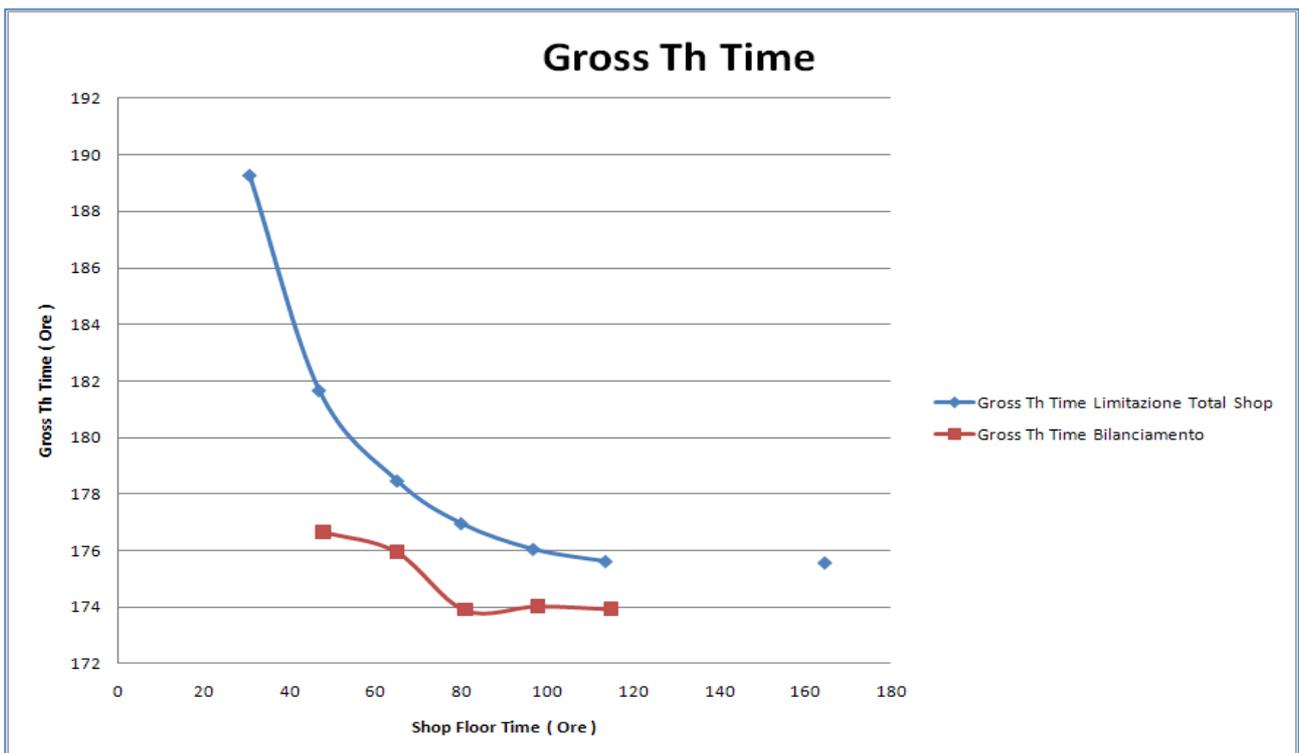


Figura 28 GTT Pipeline 210000 bassa variabilità

Come si evince dai grafici la limitazione di carico realizza la sua miglior prestazione di output nel punto di carico individuato da norma pari a 10000 minuti per stazione, ma la differenza di output fra questo punto ed il precedente (norma pari a 7000 minuti per stazione) è molto contenuta; per questo motivo è ragionevole ipotizzare un livello di carico giudicato ottimo in corrispondenza della norma 7000; sono evidenti i vantaggi in termini di WIP, mentre emerge nel prossimo grafico come questa scelta sia ancora più giustificata in considerazione della percentuale di ordini consegnati in ritardo, che diminuisce drasticamente con la semplice introduzione della Preshop Pool (la norma 10000 corrisponde infatti ad una politica di immediate release). L'output medio della limitazione di carico è quindi da considerare pari a 14,6 pezzi mediamente realizzati ogni giorno.

Il bilanciamento di carico realizza una comparabile prestazione di output nel punto di carico pari a 5000 minuti per stazione. In particolare il bilanciamento realizza mediamente 14.713 pezzi ogni giorno.

Il confronto fra le due politiche di rilascio porta a preferire il bilanciamento in quanto il suo impiego permette di ridurre il WIP del 40%. Il prossimo grafico mostra l'andamento della percentuale di ordini consegnati in ritardo.

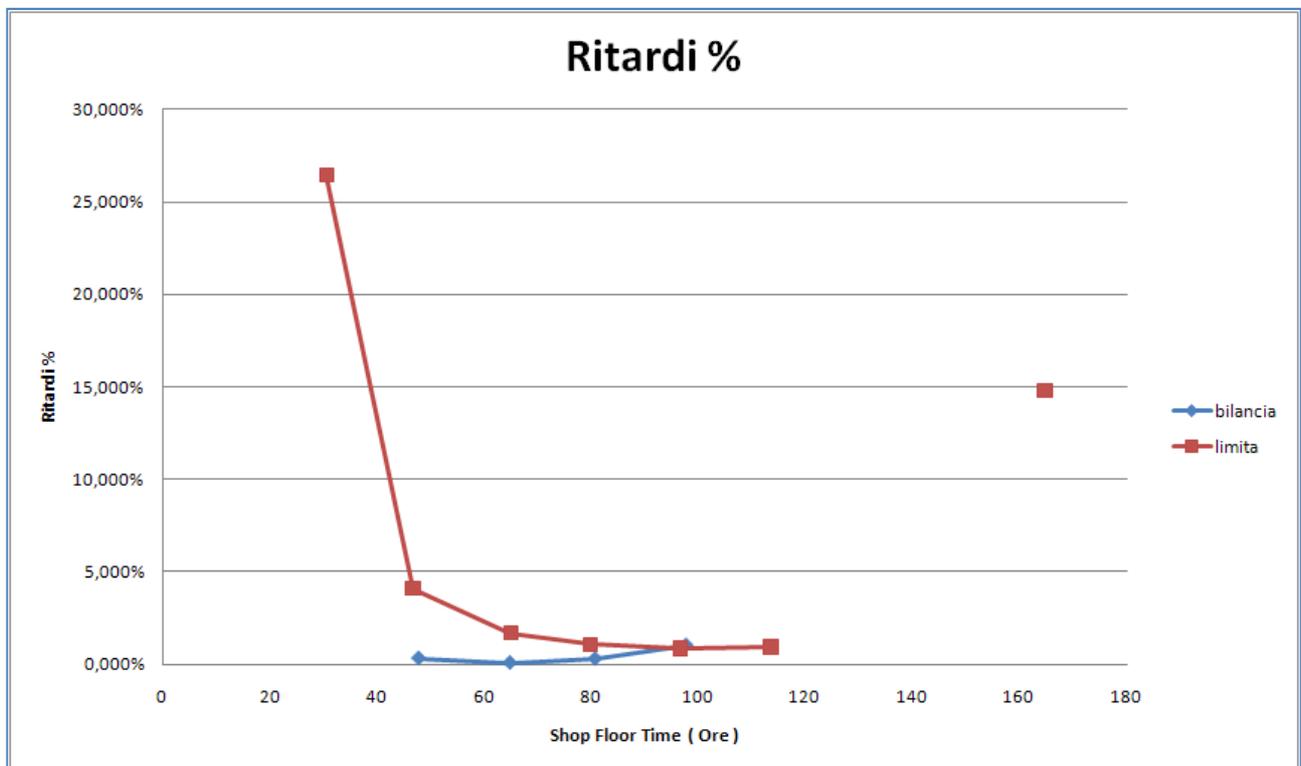


Figura 29 Ritardi % pipeline 21000 bassa variabilità

Il bilanciamento realizza una prestazione di puntualità migliore rispetto a quella realizzata dalla limitazione del carico. Il miglioramento rimane tuttavia modesto in quanto la limitazione ottiene comunque l'1% dei ritardi che è un valore molto basso.

Come si può notare i ritardi della limitazione hanno un andamento a conca. Questa particolare caratteristica è spiegabile tramite la metodologia di creazione delle Due Dates. Infatti creando le Due Dates come $\text{Total Work Content} * K$ capita che alcuni job molto piccoli come quantitativo di lavoro in minuti abbiano delle Due Dates talmente strette che a norme elevate ne impediscono la puntualità nonostante siano rilasciati subito. Questo problema potrebbe essere risolto mediante l'attribuzione di un K differente per le norme alte oppure ponendo un valore minimo accettabile per le Due Dates. E' stato ritenuto opportuno tenere un K costante tra le varie norme della stessa Pipeline per valutare l'impatto del bilanciamento sulle prestazioni del sistema a prescindere dalla determinazione delle Due Dates, in modo da avere una valutazione il più oggettiva possibile circa i vantaggi del bilanciamento rispetto alla limitazione dei carichi di lavoro.

7.1.1.1 La prima configurazione analizzata. Il miglioramento delle performance nei punti di funzionamento sperimentati.

Viene effettuata ora l'analisi numerica più approfondita circa i miglioramenti ottenuti.

Per prima cosa si riportano le tabelle indicanti le performance di limitazione e bilanciamento al variare della norma provata.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	2000	3000	4000	5000	6000	7000	10000
Ordini in ritardo %	26.43%	4.09%	1.70%	1.08%	0.86%	0.93%	14.79%
Output medio (Pz / ora)	13.525	14.11325	14.355	14.48389	14.54438	14.57821	14.59556
Carico medio sistema (min)	1441.718	2418.893	3509.884	4402.814	5400.871	6397.627	9383.312
GTT medio [h]	189.2582	181.665	178.4741	176.9686	176.0618	175.6334	175.5835
SFT medio [h]	30.63198	46.82042	65.03059	79.95794	96.72669	113.6054	164.734
PSPT medio [h]	19.82828	16.85557	14.18044	12.12633	9.916888	7.753493	1.356185
WIP (Pezzi)	45.08504	75.64115	109.7414	137.673	168.8329	199.9523	292.7235

Figura 30 Performance limitazione pipeline 210000 bassa variabilità

BILANCIAMENTO	3000	4000	5000	6000	7000
Ordini in ritardo %	0.309%	0.064%	0.280%	1.021%	2.74%
Output medio (Pz / ora)	14.484	14.56125	14.713	14.6975	14.70333
Carico medio sistema (min)	2220.51	3170.405	3946.254	4934.754	6528.401
GTT medio [h]	176.6611	175.9588	173.9029	174.0411	173.9395
SFT medio [h]	47.80586	64.88925	80.83724	97.85172	114.7918
PSPT medio [h]	16.10691	13.88369	11.6332	9.52367	7.393458
WIP (Pezzi)	79.73566	111.2531	141.7352	172.7722	203.9559

Figura 31 Performance bilanciamento pipeline 210000 bassa variabilità

Come mostrato in precedenza il punto di funzionamento selezionato per la limitazione corrisponde alla norma 7000, mentre per quanto riguarda il bilanciamento si è scelta la norma 5000. Le differenze percentuali dei parametri di interesse sono riportate nella tabella seguente.

CONFRONTO BILANCIAMENTO - LIMITAZIONE	
Ordini in ritardo %	-69.89%
Output medio (Pz / ora)	0.92%
Carico medio sistema (min)	-38.32%
GTT medio [h]	-0.99%
SFT medio [h]	-28.84%
PSPT medio [h]	50.04%
WIP (Pezzi)	-29.12%

Figura 32 Confronto bilanciamento-limitazione Pipeline 210000 bassa variabilità

Il modello di bilanciamento sperimentato mostra notevoli vantaggi rispetto alla limitazione del carico di lavoro. I ritardi si riducono drasticamente così come lo Shop Floor Time che si abbassa del 28% con conseguente guadagno in termini di flessibilità per il sistema produttivo. Il Gross Throughput Time scende dell'1% coerentemente con l'incremento di Output.

Il notevole vantaggio del bilanciamento si mostra nella forte riduzione dello Shop Floor Time. Essendo questa grandezza un indicatore del livello di carico nello Shop è facilmente intuibile come il 40% in meno di Work In Process garantisca una notevole flessibilità anche rispetto a cambiamenti dell'ultimo momento da parte del cliente. Inoltre uno Shop Floor più scarico è maggiormente gestibile e richiede meno oneri in termini economici.

7.1.2 La seconda configurazione analizzata: alta variabilità e pipeline 210000 minuti.

La seconda configurazione presa in esame è caratterizzata da una capienza della Pipeline pari a 210000 minuti e dalla presenza di variabilità (Tabella 4). Come già precisato la variabilità “totale” è riscontrabile nei contesti produttivi in cui i job:

1. richiedono ciascuno un numero di lavorazioni diverse su un set di stazioni diverse;
2. richiedono tempi di lavorazioni differenti;
3. richiedono un diverso numero di componenti (1, 2 o 3);
4. possono essere ricircolati se trovati difettosi sia allo stadio di fabbricazione, sia allo stadio di assemblaggio.

È necessario fare un’ultima precisazione, prima di procedere con la presentazione dei risultati in forma grafica e numerica: il bilanciamento comprende un vincolo che forza il rilascio degli ordini che sono in Preshop Pool nel momento in cui il tempo di attraversamento previsto nel sistema produttivo coincide con il tempo che rimane all’azienda per consegnare il prodotto. Per questo motivo è stata introdotta una maggiorazione dei tempi di attraversamento previsti per quei job che, comprendendo all’interno del proprio routing una stazione di controllo qualità, sono soggetti alla possibilità di essere ricircolati ed aumentare così il proprio tempo trascorso nel sistema produttivo. Questo accorgimento si rivela particolarmente cruciale per i punti di carico più alti, dove la maggior parte del Gross Throughput Time è speso nel sistema produttivo stesso e le stazioni hanno una grande coda di attesa; in questi casi il job che viene rilevato come difettoso ha un’alta probabilità di essere consegnato in ritardo, non avendo alcun diritto di priorità sui job in attesa alle stazioni. In altre parole si può dichiarare che un sistema che lavora su un alto punto di carico è un sistema poco reattivo.

Ecco dunque il confronto della prestazione di output e, subito dopo, quello speculare di Gross Throughput Time. L’output è ancora espresso in [pezzi / giorno] e l’asse delle ascisse ha come unità di misura le ore di Shop Floor Time.

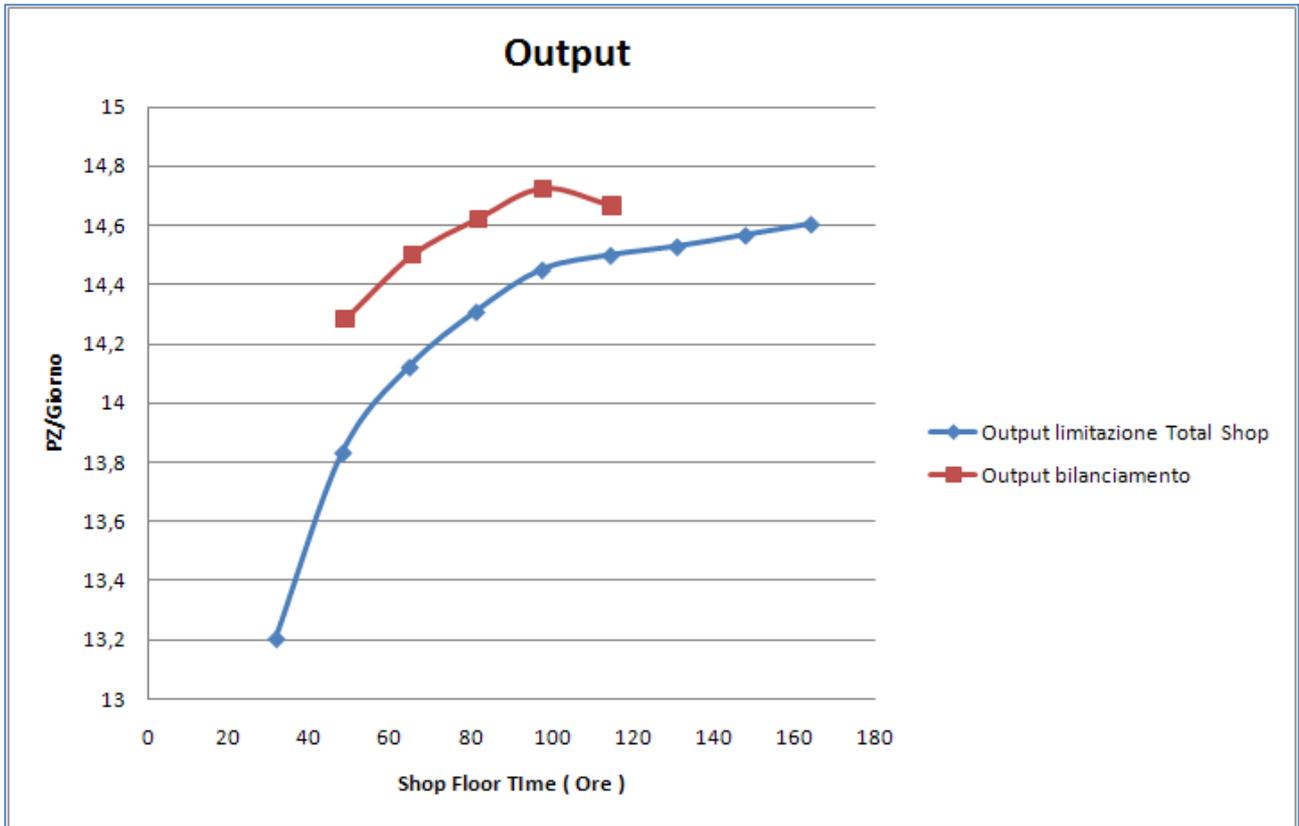


Figura 33 Output Pipeline 210000 alta variabilità

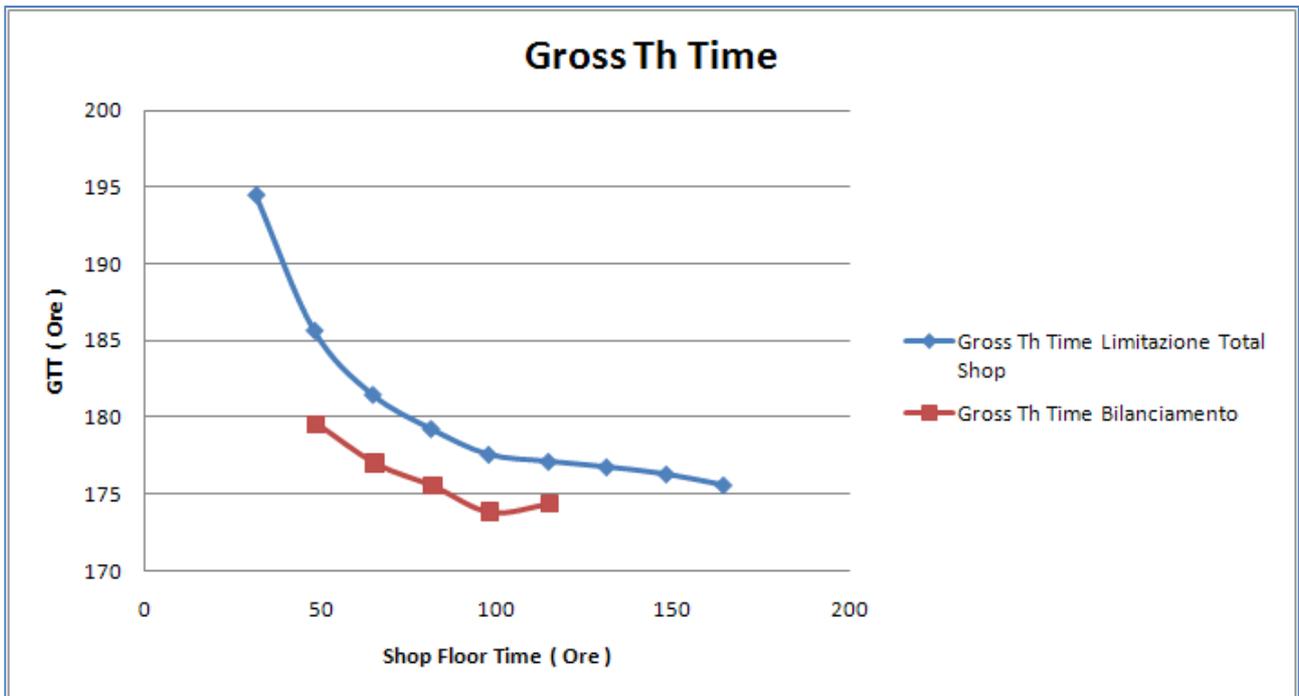


Figura 34 GTT Pipeline 210000 alta variabilità

Come si può vedere dal grafico il miglior punto della limitazione in termini di output è ottenuto con il massimo carico rilasciato a sistema (che corrisponde alla fissazione della norma a 10000 minuti per stazione, cioè praticamente all'immediate release). L'output vale in questo punto 14,6 pezzi al giorno, a fronte di un GTT pari a 175,5 ore. Un output ed un GTT comparabili sono realizzati dal bilanciamento con una norma fissata a 5000 minuti per stazione.

Questo comporta innanzitutto una riduzione del WIP del 50,2%. Il prossimo grafico mostra anche come l'impiego del bilanciamento comporti una significativa riduzione dei ritardi.

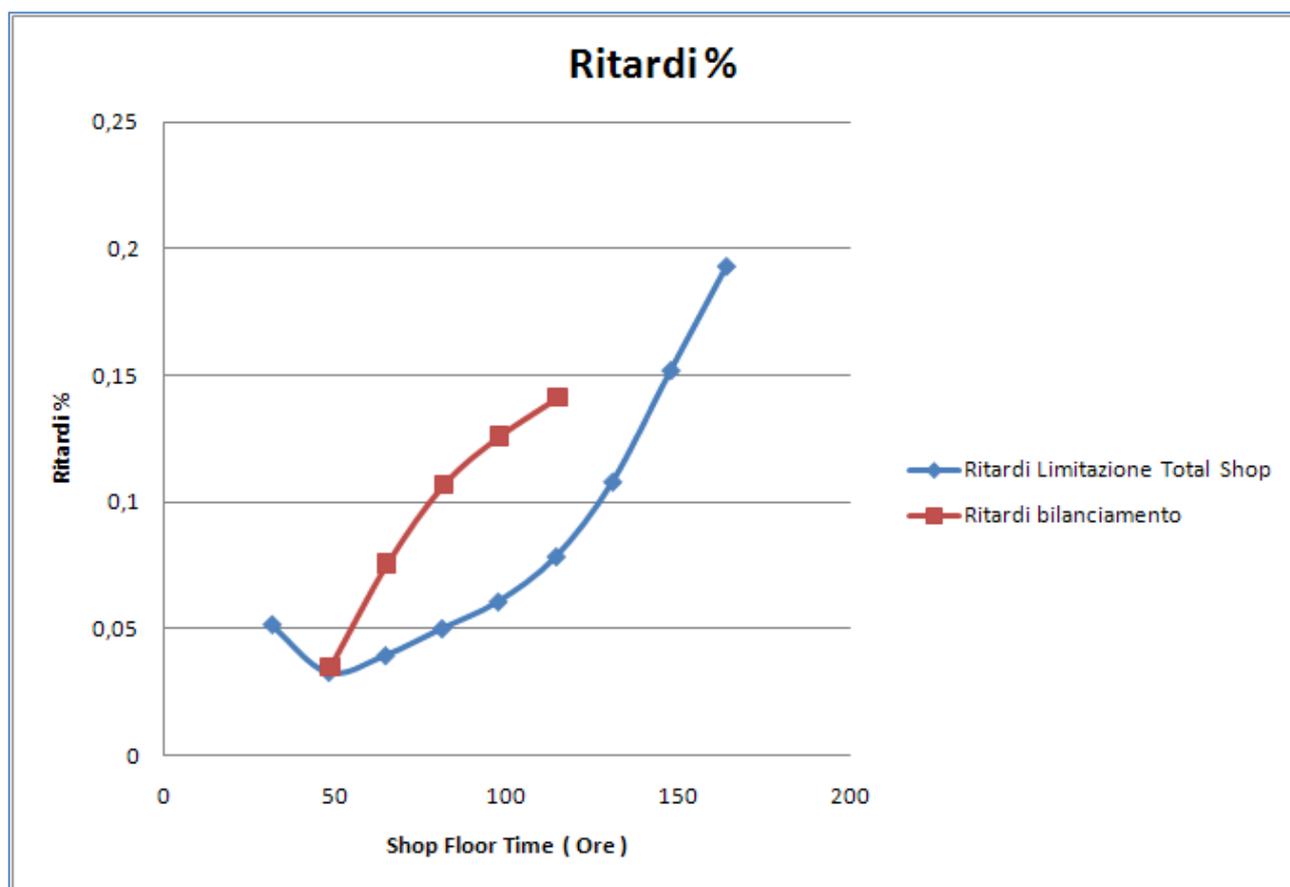


Figura 35 Ritardi Pipeline 210000 alta variabilità

Come si può notare, la riduzione della percentuale di ordini consegnati in ritardo con il bilanciamento (norma 5000) rispetto alla limitazione con carico aggregato (norma 10000) è pari al 44,6%.

Di maggiore interesse rispetto ai ritardi % è il punto corrispondente alla norma 9000 che abbassa dal 19% al 15% i ritardi ottenendo un Output di poco inferiore ai 14.6 pz/giorno individuati in precedenza. Rimane comunque una differenza di Output non trascurabile anche se ridotta.

7.1.2.1 La seconda configurazione analizzata. Il miglioramento delle performance nei punti di funzionamento sperimentati.

Vengono riportate di seguito le tabelle contenenti i valori puntuali delle performance di interesse ottenute dalla limitazione e dal bilanciamento dei carichi di lavoro.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Ordini in ritardo %	5.17%	3.29%	3.95%	5.01%	6.07%	7.85%	10.79%	15.18%	19.29%
Output medio (Pz / ora)	13.200	13.830	14.120	14.310	14.450	14.500	14.529	14.568	14.600
Carico medio sistema (min)	1464.95	2438.49	3056.20	3697.07	4698.85	5698.87	6578.83	7689.91	8470.12
GTT medio [h]	194.52	185.66	181.47	179.23	177.55	177.09	176.73	176.26	175.55
SFT medio [h]	31.56	48.08	64.59	81.09	97.45	114.40	130.90	147.85	164.09
PSPT medio [h]	20.37	17.20	14.61	12.27	10.01	7.84	5.29	3.84	1.43
WIP (Pezzi)	44.79	74.91	105.17	135.40	165.45	195.81	225.72	255.38	285.61

Figura 36 Performance limitazione pipeline 210000 alta variabilità

BILANCIAMENTO	3000	4000	5000	6000	7000
Ordini in ritardo %	3.47%	7.56%	10.69%	12.59%	14.13%
Output medio (Pz / ora)	14.28	14.50	14.62	14.72	14.67
Carico medio sistema (min)	2149.96	3546.31	4539.06	5530.60	6532.49
GTT medio [h]	179.55	177.00	175.54	173.85	174.41
SFT medio [h]	48.65	65.22	81.69	97.80	114.89
PSPT medio [h]	16.36	13.97	11.73	9.51	7.44
WIP (Pezzi)	78.30	108.38	138.86	169.32	200.38

Figura 37 Performance bilanciamento pipeline 210000 alta variabilità

Per quanto riguarda la limitazione Total Shop Load il punto di funzionamento individuato corrisponde alla norma 10000, molto vicina all'immediate release. La differenza in termini di Output tra la norma 10000 e la norma 7000 non consente la scelta di quest'ultima come per la prima configurazione analizzata. Si rivela in questo caso l'impatto della variabilità sulle prestazioni di una politica ORR di limitazione Total Shop Load. Nella configurazione precedente infatti, la limitazione otteneva dei buoni risultati utilizzando dei carichi di lavoro nello Shop Floor più bassi, mentre nel

caso di sistema con variabilità questi risultati non vengono raggiunti, obbligando i gestori del sistema ad avere degli Shop Floor molto carichi in termini di Work in Process.

Per quanto riguarda il bilanciamento il punto di funzionamento individuato è relativo alla norma 6000. Questo punto se confrontato con il punto migliore della limitazione total shop comporta notevoli miglioramenti, schematizzati nella seguente tabella.

CONFRONTO BILANCIAMENTO - LIMITAZIONE	
Ordini in ritardo %	-34.71%
Output medio (Pz / ora)	0.85%
Carico medio sistema (min)	-34.70%
GTT medio [h]	-0.97%
SFT medio [h]	-40.40%
PSPT medio [h]	563.35%
WIP (Pezzi)	-40.72%

Figura 38 Confronto bilanciamento limitazione Pipeline 210000 alta variabilità

I risultati ottenuti per questa configurazione sono confortanti. Il bilanciamento dei carichi di lavoro risente in maniera minore della variabilità di sistema, garantendo delle ottime performance rispetto alla limitazione dei carichi di lavoro.

7.1.3 La prima domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione dei due sistemi presentati ha mostrato una superiorità del bilanciamento dei carichi di lavoro nei confronti della Limitazione Total Shop Load. Prima di procedere con ulteriori analisi è opportuno schematizzare le differenze percentuali tra bilanciamento e limitazione ottenute per i due livelli di variabilità testati.

CONFRONTO BILANCIAMENTO - LIMITAZIONE		
Livello di variabilità	Basso	Alto
Ordini in ritardo %	-69.89%	-53.17%
Output medio (Pz / ora)	0.92%	0.84%
Carico medio sistema (min)	-38.32%	-53.15%
GTT medio [h]	-0.99%	-0.98%
SFT medio [h]	-28.84%	-67.78%
PSPT medio [h]	50.04%	84.93%
WIP (Pezzi)	-29.12%	-68.68%

Figura 39 Confronto bilanciamento limitazione rispetto alla variabilità

I dati mostrano la superiorità del bilanciamento del flusso rispetto alla limitazione in entrambe le configurazioni testate. L'incremento di Output vicino all'1% e la drastica riduzione dei ritardi percentuali rivelano le ottime performance ottenute. Molto importante è anche la riduzione dello Shop Floor Time. Essendo quest'ultimo un indicatore del livello di carico nel sistema produttivo si intuisce come una riduzione di questo parametro tra il 28% ed il 40% sia molto importante ai fini del contenimento dei costi e del raggiungimento di una maggiore flessibilità.

Inoltre uno dei fattori principali che determinano la superiorità del bilanciamento rispetto alla limitazione è l'ulteriore riduzione di Shop Floor Time ottenuta tra la configurazione con bassa variabilità ed alta variabilità. La riduzione percentuale difatti incrementa dal 28% con bassa variabilità al 40% con alta variabilità. La spiegazione è la seguente: la limitazione ha incrementato molto di più il WIP necessario a garantire performance elevate, spostandosi verso l'immediate release, passando quindi da norma 7000 a norma 10000. Lo Shop Floor Time della limitazione è incrementato così di 50 ore contro le 16 del bilanciamento.

Il bilanciamento dei carichi di lavoro ha risentito in maniera decisamente inferiore della variabilità di sistema, spostando il suo punto di funzionamento dalla norma 5000 alla norma 6000 per il caso con alta variabilità.

Da queste considerazioni derivano i vantaggi del bilanciamento dei carichi di lavoro nei confronti della limitazione total shop load. La riduzione dello Shop Floor Time del 40% ottenuta per la seconda configurazione analizzata così come la riduzione del 28% ottenuta per la prima configurazione è completamente spiegabile da quanto è stato appena mostrato: il bilanciamento dei carichi di lavoro garantisce maggiore robustezza al cambiamento di variabilità del sistema livellando meglio il carico tra le varie stazioni, di conseguenza comporta dei grossi miglioramenti nei confronti della limitazione in presenza di variabilità.

La seguente tabella mostra le differenze percentuali di Work In Process necessarie per i due modelli a garantire ad alti livelli di variabilità le performance massime ottenute a bassi livelli di variabilità in termini di Output. Riassumendo la tabella indica quanto carico aggiuntivo è necessario rilasciare nel sistema per sopperire l'aumento di variabilità ed ottimizzare le prestazioni in termini di Output.

CONFRONTO BASSA - ALTA VARIABILITA'	Limitazione	Bilanciamento
SFT medio [h]	44.43%	20.98%

Figura 40 L'aumento di SFT con aumento variabilità

Come si può notare facilmente la grossa differenza tra limitazione e bilanciamento consiste nell'aumento di Shop Floor Time necessario a garantire performance in termini di Output paragonabili. L'incremento doppio di Work In Process richiesto dalla limitazione è indice di minore robustezza alla variabilità di sistema. È inoltre da tenere in forte considerazione che non solo il Work In Process necessario è superiore ma anche che l'Output ottenibile come indica la figura 39 è minore dell'1% circa.

7.2 Domanda 2: Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-in-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni dei due modelli di bilanciamento e limitazione?

Per rispondere a questa seconda domanda di ricerca sono state analizzate le prestazioni delle due tecniche di Order Review and Release nei sistemi caratterizzati da variabilità bassa e alta con Pipeline pari a 130000 minuti (Tabella 1 e Tabella 3 del Capitolo 6). I risultati ottenuti vengono poi confrontati per completezza con gli esiti delle due configurazioni analizzate per la prima domanda di ricerca in modo da verificare l'effetto di una variazione della Pipeline nelle performance dei due metodi. Prima della presentazione dei risultati di ogni configurazione è presente comunque un breve riassunto delle principali caratteristiche delle configurazioni analizzate.

7.2.1 La terza configurazione analizzata: bassa variabilità e pipeline 130000 minuti.

La terza configurazione presentata rappresenta il sistema produttivo caratterizzato da minore variabilità con Pipeline pari a 130000 minuti (Tabella 1). Riassumendo brevemente il sistema produttivo caratterizzato da minore variabilità ha le seguenti caratteristiche:

- 1- Linee produttive e di assemblaggio assimilabili a un Flow Shop Puro
- 2- Assenza di ricircoli
- 3- Assenza di job che saltano qualche linea produttiva
- 4- Tempi standard preventivati differenti dai tempi effettivi di lavorazione
- 5- Due Dates determinate come $K * \text{Total Work Content del job}$ con $K = 10$
- 6- Limitazione Total Shop

- 7- Bilanciamento Total Shop
- 8- Dispatching alle machine FIFO.

Per questa particolare configurazione è stato provata anche la limitazione total shop con dispatching EDD nelle varie stazioni per provare la robustezza dei miglioramenti trovati anche rispetto alle altre possibili modalità di dispatching alle macchine.

Per prima cosa presentiamo gli andamenti ottenuti per i parametri di interesse ovvero il Gross Throughput Time , l'Output e i ritardi percentuali.

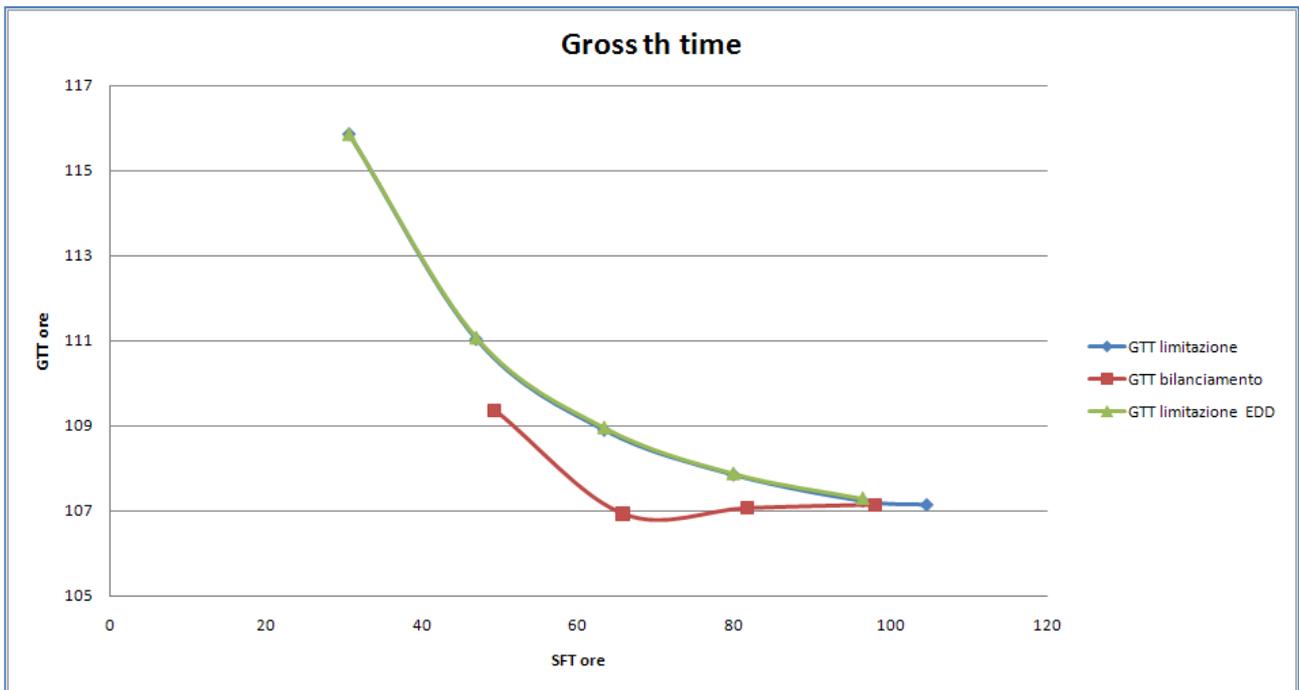


Figura 41 GTT Pipeline 130000 bassa variabilità

L'andamento del Gross Throughput Time mostra i vantaggi del bilanciamento rispetto alla semplice limitazione del carico sia che si decida di utilizzare una regola di dispatching FIFO oppure EDD per le stazioni del sistema produttivo. La curva del bilanciamento infatti mostra come performance superiori in termini di Gross Throughput Time siano ottenibili con una riduzione del 30 % del Work in Process nel sistema produttivo.

Per un'analisi più puntuale dei valori e dei miglioramenti nei confronti del miglior punto delle limitazioni contro il miglior punto del bilanciamento si rimanda alle tabelle di fine paragrafo.

L'output come è facilmente intuibile mostra un andamento speculare rispetto al Gross Throughput Time.

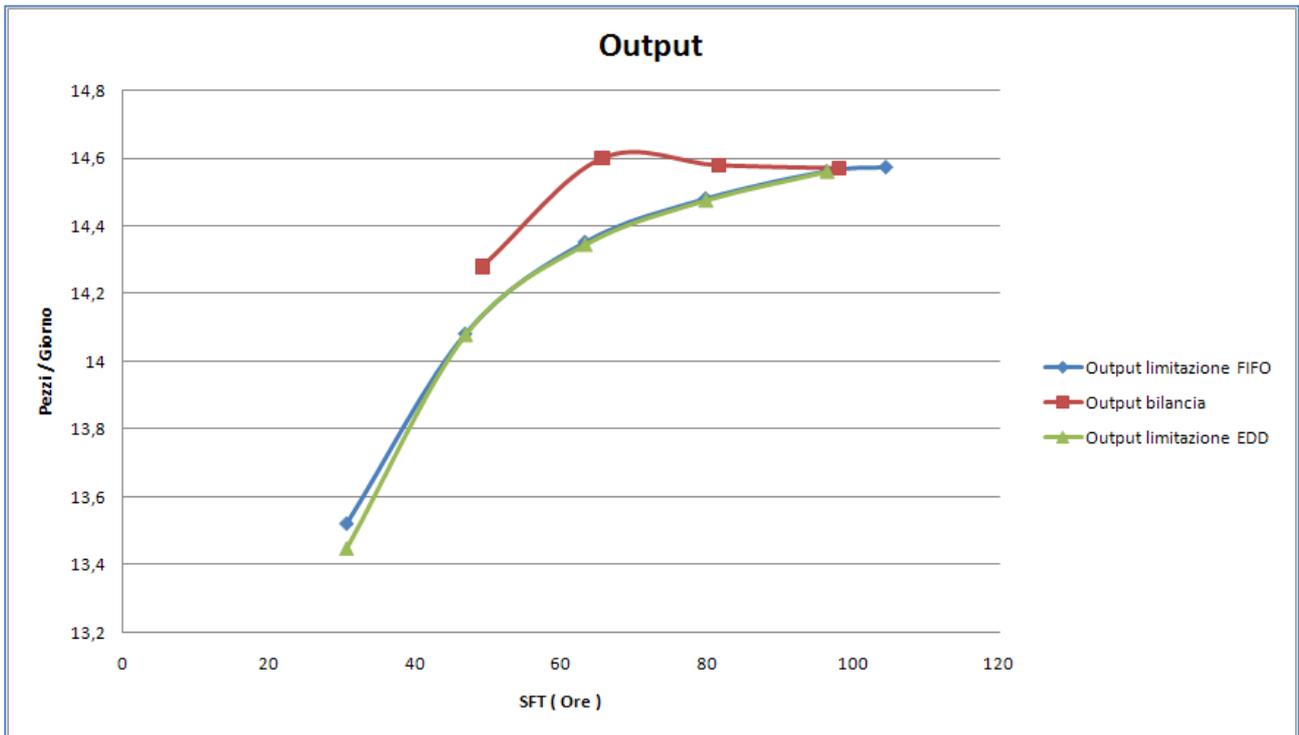


Figura 42 Output Pipeline 130000 bassa variabilità

L'andamento dell'output del bilanciamento mostra gli stessi miglioramenti individuati in precedenza. Il peggioramento dell'output del bilanciamento tra la norma 6000 e 5000 è dovuto alla minore possibilità da parte del modello di bilanciamento di bilanciare i carichi di lavoro. La norma 6000 è una norma che causa una Preshop Pool molto ridotta, con una scelta di job da rilasciare minima, impedendo il rilascio ottimale dei job.

Passando infine ad analizzare i ritardi i risultati sono molto incoraggianti; il bilanciamento dei carichi di lavoro grazie ad un'opportuna scelta dei tempi di attraversamento del sistema preventivati garantisce una sostanziale riduzione dei ritardi percentuali così come del ritardo medio dei job espresso in giorni.

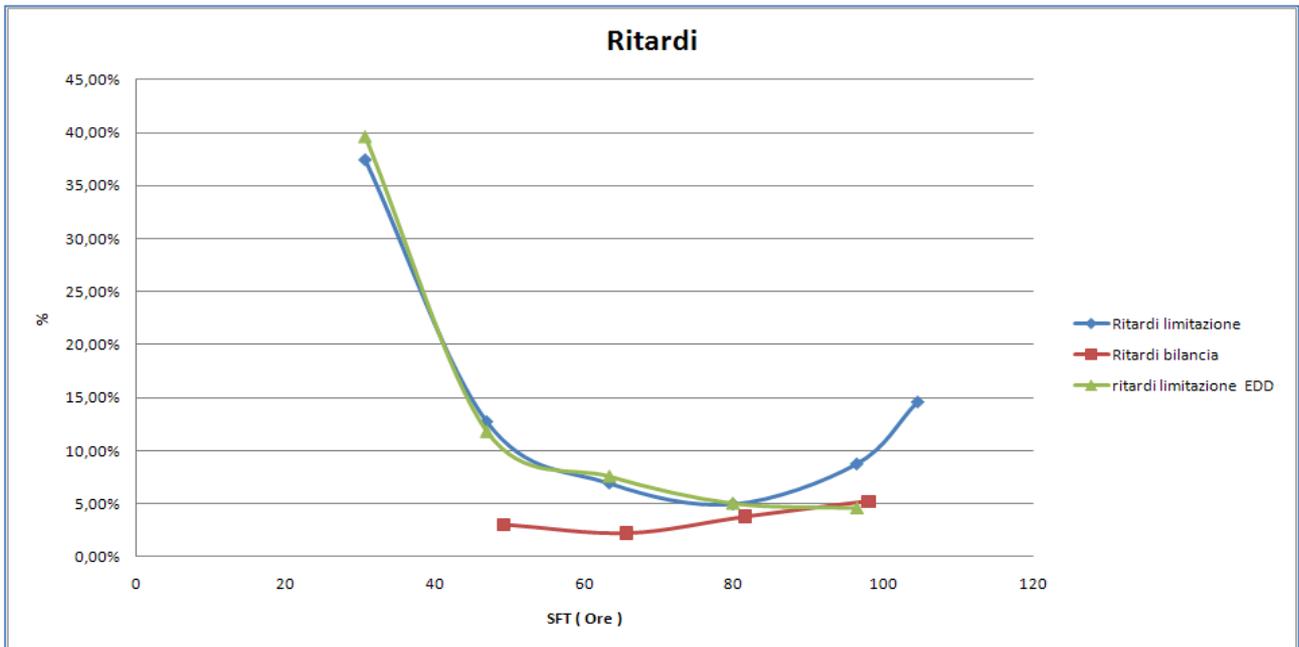


Figura 43 Ritardi Pipeline 130000 bassa variabilità

La superiorità del bilanciamento rimane evidente, portando i ritardi a un valore vicino al 2% nel punto di funzionamento da noi individuato (il secondo punto del grafico).

Per finire si riporta l'andamento della Mean Conditional Tardiness che indica il numero medio di giorni di ritardo dei job nel sistema.

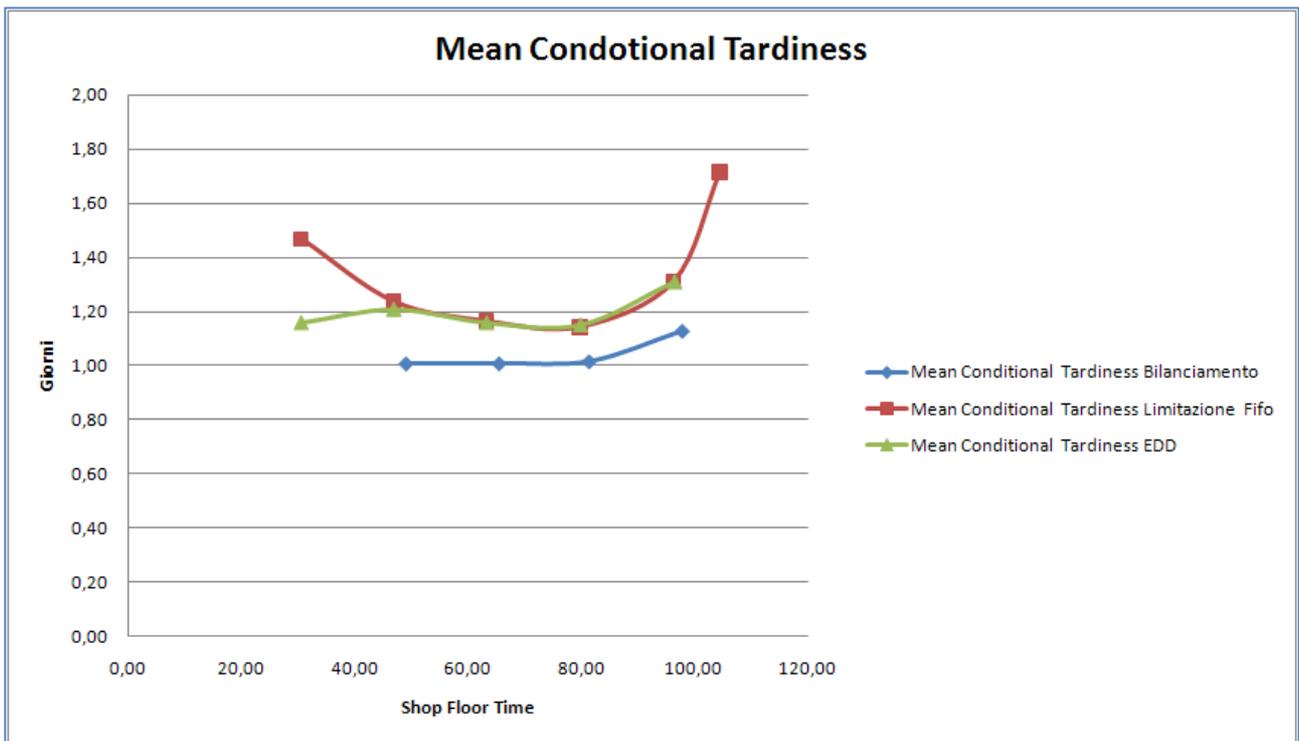


Figura 44 Mean conditional tardiness Pipeline 130000 bassa variabilità

7.2.1.1 La terza configurazione analizzata, i miglioramenti nelle performance dei punti di funzionamento.

Si passa ora ad un'analisi più approfondita circa i punti di funzionamento ottimali della limitazione e del bilanciamento individuati e dei miglioramenti percentuali ottenuti.

Per prima cosa le tabelle sottostanti riportano interamente i risultati delle run effettuate per il bilanciamento e la limitazione.

LIMITAZIONE Total Shop Load FIFO	2000	3000	4000	5000	6000	6500
Ordini in ritardo %	37.43%	12.76%	6.96%	4.99%	8.77%	14.60%
Ritardo medio (giorni)	1.47	1.24	1.16	1.14	1.31	1.72
Output medio (Pz / ora)	13.52	14.08	14.35	14.48	14.56	14.57
Carico medio sistema (min)	1439.25	2417.20	3404.24	4395.71	5384.81	5863.90
Caricamento medio del sistema (minuti)	432.61	450.53	459.17	463.21	465.77	466.21
GTT medio [h]	115.85	111.04	108.90	107.86	107.24	107.15
SFT medio [h]	30.61	46.87	63.27	79.81	96.37	104.52
PSPT medio [h]	10.66	8.02	5.70	3.51	1.36	0.33
WIP (Pezzi)	45.03	75.56	106.45	137.39	167.97	182.71

Figura 45 Performance limitazione pipeline 130000 bassa variabilità

LIMITAZIONE Total Shop Load EDD	2000	3000	4000	5000	6000
Ordini in ritardo %	39.64%	11.85%	7.62%	5.08%	4.63%
Ritardo medio (giorni)	1.16	1.21	1.16	1.15	1.31
Output medio (Pz / ora)	13.45	14.08	14.34	14.47	14.56
Carico medio sistema (min)	1439.35	2417.65	3404.78	4395.93	5385.42
Caricamento medio del sistema (minuti)	430.15	450.53	458.90	463.02	465.74
GTT medio [h]	115.85	111.06	108.95	107.87	107.29
SFT medio [h]	30.61	46.91	63.30	79.84	96.43
PSPT medio [h]	10.66	8.02	5.71	3.50	1.36
WIP (Pezzi)	45.09	75.59	106.43	137.33	167.29

Figura 46 Performance limitazione EDD pipeline 130000 bassa variabilità

BILANCIAMENTO	3000	4000	5000	6000
Ordini in ritardo %	3.03%	2.23%	3.78%	5.23%
Ritardo medio (giorni)	1.01	1.01	1.02	1.13
Output medio (Pz / ora)	14.28	14.60	14.58	14.57
Carico medio sistema (min)	2576.17	3599.49	4529.93	5534.82
Caricamento medio del sistema (minuti)	457.01	465.83	466.45	466.74
GTT medio [h]	109.36	106.92	107.06	107.14
SFT medio [h]	49.22	65.65	81.57	98.02
PSPT medio [h]	7.22	5.16	3.19	1.14
WIP (Pezzi)	80.88	112.55	141.58	172.58

Figura 47 Performance bilanciamento pipeline 130000 bassa variabilità

Analizzando i risultati ottenuti si nota come il punto di funzionamento ottimale per quanto riguarda la limitazione sia caratterizzato da norma pari a 6000 o 6500. Dato che l'incremento in termini di output nel passare da una norma all'altra è decisamente marginale e pari allo 0.084% si è scelto di prendere come riferimento la norma 6000 della limitazione caratterizzata inoltre da meno ritardi e meno Work in Process all'interno dello Shop Floor.

Per quanto riguarda il bilanciamento dei carichi di lavoro si nota facilmente come il punto di funzionamento sia caratterizzato da norma pari a 4000 minuti per ogni stazione. In questo punto l'output è maggiore dell'output della limitazione, i ritardi e il Gross Throughput Time scendono così come il Work in Process nel sistema.

La seguente tabella schematizza i miglioramenti percentuali del bilanciamento rispetto alla limitazione. Data l'esigua differenza delle prestazioni della limitazione rispetto alle regole di dispatching utilizzate si è deciso di prendere a riferimento la limitazione FIFO.

I miglioramenti per quanto riguarda questa particolare configurazione e Pipeline sono notevoli. Per prima cosa i ritardi sono ridotti drasticamente grazie ad una corretta stima degli istanti di rilascio al più tardi. Le performance in termini di output e Gross Throughput Time rimangono comunque incoraggianti nonostante i miglioramenti siano marginali, perché ottenute con una riduzione del Work in Process necessario del 31 % permettendo maggior flessibilità ai gestori del sistema in quanto non sono obbligati a rilasciare immediatamente gli ordini presenti a sistema.

In particolare i gestori del sistema hanno a disposizione molto più tempo per apportare modifiche e cambiamenti dell'ultimo minuto ai job che non sono nel sistema produttivo ma rimangono in attesa in Preshop Pool. Questo consente come detto in precedenza maggiore flessibilità ed inoltre

potrebbe garantire il funzionamento del sistema su livelli molto simili con Pipeline ulteriormente ridotte. Tale possibilità garantirebbe una minore complessità organizzativa del sistema produttivo avendo da gestire un numero inferiore di job, unita ad una maggiore semplicità di stima delle Due Dates e quindi la possibilità di un ulteriore riduzione dei ritardi.

CONFRONTO BILANCIA- LIMITAZIONE	
Ordini in ritardo %	-74.61%
Ritardo medio (giorni)	-23.09%
Output medio (Pz / ora)	0.27%
Carico medio sistema (min)	-33.15%
Caricamento medio del sistema (minuti)	0.01%
GTT medio [h]	-0.29%
SFT medio [h]	-31.87%
PSPT medio [h]	279.63%
WIP (Pezzi)	-32.99%

Figura 48 Confronto bilanciamento - limitazione pipeline 130000 bassa variabilità

7.2.2 La quarta configurazione analizzata: alta variabilità e pipeline 130000.

Vengono presentati gli esiti relativi alla quarta configurazione analizzata. Questa particolare configurazione è contraddistinta da alta variabilità ed una Pipeline di 130000 minuti (Tabella 3). Riassumendo brevemente le caratteristiche di questa configurazione sono le seguenti:

- 1- Routing pari all'80%, le linee di fabbricazione ed assemblaggio sono quindi assimilabili a dei General Flow Shop.
- 2- Due Dates ottenute come $K * \text{Total Work Content}$ con $K = 10$.
- 3- Possibilità da parte del 10% dei job di saltare una delle tre linee di assemblaggio
- 4- Presenza di riciccoli
- 5- Tempi standard differenti dai tempi effettivi
- 6- Dispatching FIFO
- 7- Limitazione Total Shop Load
- 8- Bilanciamento Total Shop Load

In particolare per la determinazione del coefficiente K necessario al calcolo delle Due Dates è stato utilizzato lo stesso ricavato dalla prima configurazione comportando dei ritardi maggiori rispetto alla prima configurazione essendo le Due Dates maggiormente stringenti. Questa scelta è stata fatta per le stesse motivazioni che hanno portato l'utilizzo di un K costante al variare delle norme ovvero

per non collegare il funzionamento del modello di bilanciamento dalla determinazione delle Due Dates e poter quindi definire in termini assoluti se il bilanciamento performi meglio della limitazione a parità di condizioni iniziali.

Passando ora all'analisi dei risultati come per la configurazione precedente si riportano i grafici delle prestazioni di interesse.

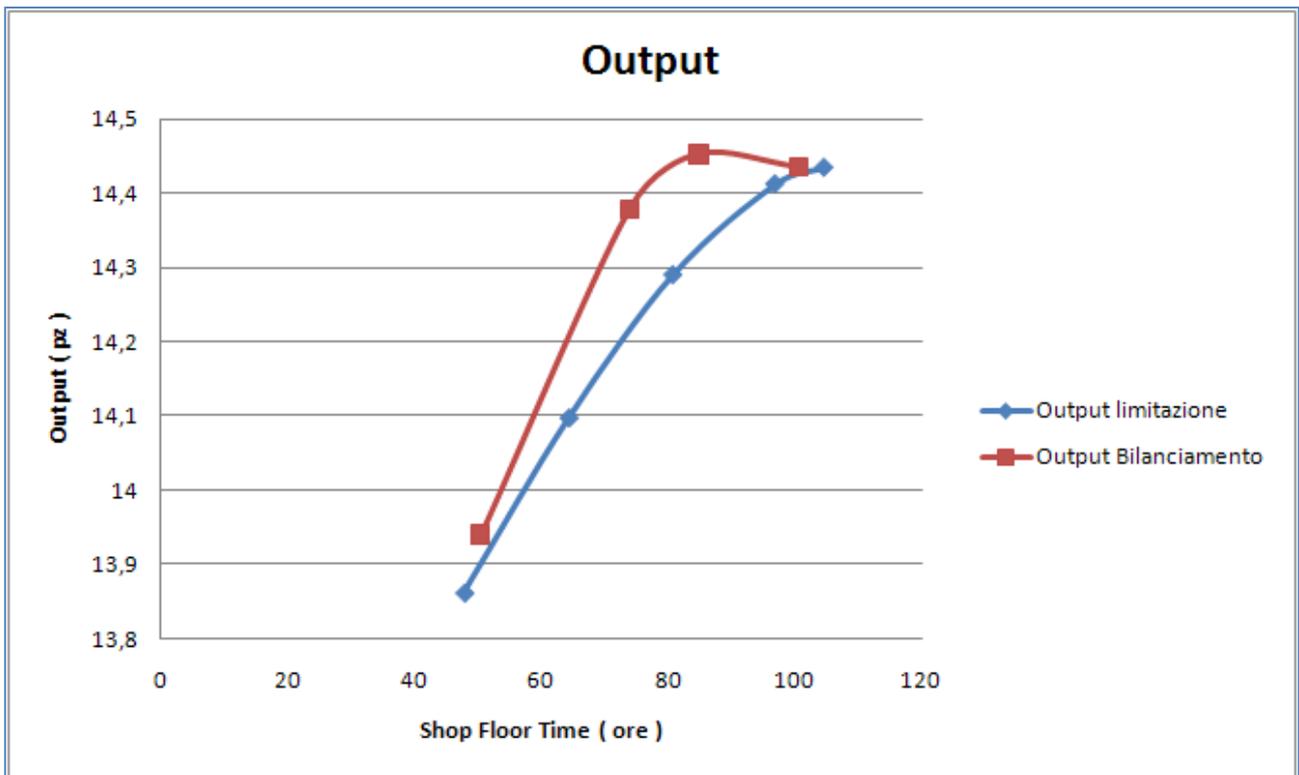


Figura 49 Output Pipeline 130000 alta variabilità

Nonostante i risultati di questa configurazione non mostrino i grossi miglioramenti della prima configurazione, il bilanciamento dei carichi di lavoro appare comunque decisamente superiore. Esso infatti garantisce un notevole risparmio in termini di Work in Process necessario per portare il sistema produttivo sul punto di funzionamento ottimale.

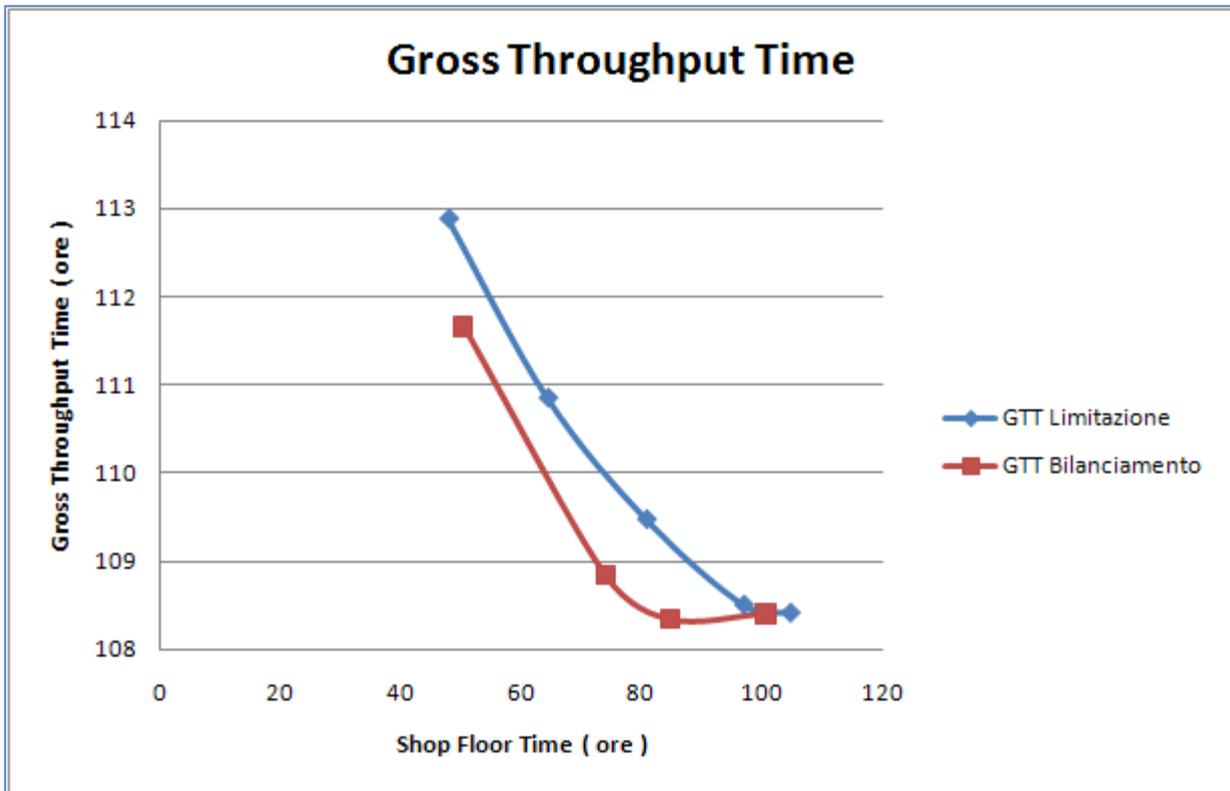


Figura 50 GTT Pipeline 130000 alta variabilità

Analizzando i ritardi si può facilmente intuire il motivo di un miglioramento inferiore rispetto alla precedente configurazione senza variabilità. La scelta di utilizzare lo stesso K per la determinazione delle Due Dates ha portato il sistema con variabilità ad avere delle Due Dates decisamente stringenti. Questo si nota dal grafico in figura dove i ritardi all'immediate release superano il 25% e nel punto di minimo rimangono comunque intorno al 13%.

Questo comporta maggiori difficoltà da parte del bilanciamento in quanto si trova ad avere di fatto poche possibilità di bilanciare i carichi in quanto spesso vengono rilasciati per via degli istanti al più tardi. Nonostante questa complicazione il bilanciamento dei carichi di lavoro performa comunque meglio della limitazione Total Shop Load permettendo risparmi in termini di pezzi nel sistema produttivo.

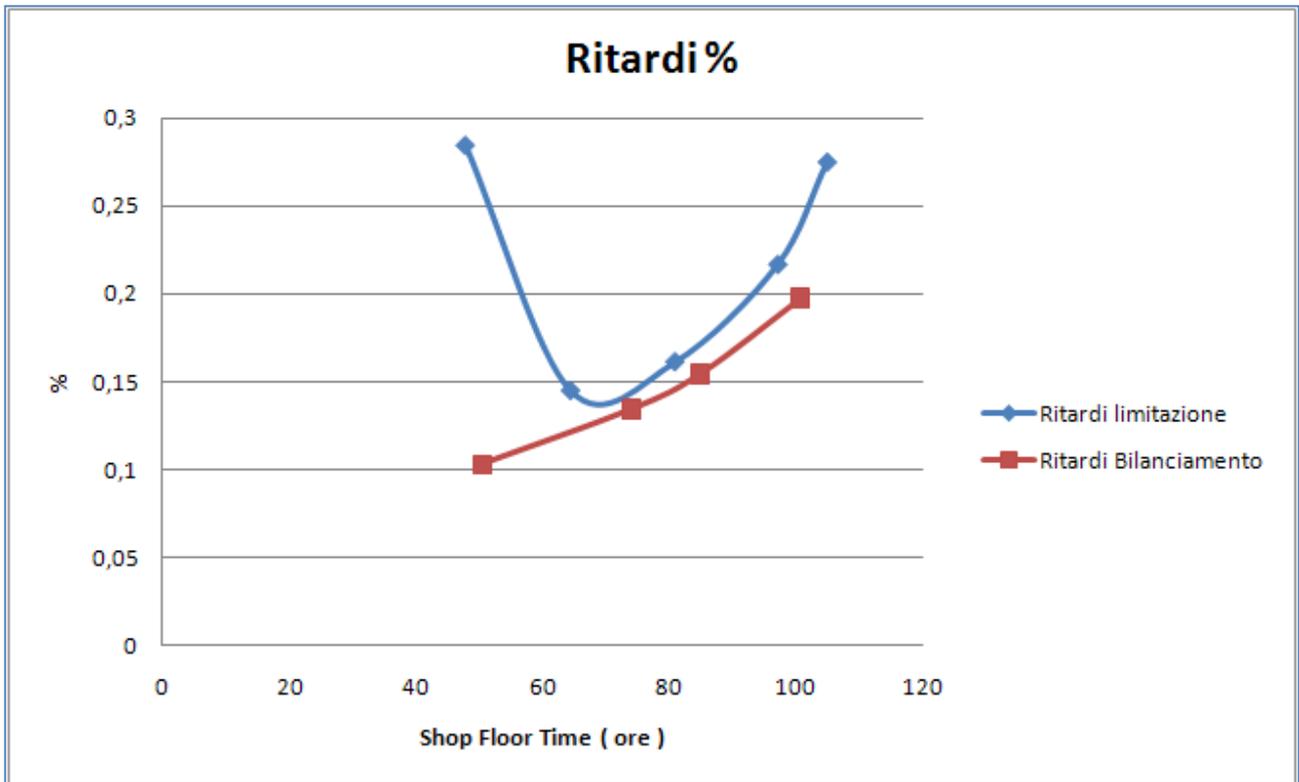


Figura 51 Ritardi Pipeline 130000 alta variabilità

La conca decisamente accentuata dei ritardi percentuali è dovuta in parte al metodo di determinazione delle Due Dates come spiegato in precedenza e in parte alla presenza di ricircoli. Nel momento in cui un pezzo deve effettuare le rilavorazioni richieste da parte del controllo qualità a norme alte va quasi sempre in ritardo. Dato che la percentuale di job che ricircolano non è trascurabile questo comporta un ingente aumento dei ritardi per norme elevate.

Il bilanciamento dimostra comunque prestazioni migliori anche se di poco rispetto alla semplice limitazione del carico di lavoro. L'intervento degli istanti di rilascio al più tardi inoltre permette a norme basse una notevole riduzione dei ritardi causati dai ricircoli. Gli output per tali norme non sono adeguati e di conseguenza non è conveniente selezionare tali punti come punti di funzionamento del sistema produttivo.

7.2.2.1 La quarta configurazione analizzata. Il miglioramento delle performance nei punti di funzionamento sperimentati.

Vengono presentati ora i risultati numerici per limitazione e bilanciamento per la seconda configurazione analizzata.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	3000	4000	5000	6000	6500
Ordini in ritardo %	28.42%	14.45%	16.09%	21.64%	27.47%
Ritardo medio (giorni)	1.614601	2.040526	2.417729	2.870643	3.16697
Output medio (Pz / ora)	13.86156	14.09719	14.29	14.41224	14.43438
Carico medio sistema (min)	2424.635	3132.642	3979.667	4918.752	5341.738
Caricamento medio del sistema (minuti)	443.0576	462.8701	462.0501	469.0888	471.5729
GTT medio [h]	112.881	110.8464	109.4691	108.4997	108.4079
SFT medio [h]	47.83667	64.3623	80.78141	96.94954	104.7193
PSPT medio [h]	8.130537	5.810518	3.585965	1.443766	0.419959
WIP (Pezzi)	74.67799	104.4208	134.1172	163.0156	177.5564

Figura 52 Performance limitazione Pipeline 130000 alta variabilità

BILANCIAMENTO	3000	4000	5000	6000
Ordini in ritardo %	10.29%	13.44%	16.45%	19.74%
Ritardo medio (giorni)	1.90	1.71	2.03	2.25
Output medio (Pz / ora)	13.94	14.38	14.45	14.44
Carico medio sistema (min)	2675.45	3498.21	4661.90	5646.87
Caricamento medio del sistema (minuti)	445.82	490.09	462.06	465.98
GTT medio [h]	111.66	108.84	108.34	108.41
SFT medio [h]	50.35	73.96	84.82	100.65
PSPT medio [h]	6.78	4.36	2.94	0.97
WIP (Pezzi)	80.51	123.10	142.58	170.58

Figura 53 Performance bilanciamento Pipeline 130000 alta variabilità

Il punto di funzionamento individuato per la limitazione è a norma 6000 in quanto comporta una riduzione di Work in Process di sistema rispetto all'immediate release dell'8% a fronte di una perdita di Output dello 0.15%.

Per quanto riguarda il bilanciamento si è scelto il punto a norma 5000 caratterizzato da Output maggiore rispetto al miglior punto della limitazione e da Ritardi % e Work in Process inferiori.

I miglioramenti percentuali sono riportati nella tabella successiva.

CONFRONTO BILANCIAMENTO - LIMITAZIONE	
Ordini in ritardo %	-23.99%
Ritardo medio (giorni)	-29.31%
Output medio (Pz / ora)	0.28%
Carico medio sistema (min)	-5.22%
Caricamento medio del sistema (minuti)	-1.50%
GTT medio [h]	-0.15%
SFT medio [h]	-12.51%
PSPT medio [h]	103.62%
WIP (Pezzi)	-12.54%

Figura 54 Confronto bilanciamento limitazione pipeline 130000 alta variabilità

I miglioramenti anche se inferiori rispetto alla prima configurazione senza variabilità rimangono evidenti.

La riduzione del 12% dello Shop Floor Time e del 24% di ritardi a parità di Output e Gross Throughput Time comportano un notevole guadagno in termini di flessibilità da parte del gestore del sistema produttivo. Il Preshop Pool Time raddoppia garantendo maggiore predisposizione da parte dell'azienda a cambiamenti dell'ultimo momento, non essendo più obbligatorio il rilascio dopo una breve sosta dei job in Preshop Pool.

In un contesto fortemente variabile come quello analizzato e con Due Dates stringenti la possibilità di portare il sistema su un punto di funzionamento caratterizzato da una Preshop Pool più estesa è un vantaggio competitivo rilevante.

La Preshop Pool è in grado, infatti, di assorbire la variabilità interna ed esterna garantendo quindi dei rilasci costanti allo Shop Floor che quindi non risente della variabilità degli ordini in ingresso.

7.2.3 La seconda domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.

Questa seconda parte del lavoro di tesi è volta a verificare la robustezza delle soluzioni trovate per la prima domanda di tesi nei confronti di una riduzione della Pipeline. I risultati ottenuti mostrano ancora una volta le performance superiori ottenibili tramite il bilanciamento dei carichi di lavoro in termini di riduzione del Work in Process necessario a garantire prestazioni elevate.

L'effetto della riduzione di Pipeline è evidente se si analizzano le performance produttive: l'Output passa da un massimo di 14.72 ottenuto dal bilanciamento per le prime due configurazioni con Pipeline 210000 minuti ad un massimo di 14.6 ottenuto dal bilanciamento per la configurazione con

Pipeline 130000 minuti e bassa variabilità. Il bilanciamento dei carichi di lavoro ottiene comunque performance superiori alla limitazione Total Shop seppure con riduzioni percentuali maggiori.

Per schematizzare quanto detto si riportano nelle tabelle seguenti le variazioni percentuali delle performance di limitazione e bilanciamento al variare della Pipeline. Si è deciso di mostrare le differenze riscontrate in termini di Output essendo uno degli indicatori chiave della produttività del sistema. Le performance legate ai ritardi invece non sono state considerate in quanto legate alla determinazione delle Due Dates e non al meccanismo di rilascio.

Limitazione	130000	210000	Var %
Bassa Variabilità	14.56	14.58	0.12%
Alta Variabilità	14.41	14.60	1.29%

Figura 55 La variazione di Output per la limitazione al variare di carico di sistema e variabilità

Bilanciamento	130000	210000	Var %
Bassa Variabilità	14.60	14.71	0.77%
Alta Variabilità	14.45	14.72	1.84%

Figura 56 La variazione di Output per il bilanciamento al variare di carico di sistema e variabilità

Come si può notare le differenze percentuali di Output sono minori per la limitazione dei carichi di lavoro rispetto al bilanciamento. Tale dato non deve però trarre in inganno: il bilanciamento dei carichi di lavoro ottiene performance sempre migliori della limitazione sia in termini di Output che di tutte le altre performance.

Gli scarti maggiori sono dovuti ad una grande peculiarità del bilanciamento dei carichi di lavoro: aumentando la Pipeline cresce la Preshop Pool e di conseguenza il modello riesce a rilasciare i job con dei carichi molto più livellati potendo scegliere tra un numero di ordini maggiore. Nella configurazione peggiore, che mostra una forte riduzione dell'Output ovvero quella con alta variabilità e Pipeline 130000 minuti il bilanciamento dei carichi di lavoro ottiene un Output massimo leggermente superiore alla limitazione. Questo comporta che nei casi più estremi, con poco carico di sistema e alta variabilità il bilanciamento ottiene performance produttive molto simili alla limitazione. L'Output massimo della limitazione appare dunque come un Lower Bound dell'Output massimo del bilanciamento, mostrando la robustezza delle migliori performance del bilanciamento nei confronti della limitazione anche diminuendo la Pipeline.

Per concludere, la risposta alla seconda domanda di ricerca circa la robustezza delle soluzioni trovate al variare della Pipeline è la seguente: il bilanciamento dei carichi di lavoro mostra maggiore robustezza, ottenendo performance migliori in tutte e quattro le configurazioni provate. Una delle peculiarità del bilanciamento è quella di ottenere variazioni percentuali in termini di Output maggiori aumentando la Pipeline, avendo a disposizione una vasta scelta di job da rilasciare.

7.3 Domanda 3: La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?

Viene presentata ora la terza parte del lavoro di simulazione, volta a mostrare le possibilità derivanti dall'implementazione del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro in merito alla riduzione della Pipeline e al mantenimento delle performance.

Partendo dagli ottimi risultati ottenuti dal modello di bilanciamento dei carichi di lavoro rispetto alla limitazione si cerca ora di determinare se è possibile ridurre la Pipeline e mantenere livelli di Output comunque elevati facendo leva sulle Due Dates. Riducendo le Pipeline mantenendo delle Due Dates meno stringenti si cerca di verificare i giovamenti che il modello di bilanciamento riceve dalla maggiore possibilità di selezione dei job non avendo rilasci obbligati per via degli istanti al più tardi. Come verrà mostrato meglio nel paragrafo 7.3.5 tale modellazione ben si associa a sistemi produttivi che implementano il bilanciamento dei carichi di lavoro per i vantaggi che ne derivano e che saranno mostrati nei prossimi paragrafi.

Si è deciso di ridurre entrambe le Pipeline circa del 20%, portando i valori da 130000 minuti a 105000 minuti e da 210000 minuti a 170000 minuti. Una riduzione del 20% del carico complessivo di sistema ha consentito una riduzione fino al 10% delle Due Dates utilizzate in precedenza. Tale riduzione come si vedrà in seguito è ottenuta mediante la riduzione dello Slack K, il coefficiente utilizzato per calcolare le Due Dates.

Per le configurazioni analizzate il punto di funzionamento è stato individuato a norma 4000, cercando di risolvere il trade-off esistente tra norme troppo basse con poco Output e norme troppo elevate con scarsa possibilità di bilanciamento.

7.3.1 La quinta configurazione analizzata.

La quinta configurazione analizzata corrisponde alla terza configurazione con variabilità bassa e Pipeline pari a 130000 minuti descritta nel paragrafo 7.2.1, si è analizzato il funzionamento dello

stesso sistema con carico in Pipeline pari a 105000 minuti (Tabella 7), a norma 4000 con tre differenti valori di K. I valori di K utilizzati sono:

- K = 10 come la precedente configurazione con Pipeline 130000 minuti
- K = 9.5 portando quindi una riduzione del 5% delle Due Dates
- K = 9 portando quindi una riduzione del 10% delle Due Dates

La tabella seguente riassume i risultati ottenuti:

BILANCIAMENTO	105000 K 9	105000 K 9.5	105000 K 10
% Ordini in ritardo	0.07%	0.00%	0.00%
Output medio	14.481	14.512	14.5358333
Carico medio sistema	3533.88	3528.64	3525.70
Caricamento medio del sistema	463.47	464.52	465.18
GTT medio [h]	86.20	85.99	85.88
SFT medio [h]	64.88	64.61	64.53
PSPT medio [h]	2.66	2.63	2.67
WIP	110.36	110.02	109.98

Figura 57 Le performance del bilanciamento con Pipeline 105000 bassa variabilità

I risultati ottenuti sono incoraggianti se confrontati con il punto di funzionamento individuato per la limitazione Total Shop Load. Per una maggiore facilità di analisi viene riportato di seguito la tabella contenente il punto di funzionamento della limitazione individuato in precedenza.

LIMITAZIONE Total Shop Load FIFO	6000
Ordini in ritardo %	8.77%
Ritardo medio (giorni)	1.311222
Saturazione media %	97.35%
Output medio (Pz / ora)	14.56025
Carico medio sistema (min)	5384.805
Caricamento medio del sistema (minuti)	465.7651
GTT medio [h]	107.2391
SFT medio [h]	96.36729
PSPT medio [h]	1.358977
WIP (Pezzi)	167.9738

Figura 58 Performance limitazione Pipeline 130000 bassa variabilità

I vantaggi derivanti dalla riduzione di Pipeline ottenibile tramite il bilanciamento dei carichi di lavoro sono evidenti: a parità di Due Dates la perdita di Output è influente rispetto ai guadagni in termini di Gross Throughput Time e di ritardi percentuali, così come in termini di Shop Floor Time.

Lo stesso ragionamento può essere applicato anche con una riduzione delle Due Dates fino al 5% che comporta una perdita di Output pari allo 0.33% con una riduzione del Gross Throughput Time del 20% e l'azzeramento dei ritardi percentuali.

Nella seguente tabella vengono riassunti i dati ottenuti tramite simulazione.

Confronto Bilanciamento - Limitazione con K differenti			
Coefficiente K per le Due Dates	K = 9	K = 9.5	K = 10
Ordini in ritardo %	-99.25%	-99.96%	-100.00%
Output medio (Pz / ora)	-0.54%	-0.33%	-0.17%
Carico medio sistema (min)	-34.37%	-34.47%	-34.52%
Caricamento medio del sistema (minuti)	-0.49%	-0.27%	-0.12%
GTT medio [h]	-19.62%	-19.81%	-19.92%
SFT medio [h]	-32.67%	-32.95%	-33.03%
PSPT medio [h]	96.04%	93.87%	96.33%
WIP (Pezzi)	-34.30%	-34.50%	-34.53%

Figura 59 Conftonto limitazione pipeline 130000 bassa variabilità – bilanciamento pipeline 105000 bassa variabilità

Il punto di funzionamento ottimale individuato per il bilanciamento è quindi relativo alla norma 4000 con coefficiente $K = 9.5$ e Pipeline 105000 minuti. Agendo in questo modo si ottengono delle perdite contenute di Output ed i miglioramenti mostrati in precedenza. Come ulteriore vantaggio tale punto comporta una riduzione delle Due Dates del 5%, il tutto a vantaggio del cliente che può contare su Due Dates più brevi e possibilità di consegna in ritardo praticamente nulla. Una riduzione ulteriore delle Due Dates causerebbe una riduzione dell'Output superiore allo 0.5 %, valore che è stato definito come soglia per identificare delle perdite ininfluenti o meno, per questo motivo il punto caratterizzato da coefficiente $K = 9$ non può essere preso in considerazione.

I miglioramenti mostrati non sarebbero possibili utilizzando la limitazione dei carichi di lavoro in quanto l'Output prodotto sarebbe sicuramente minore o al massimo uguale alla norma 5000 ottenuta per la prima configurazione. La limitazione infatti non trae benefici dall'allargamento delle Due Dates in quanto il suo algoritmo di funzionamento non bilancia meglio i carichi nel caso in cui ci sia maggiore possibilità di scelta. Per questo motivo non si possono ottenere i miglioramenti mostrati agendo tramite la Limitazione dei Carichi di Lavoro.

7.3.2 La sesta configurazione analizzata.

Anche in questo caso come per la quinta configurazione la Pipeline analizzata è pari a 105000 minuti ma il contesto è di alta variabilità ed i coefficienti K provati sono solo due anziché tre come per la precedente configurazione:

- K = 10 quindi Due Dates identiche alla Pipeline 130000
- K = 9 quindi una riduzione del 10 % delle Due Dates

Tale sistema è sintetizzato in tabella 5.

I risultati ottenuti sono schematizzati dalla tabella seguente:

BILANCIAMENTO	105000 K 9	105000 K10
Ordini in ritardo %	7.56%	4.74%
Ritardo medio (giorni)	1.58	1.52
Output medio (Pz / ora)	14.39	14.43
Carico medio sistema (min)	3539.49	3533.19
Caricamento medio del sistema (minuti)	460.19	461.46
GTT medio [h]	86.98	86.90
SFT medio [h]	65.54	65.44
PSPT medio [h]	2.68	2.68
WIP (Pezzi)	108.14	107.95

Figura 60 Performance bilanciamento Pipeline 105000 alta variabilità

Si riportano inoltre i risultati ottenuti per il punto di funzionamento individuato in precedenza per la Limitazione Total Shop Load a norma 6000.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	6000
Ordini in ritardo %	21.64%
Ritardo medio (giorni)	2.87
Output medio (Pz / ora)	14.41
Carico medio sistema (min)	4918.75
Caricamento medio del sistema (minuti)	469.09
GTT medio [h]	108.50
SFT medio [h]	96.95
PSPT medio [h]	1.44
WIP (Pezzi)	163.02

Figura 61 Performance limitazione Pipeline 130000 alta variabilità

Confronto Bilanciamento - Limitazione con K differenti		
Coefficiente K utilizzato	K = 9	K = 10
Ordini in ritardo %	-65.06%	-78.08%
Ritardo medio (giorni)	-44.90%	-46.97%
Output medio (Pz / ora)	-0.12%	0.15%
Carico medio sistema (min)	-28.04%	-28.17%
Caricamento medio del sistema (minuti)	-1.90%	-1.63%
GTT medio [h]	-19.84%	-19.91%
SFT medio [h]	-32.40%	-32.51%
PSPT medio [h]	85.58%	85.85%
WIP (Pezzi)	-33.66%	-33.78%

Figura 62 Confronto limitazione pipeline 130000 alta variabilità – bilanciamento pipeline 105000 alta variabilità

Come si può facilmente capire dalla tabella riassuntiva, il bilanciamento dei carichi di lavoro migliora decisamente le performance in termini di Ritardi percentuali, di Gross Throughput Time e di Shop Floor Time. In questa particolare configurazione è addirittura possibile ridurre le Due Dates del 10 % senza ridurre in maniera significativa l'Output del sistema. Utilizzando un coefficiente K = 9 infatti, la riduzione in termini di Output è pari allo 0.12%, decisamente irrilevante se paragonato ai notevoli miglioramenti ottenuti in tutte le altre performance.

Come per la quinta configurazione la riduzione della Pipeline comporta un riduzione del Gross Throughput Time del 20% grazie alla capacità del bilanciamento dei carichi di lavoro di mantenere l'Output su livelli elevati. La limitazione invece avrebbe un output molto simile a quello ottenuto dalla norma 5000 della quarta configurazione, comportando una perdita intorno all' 1 % di produttività, valore decisamente elevato se confrontato con i valori ottenuti dal bilanciamento.

I ritardi percentuali vengono ridotti in maniera decisamente elevata se si considera che questa particolare configurazione risente dei ricircoli e di un coefficiente K che come visto in precedenza era particolarmente stretto e lasciava poco spazio al bilanciamento, a conferma della bontà dei risultati ottenuti.

7.3.3 La settima configurazione analizzata.

Per la settima configurazione la Pipeline utilizzata è pari a 170000 minuti con bassa variabilità (tabella 8), mentre i coefficienti K sono:

- K = 17.5 ovvero come nel caso di Pipeline pari a 210000 minuti

- K = 16 ovvero con un riduzione delle Due Dates del 10 %

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

BILANCIAMENTO	170000 K16	170000 k17.5
% Ordini in ritardo	0.00%	0.00%
Output medio	14.67	14.74
Carico medio sistema	3529.35	3525.04
Caricamento medio del sistema	469.47	471.66
GTT medio [h]	139.82	139.24
SFT medio [h]	64.01	63.68
PSPT medio [h]	9.48	9.45
WIP	110.31	110.07

Figura 63 Performance bilanciamento Pipeline 170000 bassa variabilità

Si riporta inoltre il punto di funzionamento a norma 7000 individuato per la Limitazione Total Shop Load.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	7000
Ordini in ritardo %	0.93%
Output medio (Pz / ora)	14.58
Carico medio sistema (min)	6397.63
GTT medio [h]	175.63
SFT medio [h]	113.61
PSPT medio [h]	7.75
WIP (Pezzi)	199.95

Figura 64 Performance limitazione pipeline 210000 bassa variabilità

Confronto Bilanciamento - Limitazione K differenti		
Coefficiente K utilizzato	K = 16	K = 17.5
% Ordini in ritardo	-100.00%	-100.00%
Output medio	0.60%	1.09%
Carico medio sistema	-44.83%	-44.90%
GTT medio [h]	-20.39%	-20.72%
SFT medio [h]	-43.66%	-43.95%
PSPT medio [h]	22.23%	21.82%
WIP	-44.83%	-44.95%

Figura 65 Conftonto limitazione pipeline 210000 bassa variabilità – bilanciamento pipeline 170000 bassa variabilità

Per la settima configurazione, grazie ad una Preshop Pool molto più estesa della precedente, si vedono dei miglioramenti ancora maggiori che in precedenza. Il punto di funzionamento del sistema è stato individuato a norma 4000 con $K = 16$, il che comporta quindi una riduzione delle Due Dates del 10 %. Inoltre i risultati in termini di Output sono decisamente promettenti, si passa da un incremento dello 0.6% nel caso di $K = 16$ all' 1% addirittura nel caso di $K = 17.5$, il tutto con i ritardi percentuali praticamente nulli. Lo Shop Floor Time scende del 43 % il che comporta un notevole risparmio in termini di Work In Process necessario a garantire determinate performance.

La limitazione non garantisce le performance del bilanciamento con Pipeline 170000 minuti, neppure con una Pipeline più ampia. È ragionevole supporre che le performance della limitazione non potrebbero che deteriorare in termini di produttività riducendone la Pipeline, di conseguenza non sarebbe possibile applicare le stesse riduzioni mostrate.

7.3.4 L'ottava configurazione analizzata.

Per l'ottava configurazione la Pipeline utilizzata è pari a 170000 minuti con alta variabilità (tabella 6), mentre i coefficienti K sono:

- $K = 17.5$ ovvero come nel caso di Pipeline pari a 210000 minuti
- $K = 16$ ovvero con un riduzione delle Due Dates del 10 %

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

BILANCIAMENTO	PIPELINE 170000 K 16	PIPELINE 170000 K 17.5
Ordini in ritardo %	3.46%	2.76%
Output medio (Pz / ora)	14.67	14.68
Carico medio sistema (min)	3531.57	3529.97
GTT medio [h]	140.58	140.10
SFT medio [h]	64.15	64.27
PSPT medio [h]	9.55	9.48
WIP (Pezzi)	107.96	108.07

Figura 66 Performance bilanciamento Pipeline 170000 alta variabilità

Come per le precedenti configurazioni si riporta il punto di funzionamento ottenuto per la limitazione Total Shop Load.

LIMITAZIONE TOTAL SHOP LOAD	10000
Ordini in ritardo %	19.29%
Output medio (Pz / ora)	14.60
Carico medio sistema (min)	8470.12
GTT medio [h]	175.55
SFT medio [h]	164.09
PSPT medio [h]	1.43
WIP (Pezzi)	285.61

Figura 67 Performance limitazione Pipeline 210000 alta variabilità

Il punto di funzionamento individuato per il bilanciamento è relativo alla norma 4000 con coefficiente $K = 16$, in quanto garantisce una riduzione delle Due Dates del 10% mantenendo praticamente lo stesso Output dell'altra configurazione provata.

I miglioramenti percentuali vengono mostrati nella prossima tabella:

CONFRONTO BILANCIAMENTO - LIMITAZIONE		
Coefficiente K utilizzato	K = 17.5	K = 16
Ordini in ritardo %	-85.69%	-82.06%
Output medio (Pz / ora)	0.53%	0.50%
Carico medio sistema (min)	-58.32%	-58.31%
GTT medio [h]	-20.19%	-19.92%
SFT medio [h]	-60.83%	-60.91%
PSPT medio [h]	561.45%	566.66%
WIP (Pezzi)	-62.16%	-62.20%

Figura 68 Confronto limitazione pipeline 210000 alta variabilità – bilanciamento pipeline 170000 alta variabilità

Coerentemente con le precedenti configurazioni, il Gross Throughput Time scende del 20%, mentre lo Shop Floor Time scende del 60 %. I ritardi percentuali subiscono una drastica riduzione mentre l'Output aumenta dello 0.5 %.

L'utilizzo di un coefficiente $K = 16$ come mostrato in precedenza consente inoltre una riduzione ulteriore delle Due Dates a vantaggio del cliente finale.

7.3.5 La terza domanda di ricerca: analisi dei risultati ottenuti.

Dalle ultime quattro configurazioni analizzate emerge uno dei notevoli vantaggi del bilanciamento dei carichi di lavoro, ovvero la capacità di performare in maniera decisamente superiore alla limitazione nel caso in cui avvenga una riduzione di Pipeline a parità o con una riduzione inferiore delle Due Dates. E' un'ipotesi realistica infatti pensare che il gestore del sistema produttivo, utilizzando un modello di bilanciamento non ritenga necessario lavorare con Pipeline molto estese.

E' possibile infatti ridurre la Pipeline e garantire comunque al modello di bilanciamento un numero di job sufficiente tra cui scegliere per bilanciare. Le Due Dates possono rimanere uguali o avere una riduzione percentualmente inferiore rispetto alla riduzione della Pipeline, il che è possibile dato che il cliente, che prima commissionava ordini con certe scadenze, rimarrebbe comunque soddisfatto di una riduzione delle Due Dates non essendo interessato a conoscere il carico in Pipeline con cui lavora il sistema produttivo.

Tramite la semplice limitazione dei carichi di lavoro come è facilmente intuibile tutto ciò non può accadere in quanto l'algoritmo di limitazione non migliora o peggiora le performance in termini di Output con aumenti o decrementi omogenei delle Due Dates dei job.

Al contrario il bilanciamento dei carichi di lavoro avendo maggiore spazio per poter rilasciare i propri job può ottenere delle performance uguali o addirittura superiori rispetto al bilanciamento dei carichi con Pipeline molto ampia.

Con le quattro configurazioni analizzate si è mostrato come sia possibile ottenere performance eccellenti come l'azzeramento dei ritardi percentuali e la riduzione del 20% del Gross Throughput Time agendo sulla Pipeline senza modificare le Due Dates. Tali miglioramenti derivano dalla notevole robustezza del bilanciamento dei carichi di lavoro che ha mostrato anche in questo ambito una delle sue caratteristiche principali: riuscire ad ottenere performance molto superiori alla limitazione avendo a disposizione un set di job abbastanza esteso tra cui scegliere.

Rispondendo alla terza domanda di ricerca: Le soluzioni trovate nelle prime due domande di ricerca sono sufficientemente robuste da garantire performance in termini di Output molto simili anche con riduzioni importanti della Pipeline. Riducendo contestualmente le Due Dates si riesce comunque ad ottenere performance di livello, a patto di mantenere la riduzione entro una certa soglia. In particolare agendo in tale maniera si riesce a ridurre i ritardi a zero in alcune configurazioni, abbassando lo Shop Floor Time fino al 60% e riducendo il Gross Throughput Time del 20%, il tutto a parità o con leggeri decrementi dell'Output.

Per riassumere i principali miglioramenti ottenuti per l'ultima domanda di ricerca vengono ora mostrate tre tabelle contenenti le riduzioni percentuali ottenute dal bilanciamento sperimentato rispetto ai punti di funzionamento individuati per la Limitazione Total Shop nelle precedenti domande di tesi.

Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Gross Throughput Time		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	19.62%	20.39%
Alta variabilità	19.62%	20.19%
Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Shop Floor Time		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	32.40%	43.66%
Alta variabilità	32.67%	60.83%
Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Ritardi %		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	99.25%	100.00%
Alta variabilità	65.06%	85.69%

Figura 69 I miglioramenti percentuali ottenuti per la terza domanda di ricerca

Capitolo 8: Conclusioni

8 Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto è stato utile per analizzare le performance di due differenti politiche di ORR, il bilanciamento dei carichi di lavoro e la limitazione total shop load, in un contesto di applicazione particolare come quello dei Two Stage Assembly Systems. In particolare la tesi quantifica i miglioramenti ottenibili tramite l'impiego di una tecnica di rilascio orientata al bilanciamento dei carichi; ne dimostra inoltre la robustezza alla variazione del livello di variabilità (e cioè complessità interna) e della dimensione della pipeline.

Gli ottimi risultati presentati sono molto importanti in quanto le simulazioni sono state rivolte allo studio di un sistema produttivo poco analizzato in letteratura. La possibilità di avere delle risposte concrete in merito alle performance di due tecniche di Workload Control in un sistema così frequente nel contesto di riferimento eppure così poco analizzato da questo punto di vista, garantisce ampi spazi per il miglioramento e la ricerca e fornisce soprattutto delle linee guida molto chiare per coloro che nella realtà si trovano a dover gestire sistemi simili.

Cercando di fornire dei possibili spunti, nella parte finale della ricerca sono state mostrate le potenzialità derivanti dalla maggiore robustezza del modello di bilanciamento dei carichi di lavoro per le aziende che lo implementano, analizzando come sia possibile ridurre la Pipeline ottenendo performance simili in termini di Output e decisamente migliori in termini di ritardi percentuali e Gross Throughput Time.

Vengono presentate ora le conclusioni derivanti dalla sperimentazione per le tre domande di tesi.

8.1 Domanda 1: Conclusioni.

Domanda 1:

Come impatta la variabilità di sistema, in particolare di routing, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Si riportano, per chiarezza, le domande precedentemente aperte, alle quali verrà in questo capitolo data una risposta:

1. *quale logica di rilascio permette di realizzare un maggiore output e dunque un minore tempo di attraversamento del sistema (Gross Throughput Time)?*
2. *Quale logica di rilascio permette di ridurre la percentuale di ordini consegnati in ritardo? È possibile osservare una contemporanea riduzione dell'entità del ritardo medio?*
3. *Quale logica di rilascio permette di ridurre sostanzialmente il Work-In-Process del sistema produttivo, con i benefici effetti collegati a questa riduzione?*

Si può concludere che il bilanciamento dei carichi sia la logica di rilascio che permette di realizzare le migliori prestazioni sia in termini di Output medio del sistema, sia di Gross Throughput Time, sia di percentuale di ordini consegnati in ritardo, sia di Work In Process.

Dalle analisi effettuate traspare inoltre una delle caratteristiche fondamentali del bilanciamento dei carichi di lavoro: la forte riduzione di Work In Process ottenuta tra i punti di funzionamento individuati. Questo è particolarmente vero per prime configurazioni analizzate con Pipeline estesa. In queste configurazioni le riduzioni in termini di Shop Floor Time sono comprese tra il 28% e il 40%. Tutto ciò è dovuto alla maggiore robustezza del bilanciamento rispetto all'aumento di variabilità presente nel sistema produttivo. La limitazione del carico di lavoro mostra notevoli difficoltà a garantire prestazioni paragonabili e per alti livelli di variabilità necessita di molto carico nel sistema per riuscirci.

Questa superiorità comporta dei vantaggi per i gestori del sistema produttivo, che diventa più snello o Lean, grazie al livellamento dei carichi ottenuto. Il minor impatto del WIP garantisce un grande risparmio e maggiore flessibilità ai cambiamenti dell'ultimo minuto. Ulteriori vantaggi derivanti dalle possibilità offerte da una Preshop Pool più estesa e da uno Shop Floor meno carico verranno mostrate nella terza domanda di ricerca. I risultati sono ancora più ancora più apprezzabili se si considera il sistema produttivo su cui sono stati provati e la complessità intrinseca che esso comporta. Un sistema con tre linee di fabbricazione parallele e una di assemblaggio, con l'alto livello di variabilità modellizzato rappresenta una grossa sfida per coloro che tutti i giorni devono prendere decisioni in un contesto reale. Utilizzare uno strumento potente come il bilanciamento dei flussi non può che essere un notevole aiuto.

I grossi vantaggi individuati si riducono utilizzando una Pipeline meno estesa dove le ridotte dimensioni della Preshop Pool non consentono al modello di bilanciamento una selezione sufficiente per livellare i carichi tra le varie stazioni. Le performance del bilanciamento dei carichi rimangono comunque superiori alla limitazione anche a Pipeline ridotta mostrando miglioramenti

anche se inferiori rispetto alle performance ottenute con Pipeline più estesa per quanto riguarda l'Output, il Gross Throughput Time, i ritardi percentuali e la riduzione di Shop Floor Time. È da chiarire come l'utilizzo di una Pipeline poco estesa sia sconsigliabile a prescindere dal metodo di rilascio utilizzato in quanto le prestazioni in termini di Output sono inferiori del 1-2% e di conseguenza la perdita in termini di produttività non è tollerabile.

Le configurazioni esaminate presentano un'altra caratteristica, che solo parzialmente traspare dal capitolo dell'analisi dei risultati: il bilanciamento soffre in presenza di due date serrate, cosa che invece non disturba la limitazione del carico. Ancora una volta è necessario precisare una caratteristica del bilanciamento, per capire le ragioni di questo comportamento: come si ricorderà dalla formulazione del modello di bilanciamento, esiste un vincolo che forza il rilascio degli ordini che hanno raggiunto il giorno di rilascio "al più tardi". Il giorno di rilascio al più tardi è dato dalla differenza fra la data di consegna ed il giorno attuale, tenuto conto del tempo di attraversamento previsto per il sistema produttivo. In pratica se il tempo di attraversamento previsto è pari a 4 giorni, l'ordine deve essere rilasciato forzatamente quando mancano 5 giorni alla data di consegna prevista, affinché esso non sia consegnato in ritardo. È immediatamente chiaro che il rilascio forzato degli ordini sottrae capacità di bilanciamento all'algoritmo, che non può così scegliere fra la vera totalità di ordini presenti in Pre Shop Pool. Accade così che se le due date sono troppo serrate, il bilanciamento si trova a dover rilasciare forzatamente un alto numero di ordini, i quali hanno raggiunto la data di rilascio al più tardi, sia in presenza di una norma alta alla quale è naturalmente associato un tempo di attraversamento atteso elevato, sia a norma bassa nel caso in cui il sistema soffra da eccessive dimensioni della Pre Shop Pool.

Questa particolare caratteristica ha portato ad individuare un trade off nelle prestazioni del bilanciamento di carico: agendo sul tempo di attraversamento atteso (che è una leva a disposizione del production manager il quale imposta i valori che desidera nell'algoritmo) è possibile migliorare l'output realizzato a discapito della puntualità, ovvero ridurre la percentuale di ordini consegnati in ritardo a discapito dell'output. Impostando un tempo di attraversamento atteso più basso si lascia maggiore spazio all'algoritmo per bilanciare i carichi, realizzando così un output superiore; al contrario un tempo di attraversamento atteso più alto porta il sistema ad essere più orientato alla riduzione degli ordini consegnati in ritardo, a discapito della saturazione delle stazioni e dunque dell'output. È doveroso precisare che, qualunque sia la scelta di trade off, il bilanciamento consente in tutti i casi di ridurre il livello di Work In Process.

8.2 Domanda 2: Conclusioni

Domanda 2:

Come impatta la dimensione della Pipeline, che corrisponde ad una variazione del Work-In-Process totale dell'intero sistema, sulle prestazioni di rilascio dei due modelli di bilanciamento e di limitazione?

Il bilanciamento dei carichi di lavoro si è mostrato maggiormente robusto rispetto alla limitazione dei carichi di lavoro continuando ad ottenere performance superiori al diminuire del carico di sistema o Pipeline considerato. Questo comporta l'universalità delle soluzioni trovate per la prima domanda di ricerca. È possibile infatti pensare di applicare il bilanciamento dei carichi di lavoro su una grande eterogeneità di sistemi produttivi essendo maggiormente robusto rispetto alla limitazione dei carichi.

In particolare si è notato come le migliori performance della limitazione siano il lower bound delle migliori performance del bilanciamento. Questo significa che per particolari configurazioni dove la Pipeline è poco estesa e la variabilità è alta le prestazioni delle due tecniche di ORR sono molto simili dal punto di vista dell'Output ma il bilanciamento rimane comunque leggermente migliore garantendo comunque una riduzione di Shop Floor Time almeno del 12%.

Il fenomeno è dovuto alla carenza di job in Preshop Pool tra cui il bilanciamento può scegliere per determinare il rilascio giornaliero. In presenza di pochi job il bilanciamento rilascia in maniera molto simile alla limitazione, non avendo possibilità di scelta e questo comporta un livellamento delle performance tra i due sistemi di rilascio.

Aumentando la Pipeline aumenta anche la Preshop Pool e le differenze percentuali si ingrandiscono a favore del bilanciamento.

In conclusione si può affermare che le soluzioni individuate per la prima domanda di ricerca sono sufficientemente robuste da garantire che il bilanciamento dei carichi di lavoro non potrà mai avere delle performance in termini di Output inferiori alla limitazione Total Shop Load. Questo deriva dalla capacità di selezionare i job in maniera da creare dei carichi di lavoro livellati ed uniformi tra le varie stazioni. Se viene a mancare la Preshop Pool il bilanciamento si comporta come la limitazione Total Shop Load, ottenendo le stesse performance.

8.3 Domanda 3: Conclusioni

Domanda 3:

La robustezza delle soluzioni trovate per la seconda domanda consente il mantenimento di livelli di Output elevati diminuendo la Pipeline?

Essa si declina nelle seguenti domande:

- 1- È possibile per le soluzioni individuate andare a ridurre la Pipeline utilizzata ed ottenere performance molto simili dal punto di vista dell'Output riducendo contestualmente i ritardi?*
- 2- Le soluzioni trovate sono robuste rispetto ad una riduzione delle Due Dates, oltre che della Pipeline?*

Le conclusioni derivanti da questa terza ed ultima domanda di ricerca sono decisamente incoraggianti: è infatti possibile pensare di ridurre la propria Pipeline riducendo contestualmente le Due Dates e mantenere livelli di Output elevati. Tale riduzione comporta una riduzione molto ingente del Gross Throughput Time e dei ritardi.

Questa ultima sperimentazione mostra delle possibili linee guida per i gestori dei sistemi produttivi: è infatti possibile utilizzando un modello di bilanciamento dei carichi di lavoro ridurre la Pipeline a beneficio di una maggiore flessibilità a livello di sistema, di una maggiore semplicità gestionale e minori costi sia a livello informativo che a livello di personale, di prodotti con cambi di specifiche dell'ultimo secondo. Si ottiene in questo modo un sistema produttivo più snello o Lean dove il livellamento dei carichi di lavoro garantisce l'ottenimento di performance elevate.

Questa ultima domanda di ricerca è motivata dalla seguente assunzione: il mantenimento di un numero più limitato di ordini, a parità di due date, consente al sistema di non essere costretto ad inseguire gli ordini in ritardo che hanno atteso troppo a lungo in Pre Shop Pool, potendo così realizzare migliori prestazioni grazie ad un miglior funzionamento dell'algoritmo di bilanciamento. I benefici derivanti da questa scelta consistono nella possibilità di garantire al cliente non solo lo stesso output medio, ma anche tempi di consegna ridotti e dunque l'assegnazione di due date più basse di quelle originariamente proposte, il tutto mantenendo la percentuale di ordini consegnati in ritardo entro limiti più che accettabili, oltre che significativamente inferiore alla percentuale di ritardi realizzati dalla limitazione. È necessario precisare che la limitazione non avrebbe alcun

vantaggio da un ridimensionamento della pipeline, soprattutto in quanto essa realizza le migliori prestazioni con un alto livello di norma; se la pipeline viene ridotta la limitazione non è più in grado di caricare adeguatamente le stazioni di lavoro, causando così un deterioramento della prestazione di output.

Si riportano come conclusione finale le tabelle contenenti le riduzioni percentuali ottenute mediante questa terza e ultima domanda di ricerca dal bilanciamento nei confronti dei migliori punti di funzionamento individuati per la limitazione total shop load.

Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Gross Throughput Time		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	19.62%	20.39%
Alta variabilità	19.62%	20.19%
Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Shop Floor Time		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	32.40%	43.66%
Alta variabilità	32.67%	60.83%
Riduzioni % Bilanciamento - Miglior Punto Limitazione per Ritardi %		
Pipeline	105000	170000
Bassa variabilità	99.25%	100.00%
Alta variabilità	65.06%	85.69%

Figura 70 I miglioramenti percentuali ottenuti dal bilanciamento dei carichi di lavoro.

8.4 Sviluppi futuri.

Gli sviluppi futuri per questo lavoro di tesi sono molti in quanto poco è stato fatto fino ad ora nel campo dei Two Stage Assembly Systems utilizzando un'approccio WLC.

Come primo spunto è presente all'interno della sezione di analisi dei risultati il confronto tra la limitazione con EDD nel dispatching tra le varie stazioni contro il bilanciamento. Tale prova è stata fatta per il caso con Pipeline ridotta a 130000 minuti e bassa variabilità. Sarebbe un importante sviluppo futuro comprendere ed analizzare se gli eccellenti risultati ottenuti dal bilanciamento contro la limitazione EDD per questa configurazione sono ripetibili anche in configurazioni caratterizzate da variabilità più elevata. Sarebbe inoltre interessante valutare la robustezza delle soluzioni trovate all'aumentare della Pipeline.

Come secondo spunto sarebbe interessante confrontare il bilanciamento dei carichi di lavoro con altre modalità di limitazione presenti in letteratura, sicuramente più costose della limitazione Total Shop Load e del modello di bilanciamento sperimentato ma maggiormente performanti nel caso di General Flow Shop. Oosterman, et al., 2000 mostra come un rilascio dei carichi secondo la limitazione aggregata rimanente e non total shop load ottenga delle performance complessivamente migliori. Definire una campagna di simulazioni per confrontare il bilanciamento con la limitazione aggregata rimanente sarebbe molto utile per la ricerca.

Altri sviluppi futuri possono considerare l'impatto della determinazione delle Due Dates sulle performance dei modelli di ORR. È stato mostrato nel corso della tesi come Due Dates strette rendano molto difficoltoso il bilanciamento dei carichi di lavoro, obbligando il modello ad un gran numero di rilasci per via degli istanti al più tardi. Sarebbe interessante capire e cercare di schematizzare l'impatto della variazione delle Due Dates sulle performance ottenute.

Sarebbe inoltre utile analizzare le performance di un sistema che abbia più di due stadi, in modo da poter descrivere meglio quello che nella realtà sono le Supply Chain.

Appendice: L'Infrastruttura della simulazione

In questa Appendice viene mostrato il funzionamento dell'infrastruttura della simulazione necessaria allo svolgimento del lavoro di tesi. In particolare verranno approfonditi il funzionamento del foglio di lavoro di Excel per la gestione della Preshop Pool, del file di Arena 13.0 per la simulazione dello Shop Floor e di ILOG CPLEX per il modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.

Appendice. L'infrastruttura della simulazione

1 Appendice : L'infrastruttura della simulazione

Per lo svolgimento del nostro lavoro di tesi è stato necessario lavorare con tre programmi differenti:

- 1- Microsoft Office Excel 2007
- 2- Arena 13.0 della Rockwell Software
- 3- Ilog Cplex 5.2 di IBM

Il primo si occupa essenzialmente di gestire i database degli ordini presenti in Preshop Pool aggiornandoli a seconda degli ordini giunti a sistema tramite Order Entry e rilasciati mediante gli algoritmi di limitazione EDD o di bilanciamento dei carichi di lavoro.

Il secondo si occupa di simulare il funzionamento dello shop floor. In particolare Arena si interfaccia direttamente con il foglio di lavoro “ Definitivo_limitazione.xlsx ” o “ Definitivo_bilancia.xlsx” da cui raccoglie tutte le informazioni necessarie:

- 1- Il numero di job entranti nel sistema produttivo nella giornata odierna
- 2- I tempi di lavorazione sulle varie macchine per ogni singolo job
- 3- I tempi di lavorazione effettivi sulle varie macchine per ogni singolo job
- 4- Gli eventuali ricircoli che i job devono effettuare
- 5- Le Due Date dei job
- 6- Altri dati relativi alla Preshop Pool che poi salverà in un file di storico in modo da facilitare le analisi finali

Terminate le simulazioni Arena restituisce tre file txt necessari alla creazione del file di storico. I tre file sono:

- 1- Dati mattina.txt
- 2- Dati sera.txt
- 3- Storico ordini.txt

I tre file vengono poi importati nel foglio Excel “Storico.xlsx” contenente le formule predisposte all'analisi dei dati.

Ilog Cplex invece è un risolutore di programmazione lineare mista intera ed è stato utilizzato per il modello di bilanciamento dei carichi di lavoro. Tale programma si interfaccia direttamente con Excel in lettura e scrittura. Da esso raccoglie i seguenti dati necessari alla risoluzione del modello di bilanciamento:

- 1- Tempi di lavorazione di ogni singolo job
- 2- Due Date
- 3- Istante di rilascio al più tardi

Una volta terminata la risoluzione il programma stampa la soluzione in termini di job da rilasciare nel foglio di lavoro "Outputcplex.xls" opportunamente collegato a "Definitivo_bilancia.xlsm" . Tale accorgimento si è rivelato necessario dal momento in cui Cplex non ha la facoltà di scrivere su file Excel già aperti. Per questo motivo il foglio "Definitivo_bilancia.xlsm" veniva salvato ad ogni iterazione e conteneva dei link sempre attivi che lo collegassero ad "Outputcplex.xls" anche se quest'ultimo era sempre chiuso durante tutta la durata delle simulazioni.

Una spiegazione di dettaglio circa il funzionamento di ogni singolo foglio verrà fornita nelle tre prossime sezioni dell'Appendice.

Appendice A.

L'infrastruttura della simulazione: Excel 2007.

In questa prima appendice viene mostrato il funzionamento del foglio di lavoro Excel. Scopo di questo file è quello di fungere da database contenente i dati necessari alla simulazione in Lingo e in Arena. Il foglio di Excel contiene tutti i dati relativi ai job come tempi di lavorazione, ricircoli, due date e imprevisti nei tempi di lavorazione. Inoltre sono presenti delle macro che consentono l'aggiornamento della Preshop Pool con l'avanzare dei giorni simulati

2 Il funzionamento del foglio di Excel “Definitivo.xls”

Il foglio di lavoro “Definitivo.xls” costituisce la base per la simulazione. In esso sono contenuti tutti i dati di input per il corretto funzionamento di Arena e Lingo. Il file contiene inoltre delle macro che si occupano di aggiornare la Preshop Pool, eliminando gli ordini già rilasciati ed aggiungendo gli ordini giunti a sistema in giornata.

Prima di entrare nel dettaglio del funzionamento dei singoli fogli di lavoro è opportuno definire quali siano i compiti svolti dal file.

- Mantenere in memoria i dati di lavorazione dei tempi standard di oltre 8000 ordini per tutte le venti macchine
- Mantenere in memoria le due date e tramite apposite celle aggiornarne il valore
- Mantenere in memoria i ricircoli che i job possono effettuare
- Aggiornare lo stato della Preshop Pool tramite apposite macro
- Rilasciare gli ordini secondo l’algoritmo di limitazione
- Aggiornare di giorno in giorno i dati di input per Arena e Lingo
- Nel caso del modello di bilanciamento fungere da collegamento tra l’output di Lingo e l’input di Arena
- Mantenere in memoria i tempi effettivi di lavorazione per ogni macchina e ogni job.

Per svolgere questi numerosi compiti il file si articola in oltre dieci fogli di lavoro, collegati tra loro da macro programmate nel linguaggio Visual Basic.

Si passa ora a una descrizione più accurata circa il funzionamento dei fogli di lavoro.

2.1 Il foglio di lavoro “tempistd” 1

Il foglio di lavoro “tempistd” consente l’archiviazione dei tempi di lavorazione di oltre 8000 ordini nelle venti stazioni. La creazione dei tempi di lavorazione avviene tramite estrazione di valori da una distribuzione casuale 2-Erlang con media pari a 32 minuti e un coefficiente di variazione di 0,7. L’ estrazione di valori da una distribuzione avviene mediante il software Minitab.

Sono presenti nelle prime tre righe delle celle che consentono il controllo della media e della deviazione standard dei dati creati da Minitab, in modo da essere sempre sicuri che i valori appartengano al range desiderato.

		79,7866714209613																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1				Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20
2			media	32,02	32,02	32,02	32,02	32,02	32,02	32,02	32,02	32,02	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016	32,016
3			devst	22,58	22,53	22,49	22,63	22,03	22,73	22,76	22,75	22,91	22,297	22,66	22,579	22,899	22,461	22,943	22,568	22,55	21,817	22,552	22,57
4																							
5	n ordine	n ordine																					
6	1	1		79,787	20,466	27,532	1,3841	78,293	18,656	78,638	25,389	32,172	42,986	19,668	34,379	42,359	26,777	17,718	26,749	40,288	13,868	17,184	79,614
7	2	2		110,89	19,221	19,958	56,913	42,939	27,612	29,88	12,384	61,29	13,189	8,4703	38,138	19,05	53,535	29,746	19,612	9,8305	7,3483	3,783	36,025
8	3	3		75,645	4,8356	43,249	46,831	41,378	11,57	9,8695	28,7	59,299	22,547	18,207	5,0002	6,6652	51,985	45,008	35,109	90,464	19,742	24,416	18,391
9	4	4		60,404	59,17	25,04	6,2451	28,565	79,346	28,594	47,364	69,874	28,98	46,512	11,175	48,025	46,957	15,126	14,191	17,648	10,219	24,562	28,425
10	5	5		84,237	98,266	73,472	28,477	37,2	47,839	42,317	16,791	8,2372	10,597	74,434	63,882	26,724	22,85	11,648	15,765	9,7329	52,086	65,467	14,168
11	6	6		23,03	33,1	51,616	4,5315	15,78	15,539	24,255	34,422	25,203	57,1	44,798	27,871	34,886	18,941	65,014	28,048	14,028	57,252	30,383	27,362
12	7	7		64,316	25,438	28,277	29,511	20,028	115,57	64,817	27,003	58,859	47,981	44,197	24,571	38,577	1,4284	30,955	37,977	24,917	38,195	42,964	57,501
13	8	8		49,858	69,084	27,824	24,2	51,416	63,67	8,0653	3,4047	36,487	25,916	23,781	23,72	14,198	20,343	26,285	71,173	22,825	46,445	8,7981	74,723
14	9	9		97,67	40,935	39,68	18,465	32,753	25,21	18,074	47,599	62,424	26,173	9,4112	41,011	60,63	19,201	44,359	17,947	21,674	43,531	6,1308	10,341
15	10	10		45,759	17,908	16,748	28,42	6,1739	28,165	32,56	36,566	43,152	14,057	24,806	15,852	15,772	37,95	53,942	18,366	20,873	7,4268	2,2867	44,281
16	11	11		31,826	12,784	23,34	14,682	62,262	29,096	47,496	39,137	24,093	34,894	27,746	32,261	13,358	50,499	18,418	2,235	42,061	24,687	11,39	10,725
17	12	12		3,8499	23,378	43,25	9,7591	9,8429	57,937	7,8127	37,077	8,448	3,8269	40,874	67,589	17,906	12,856	43,209	33,706	26,439	4,0151	37,442	25,257
18	13	13		22,685	7,1499	35,786	24,288	41,196	22,194	20,836	28,437	27,52	70,841	16,355	99,059	41,314	65,435	9,9416	32,064	16,842	19,187	27,89	12,55
19	14	14		22,409	17,231	41,847	67,305	12,122	5,695	28,017	41,421	4,2272	33,409	50,321	47,35	16,002	43,794	23,94	12,52	22,572	18,749	32,072	60,411
20	15	15		45,436	61,221	52,005	90,049	62,201	26,176	42,773	85,541	65,963	6,0531	31,88	69,516	8,9747	91,363	20,257	18,514	50,404	32,184	17,262	29,505
21	16	16		7,076	12,817	72,223	67,948	55,549	29,96	71,436	41,959	15,721	17,773	22,132	24,94	49,678	59,993	23,197	35,852	6,545	41,59	15,81	8,318
22	17	17		43,782	55,09	34,512	22,527	16,226	20,537	26,892	38,744	42,353	7,6839	91,818	20,929	49,48	24,315	74,471	8,859	48,612	19,413	45,815	28,33
23	18	18		58,184	27,354	51,243	47,309	33,54	11,179	42,584	24,167	17,63	57,54	10,474	8,7925	17,353	79,439	13,9	28,847	8,8438	8,5084	12,651	19,927
24	19	19		8,6764	33,941	28,905	29,359	65,395	61,394	28,518	55,924	68,198	15,849	14,562	45,932	4,7153	1,4284	40,905	17,156	29,256	6,1346	13,301	33,332
25	20	20		22,16	7,6641	17,711	3,0119	13,826	2,0168	5,7138	61,89	8,6399	19,63	33,611	37,441	18,756	23,986	6,4773	18,988	66,518	28,953	18,554	2,5298
26	21	21		27,816	12,781	6,4147	12,869	8,9028	32,904	14,009	22,479	6,4957	35,722	45,189	15,466	39,443	4,0181	63,717	13,589	43,321	21,821	6,9404	47,253

Figura 1 Il foglio di lavoro tempistd

2.2 Il foglio di lavoro "Routing"

Il foglio di lavoro "Routing" contiene una serie di valori pari a uno oppure a zero a seconda che il job debba attraversare o meno una stazione nel suo ciclo produttivo. L'estrazione di valori casuali del routing è stata fatta attraverso la funzione CASUALE() di Excel, assegnando valore uno alle celle se il numero creato dalla funzione Casuale risulta compreso tra 0 e 0,8. Agendo in questo modo si riesce a ottenere un routing dell'80% dei job nelle varie stazioni. Vengono poi effettuati dei controlli per verificare che un routing dell'80% non vada a modificare la distribuzione 2-Erlang dei tempi produttivi di partenza.

Nella parte superiore del foglio è presente un controllo per ogni stazione per verificare che il routing sia effettivamente dell'80%. La formulazione necessaria al controllo è la seguente:

(Cella D1) =CONTA.SE(D6:D8123;">0")/MAX(\$B\$6:\$B\$8123)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	ISTRUZIONI			0,799	0,804	0,795	0,796	0,795	0,798	0,803	0,803	0,796	0,8017	0,802	0,8043	0,7926	0,8048	0,8018	0,7979	0,802	0,8049	0,8023	0,8004		
2																									
3				Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20		
4																									
5	n ordine	n ordine																							
6	1	1		1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		
7	2	2		1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1		
8	3	3		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0		
9	4	4		0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1		
10	5	5		1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
11	6	6		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	
12	7	7		1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1		
13	8	8		1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1		
14	9	9		1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	
15	10	10		1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	11	11		1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	
17	12	12		1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	
18	13	13		1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
19	14	14		1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	
20	15	15		0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
21	16	16		0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
22	17	17		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	
23	18	18		1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
24	19	19		1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
25	20	20		1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1		
26	21	21		0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
27	22	22		1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
28	23	23		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
29	24	24		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
30	25	25		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
31	26	26		0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	
32	27	27		1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
33	28	28		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	
34	29	29		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
35	30	30		1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	
36	31	31		1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	

Figura 2 Il foglio di lavoro Routing

2.3 Il foglio di lavoro “Annostd”

Il foglio di lavoro “Annostd” contiene contemporaneamente i due fogli appena presentati, riportando in un’unica tabella i tempi di lavorazione dei job nelle stazioni ed il relativo routing. La formulazione di ogni singola cella è la seguente:

$$(Cella D8) = tempistd!D6 * routing!D6$$

Per quanto riguarda la due date essa deriva dal contenuto di lavoro di ogni singolo job, moltiplicato per un coefficiente k. Queste Due Date calcolate nella colonna AE sono ottenute mediante la seguente formulazione:

$$(Cella AE8) = ARROTONDA.ECCESSO((SOMMA(D8:W8) * Dati_input!O3) / (60 * 8); 1)$$

Si effettua la somma del contenuto di lavoro di ogni singolo job e la si moltiplica per il coefficiente K contenuto ne foglio “Dati_Input”.

Successivamente alla Due Date calcolata in questo modo si somma nella colonna X il giorno di ingresso di ogni singolo job contenuto a sua volta nella colonna AD. Per quanto riguarda la scrittura

del giorno di ingresso del job il compito è affidato alla macro “dacopiare2” il cui funzionamento viene spiegato nella sezione relativa alle macro dell’Appendice di Excel.

La formulazione nella colonna X è la seguente:

(Cella X8) ==AE8+AD8

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1																											
2																											
3																											
4																											
5																											
6																											
7																											
8	1	1		79,79	20,47	27,53	1,384	0	18,66	78,64	25,39	32,17	42,986	19,668	34,379	42,359	26,777	17,718	26,749	40,288	13,868	0	79,6143	30	16	11,00	
9	2	2		110,9	0	0	56,91	42,94	27,61	29,88	12,38	61,29	0	8,4703	38,138	19,05	53,535	0	0	9,8305	0	3,783	36,0251	26	12	12,00	
10	3	3		75,65	4,836	43,25	46,83	41,38	11,57	9,87	0	59,3	22,547	18,207	0	0	51,985	45,008	35,109	90,464	0	0	0	0	26	12	12,00
11	4	4		0	59,17	0	6,245	28,57	79,35	28,59	47,36	69,87	0	46,512	11,175	48,025	46,957	0	14,191	17,648	0	24,562	28,4249	27	13	13,00	
12	5	5		84,24	98,27	73,47	28,48	37,2	0	0	16,79	0	0	0	63,882	26,724	22,85	11,648	15,765	9,7329	52,086	65,467	14,1681	27	13	13,00	
13	6	6		23,03	33,1	51,62	4,531	15,78	15,54	0	34,42	25,2	57,1	44,798	27,871	0	0	65,014	28,048	14,028	57,252	0	27,3618	28	14	14,00	
14	7	7		64,32	25,44	0	0	20,03	115,6	0	27	58,86	47,981	44,197	24,571	38,577	0	30,955	37,977	24,917	38,195	42,964	57,5014	28	14	14,00	
15	8	8		49,86	69,08	27,82	24,2	0	63,67	0	3,405	36,49	25,916	23,781	23,72	14,198	0	26,285	71,173	0	46,445	8,7981	74,7225	28	14	14,00	
16	9	9		97,67	40,94	39,68	0	32,75	0	18,07	47,6	62,42	26,173	9,4112	41,011	60,63	19,201	44,359	0	0	43,531	6,1308	0	0	27	13	13,00
17	10	10		45,76	0	16,75	28,42	6,174	28,16	32,56	36,57	43,15	14,057	0	0	15,772	37,95	53,942	18,366	20,873	7,4268	2,2867	44,2814	29	15	15,00	
18	11	11		31,83	0	23,34	0	62,26	29,1	0	39,14	24,09	34,894	0	32,261	0	50,499	18,418	2,235	42,061	0	11,39	0	25	11	11,00	
19	12	12		3,85	23,38	43,25	0	9,843	57,94	7,813	37,08	0	3,8269	40,874	67,589	17,906	12,856	0	0	26,439	0	37,442	25,2568	27	13	13,00	
20	13	13		22,69	0	35,79	24,29	0	0	20,84	28,44	27,52	70,841	16,355	0	41,314	65,435	0	32,064	16,842	19,187	27,89	12,55	27	13	13,00	
21	14	14		22,41	17,23	0	67,3	0	5,695	28,02	41,42	0	33,409	50,321	0	0	43,794	23,94	12,52	22,572	18,749	0	0	25	11	11,00	
22	15	15		0	61,22	52,01	0	0	26,18	42,77	85,54	65,96	6,0531	31,88	69,516	0	91,363	20,257	18,514	50,404	32,184	17,262	29,5053	28	14	14,00	
23	16	16		0	12,82	72,22	67,95	55,55	0	71,44	41,96	15,72	17,773	22,132	24,94	0	59,993	23,197	0	6,545	41,59	15,81	8,31796	28	14	14,00	
24	17	17		43,78	55,09	34,51	22,53	16,23	20,54	0	38,74	42,35	7,6839	91,818	20,929	49,48	24,315	74,471	0	48,612	19,413	0	0	28	14	14,00	
25	18	18		58,18	27,35	51,24	47,31	0	0	42,58	24,17	17,63	57,54	10,474	8,7925	17,353	79,439	13,9	28,847	8,8438	8,5084	12,651	19,927	30	16	16,00	
26	19	19		8,676	33,94	0	0	65,4	61,39	28,52	55,92	68,2	15,849	14,562	45,932	4,7153	1,4284	40,905	17,156	29,256	6,1346	13,301	33,3322	30	16	16,00	
27	20	20		22,16	7,664	17,71	3,012	0	2,017	5,714	61,89	8,64	19,63	33,611	37,441	0	0	6,4773	0	0	28,953	0	2,52984	26	12	12,00	
28	21	21		0	12,78	6,415	12,87	8,903	32,9	14,01	0	6,496	35,722	45,189	15,466	39,443	4,0181	63,717	13,589	43,321	21,821	0	0	28	14	14,00	
29	22	22		66,07	0	67,47	26,79	27,04	69,8	8,017	60	53,19	0	6,046	0	35,105	0	42,733	79,652	11,317	10,258	17,032	0	27	13	13,00	
30	23	23		34,63	35,21	27,52	7,334	43,82	40,28	56,3	30,4	43,38	54,589	60,011	28,638	12,322	0	97,983	42,694	12,603	18,987	42,925	24,7195	31	17	17,00	
31	24	24		32,75	24,95	13,32	87	11,72	67,03	47,41	43,53	46,04	3,919	42,815	10,542	18,23	3,4043	37,28	5,8842	20,535	33,539	25,75	22,0938	32	18	18,00	
32	25	25		15,45	20,71	38,53	10,74	41,95	54,86	30,13	31,6	24,6	25,633	97,442	0	39,088	30,974	19,089	3,1217	27,206	26,418	6,6436	0	30	16	16,00	

Figura 3 Il foglio di lavoro Annostd

2.4 Il foglio di lavoro “ Ricircoli”

In questo foglio di lavoro sono presenti i ricircoli che i job si trovano ad effettuare nel caso in cui nelle stazioni adibite al controllo qualità risultino difettosi. Il ricircolo viene determinato a priori anziché in Arena per semplicità modellistica e anche perché agendo in questa maniera è più semplice definire quali lavorazioni il job debba eseguire nuovamente. Le stazioni selezionate per il controllo qualità sono la numero 4 e la numero 19 che si trovano nella parte terminale della prima linea di fabbricazione e della linea di assemblaggio. Per l'estrazione dei valori dei ricircoli si è fatto ricorso alla stessa tecnica utilizzata per la determinazione del routing, per cui tramite la funzione CASUALE() si assegna un ricircolo nel momento in cui il valore è maggiore di 0,9. Una volta assegnato tale valore si deve decidere su quale stazione reindirizzare il job. Procedendo allo stesso

modo si suddivide l'intervallo di valori compresi tra 0,9 e 1 in tre intervalli differenti e si alloca il ricircolo verso una determinata stazione a seconda del valore assunto dalla funzione CASUALE().

Tutti questi calcoli non vengono effettuati in Definitivo.xls in quanto appesantirebbero inutilmente il file che causerebbe dei rallentamenti durante la simulazione. Tutti i valori sono calcolati in un altro foglio e poi sono incollati mediante la funzione incolla speciale nel file Definitivo.xls.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	ISTRUZIONI																								
2																									
3			Staz 4	Staz 9																					
4																									
5		n ordine	n ordine																						
6		1	1	0	0																				
7		2	2	0	0																				
8		3	3	0	8																				
9		4	4	0	0																				
10		5	5	0	0																				
11		6	6	0	0																				
12		7	7	0	0																				
13		8	8	0	0																				
14		9	9	0	0																				
15		10	10	0	0																				
16		11	11	0	0																				
17		12	12	0	0																				
18		13	13	0	0																				
19		14	14	0	0																				
20		15	15	0	0																				
21		16	16	0	0																				
22		17	17	0	0																				
23		18	18	0	0																				
24		19	19	0	0																				
25		20	20	0	0																				
26		21	21	0	0																				
27		22	22	0	0																				
28		23	23	0	0																				
29		24	24	0	0																				
30		25	25	0	0																				
31		26	26	0	6																				
32		27	27	0	0																				
33		28	28	0	0																				
34		29	29	0	0																				
35		30	30	0	0																				
36		31	31	0	8																				

Figura 4 Il foglio di lavoro Ricircoli

2.5 Il foglio di lavoro " Annoeff "

In questo foglio di lavoro sono presenti i tempi di lavorazione modificati secondo gli imprevisti creati nel sistema produttivo. La creazione degli imprevisti è ottenuta da differenti estrazioni di valori da distribuzioni Gamma con media e deviazione standard differenti. La procedura sarà spiegata meglio in seguito.

Il funzionamento del foglio di lavoro è molto simile ad " Annostd ", l'unica differenza consiste nel fatto che i dati di base non provengono dal foglio " Tempistd ".

Si riporta ora la formulazione del calcolo dei tempi effettivi:

(Cella C8) =Z8*routing!D6

Appendice A: Excel 2007

Di fianco alla parte di foglio presentata è presente una tabella contenente i tempi di lavorazione effettivi non considerando il routing.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	ISTRUZIONI																								
2																									
3																									
4																									
5																									
6	N.ordine	N.Ordine	Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20	DUE DATE		
7																									
8	1	1	79,22	17,91	27,4	14,2	0	20,1	70,74	22,81	32,93	49,374	23,028	29,422	41,512	32,065	21,731	26,248	51,489	14,441	0	75,451	650,08		
9	2	2	105,1	0	0	51,89	51,92	25,57	26,63	14,29	60,57	0	7,0801	30,671	21,993	63,553	0	0	9,5608	0	2,8731	35,456			
10	3	3	72,91	4,73	38,52	61,85	33,49	6,379	6,886	0	54,15	21,313	13,26	0	0	51,921	45,973	35,274	89,842	0	0	536,29			
11	4	4	0	51,55	0	2,416	25,31	90,81	37,64	53,71	66,44	0	50,186	22,05	52,543	46,69	0	16,578	20,565	0	19,011	26,216			
12	5	5	81,82	101,5	71,51	26,39	34,5	0	0	19,27	0	0	0	0	59,036	23,344	33,316	13,972	11,747	4,7184	52,484	74,396			
13	6	6	21,82	36,45	49,7	3,995	14,6	11,95	0	27,35	26,3	57,852	46,083	31,945	0	0	58,273	28,531	12,558	62,602	23,423				
14	7	7	68,75	24,93	0	0	29,39	11,9	0	30,77	65,25	57,414	43,104	26,977	37,022	0	35,035	28,869	20,964	37,769	44,982				
15	8	8	44,74	63,74	21,85	26,36	0	69,34	0	12,39	39,35	30,716	23,63	27,098	11,757	0	37,482	78,459	0	47,924	7,107				
16	9	9	81,62	34,65	37,84	0	32,23	0	14,7	44,32	60,68	28,04	10,886	37,95	55,767	17,897	45,405	0	0	45,47	2,427				
17	10	10	41,33	0	15,17	26,92	15,95	24,21	31,22	42,16	34,83	16,912	0	0	16,88	39,51	44,523	25,175	17,708	4,3589	14,691				
18	11	11	30,19	0	31,9	0	59,9	26,46	0	36,24	31,2	40,594	0	27,59	0	51,249	13,28	1,3985	45,828	0	9,7356				
19	12	12	7,347	20,91	37,78	0	5,208	68	8,528	32,25	0	3,2556	35,747	59,063	19,453	16,589	0	0	31,885	0	36,913				
20	13	13	21,14	0	31,41	22,77	0	0	24,73	25,31	26,64	77,953	22,671	0	44,477	82,047	0	38,922	19,148	21,082	30,291				
21	14	14	17,85	18,52	0	71,24	0	2,648	40,1	40,28	0	37,742	50,228	0	0	40,888	20,726	17,834	19,758	17,943					
22	15	15	0	58,21	46,39	0	0	27,35	44,34	80,37	52,36	1,4305	28,294	67,146	0	80,687	19,012	13,085	63,543	28,691					
23	16	16	0	8,841	76,53	70,13	59,19	0	64,75	42,34	14,58	15,096	18,723	22,405	0	50,963	20,125	0	14,055	39,18					
24	17	17	35,9	49,91	36,67	23,09	20,62	15,68	0	33,46	48,58	13,804	92,526	29,276	50,067	23,221	77,836	0	48,803	18,43					
25	18	18	52,54	20,87	59,87	41,87	0	0	41,85	29,02	17,47	61,899	13,791	13,305	12,895	69,195	12,163	25,343	13,39	6,0538					
26	19	19	2,885	24,91	0	0	59,09	53,09	32,67	61,36	69,92	15,487	21,026	41,677	18,411	5,789	41,479	13,241	25,516	13,921					
27	20	20	19,99	7,172	18,06	2,052	0	8,603	2,337	64,63	9,973	16,627	47,827	35,392	0	0	11,166	0	0	29,111					
28	21	21	0	8,363	6,399	10,51	8,01	26,91	16,44	0	12,81	28,559	36,726	9,5895	33,178	15,539	65,402	29,785	38,237	24,514					
29	22	22	66,98	0	67,34	27,93	24,31	70,88	18,38	59,4	70,61	0	8,6216	0	28,56	0	41,84	73,104	11,719	7,8694					
30	23	23	33,31	31,77	28,25	5,988	42,41	41	62,96	26,26	44,17	58,719	70,949	32,91	14,2	0	114,62	44,484	11,539	17,984					
31	24	24	19,39	20,14	12,18	80,56	6,888	72,48	38,94	43,2	40,84	10,993	38,667	6,5209	14,856	20,483	33,709	2,9848	18,537	29,148					
32	25	25	12,33	21,53	48,39	6,906	56,65	45,27	34,06	34,46	29,49	22,04	94,154	0	35,453	28,299	14,878	4,5636	33,979	23,005					
33	26	26	0	10,18	20,26	41,83	30,65	22,34	0	20,1	56,79	17,104	20,171	0	33,762	64,139	26,38	0	64,8	18,158					
34	27	27	3,915	30,12	16,91	0	19,26	0	0	6,067	8,142	11,487	0	0	12,647	29,854	11,764	33,08	19,641	28,091					
35	28	28	0	32,43	26,04	29,65	13,39	25,58	16	40,66	96,7	23,957	61,516	84,378	45,671	51,308	0	4,9025	44,135	40,316					
36	29	29	0	10,73	38,37	45,79	6,871	2,791	17,35	71,29	11,31	24,858	77,149	25,335	12,788	41,22	30,781	21,592	34,153	17,471					

Figura 5 Il foglio di lavoro annoeff

	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR
1																							
2																							
3																							
4																							
5	21	22																					
6	Staz 20	DUE DATE	Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19		
7																							
8	75,451	650,08	79,2218	17,9054	27,4032	14,2031	100,895	20,1008	70,7449	22,812	32,9324	49,3738	23,0276	29,4215	41,5117	32,0654	21,7305	26,2479	51,4894	14,441	18,9445		
9	35,456	507,16	105,091	20,7204	20,0229	51,8906	51,9244	25,5736	26,6258	14,2929	60,5728	10,072	7,08011	30,6705	21,9933	63,5526	27,7349	23,9162	9,56077	5,83115			
10	0	536,29	72,9087	4,72969	38,5182	61,846	33,4915	6,37924	6,88558	22,4706	54,1524	21,3128	13,2601	11,6221	8,14055	51,9214	45,9731	35,2739	89,8422	16,9195			
11	26,216	581,71	68,1456	51,5466	26,7471	2,41598	25,3069	90,8066	37,6446	53,706	66,4445	24,3604	50,1857	22,0501	52,5428	46,6905	18,0008	16,5784	20,5648	7,91759			
12	17,654	625,70	81,8231	101,532	71,515	26,3906	34,4978	58,2998	44,649	19,2746	5,22801	8,10382	96,0774	59,0361	23,3441	33,3156	13,9715	11,7473	4,7184	52,4841			
13	23,423	513,43	21,8166	36,4485	49,7023	3,99526	14,598	11,9492	25,4973	27,348	26,3044	57,852	46,0832	31,9455	32,8129	23,925	58,2731	28,5312	12,5577	62,6021			
14	60,349	730,60	68,7488	24,9286	26,5562	28,9395	29,3899	119,027	51,5259	30,7708	65,2455	57,4143	43,1037	26,9766	37,0217	16,3153	35,0352	28,8687	20,9639	37,7686			
15	88,507	630,45	44,7372	63,7423	21,8516	26,364	53,4374	69,3402	2,94816	12,3859	39,3451	30,7156	23,6297	27,0983	11,7569	19,8172	37,482	78,4592	28,0984	47,9238			
16	0	549,87	81,6177	34,6456	37,8393	24,1006	32,2307	32,8009	14,6955	44,3201	60,6789	28,0403	10,8856	37,9503	55,7674	17,8973	45,4048	19,0589	23,6425	45,4703			
17	45,976	457,52	41,3326	17,8072	15,1686	26,9205	15,9511	24,2074	31,2155	42,1576	34,8279	16,9118	25,0233	13,6988	16,8797	39,5102	44,5228	25,175	17,7083	4,35885			
18	0	405,56	30,1853	7,81936	31,8976	22,5893	59,8968	26,4595	37,4839	36,2384	31,2029	40,594	25,1914	27,5896	12,6146	51,2492	13,28	1,39846	45,8283	25,7767			
19	20,5	403,42	7,34668	20,905	37,7803	11,9041	5,20844	67,9964	8,52782	32,2514	3,54084	3,2556	35,7467	59,0626	19,4535	16,5893	41,605	32,3065	31,8848	13,6893			
20	11,808	500,40	21,1413	11,4166	31,4139	22,7678	56,6092	18,8325	24,7256	25,308	26,6427	77,9531	22,6711	97,7708	44,4766	82,0469	11,7567	38,9222	19,1477	21,0824			
21	0	395,76	17,854	18,518	33,515	71,2415	11,0025	2,6478	40,1004	40,2841	12,5119	37,7416	50,2284	44,2012	11,3769	40,8878	20,7262	17,834	19,7582	17,9427			
22	25,363	654,28	43,3567	58,2127	46,3897	94,9987	53,2244	27,3468	44,3374	80,3678	52,3598	1,43045	28,2942	67,1457	5,49763	60,6869	19,0116	13,0486	63,5429	28,6906			
23	4,9356	542,61	6,05882	8,84143	76,5304	70,1342																	

2.6 Il foglio di lavoro “ Ordini_al_giorno “

In questo foglio di lavoro vengono gestiti gli ordini entranti nel sistema ogni giorno, accettando quegli ordini che rientrano nel carico complessivo di sistema e rifiutando quelli che invece causano un superamento del limite imposto per il carico totale di sistema.

Ogni giorno si presentano trenta ordini nuovi, è compito del foglio di lavoro definire quali accettare e quali no in modo da non superare il carico di lavoro complessivo tra Preshop Pool e sistema produttivo.

Per prima cosa è necessario creare gli ordini nuovi in ingresso nel sistema ogni giorno mediante la seguente formulazione:

(Cella C84) =SE(\$A84<=C\$79;CERCA.VERT(\$A84+C\$80;annostd!\$A\$8:\$B\$8125;2;FALSO))

Tale formulazione è ripetuta per tutti e trenta gli ordini giornalieri e per duecentocinquanta giorni in totale.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
76														
77														
78	Giorno arrivo ordini	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
79	Numero ordini		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
80	Ordini Psp		291	321	351	381	411	441	471	501	531	561	591	621
81														
82	ORDINI													
83	Numero ordine													
84	1		292	322	352	382	412	442	472	502	532	562	592	622
85	2		293	323	353	383	413	443	473	503	533	563	593	623
86	3		294	324	354	384	414	444	474	504	534	564	594	624
87	4		295	325	355	385	415	445	475	505	535	565	595	625
88	5		296	326	356	386	416	446	476	506	536	566	596	626
89	6		297	327	357	387	417	447	477	507	537	567	597	627
90	7		298	328	358	388	418	448	478	508	538	568	598	628
91	8		299	329	359	389	419	449	479	509	539	569	599	629
92	9		300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600	630
93	10		301	331	361	391	421	451	481	511	541	571	601	631
94	11		302	332	362	392	422	452	482	512	542	572	602	632
95	12		303	333	363	393	423	453	483	513	543	573	603	633
96	13		304	334	364	394	424	454	484	514	544	574	604	634
97	14		305	335	365	395	425	455	485	515	545	575	605	635
98	15		306	336	366	396	426	456	486	516	546	576	606	636
99	16		307	337	367	397	427	457	487	517	547	577	607	637
100	17		308	338	368	398	428	458	488	518	548	578	608	638
101	18		309	339	369	399	429	459	489	519	549	579	609	639
102	19		310	340	370	400	430	460	490	520	550	580	610	640
103	20		311	341	371	401	431	461	491	521	551	581	611	641
104	21		312	342	372	402	432	462	492	522	552	582	612	642
105	22		313	343	373	403	433	463	493	523	553	583	613	643
106	23		314	344	374	404	434	464	494	524	554	584	614	644
107	24		315	345	375	405	435	465	495	525	555	585	615	645
108	25		316	346	376	406	436	466	496	526	556	586	616	646
109	26		317	347	377	407	437	467	497	527	557	587	617	647
110	27		318	348	378	408	438	468	498	528	558	588	618	648
111	28		319	349	379	409	439	469	499	529	559	589	619	649

Figura 7 Il foglio di lavoro Ordini al giorno, la parte relativa alla creazione degli ordini

Una volta generati gli ordini in ingresso giornalieri essi vengono riportati nella parte centrale del foglio dove vengono sommati i tempi di lavorazione di ogni job e viene fatta la verifica dell'ammontare del carico di lavoro complessivo.

Figura 8 Il foglio di lavoro Ordini al giorno, La parte che seleziona i job in base al carico

Gli ordini vengono riportati mediante la seguente formulazione:

(CellaC42)=CERCA.ORIZZ('Preshoppool
rilascio'!\$D\$1;Ordini_al_giorno!\$C\$78:\$IS\$113;6+Ordini_al_giorno!\$A84;FALSO)

Nelle celle contenenti i tempi di lavorazione agisce al seguente formula:

(CellaD42) =CERCA.VERT(\$C44;annostd!\$B\$8:\$X\$8125;Ordini_al_giorno!E\$2;FALSO)

Nella colonna Y avviene il calcolo dei tempi cumulati dei vari job i quali vengono selezionati finchè non si supera il carico complessivo di sistema. Nella colonna Z agisce la seguente formula per la selezione dei job:

(CellaZ42) =SE(Y44<=Dati_input!\$I\$7;1;0)

Infine i job selezionati vengono immessi in una tabella apposita da cui poi i fogli successivi vanno ad attingere i dati relativi ai job in ingresso.

Gli ordini vengono riportati a partire dalla Cella C9 mediante la seguente formulazione:

(CellaC9) =SE(\$Z44=1;\$C44;FALSO)

	A	B	C	D	E	F	G	H	R	S	T	U	V
1													
2	Giorno arrivo ordini	0	1	2	3	4	5	6	16	17	18	19	20
3	Numero ordini		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
4	Ordini Psp		291	321	351	381	411	441	741	771	801	831	861
5	Carico da rilasciare a sistema	274698,15											
7	ORDINI												
8	Numero ordine												
9	1		292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292
10	2		293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293
11	3		294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
12	4		295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295
13	5		296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296
14	6		297	297	297	297	297	297	297	297	297	297	297
15	7		298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
16	8		299	299	299	299	299	299	299	299	299	299	299
17	9		300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
18	10		301	301	301	301	301	301	301	301	301	301	301
19	11		302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302
20	12		303	303	303	303	303	303	303	303	303	303	303
21	13		304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304
22	14		305	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
23	15		306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306
24	16		307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307
25	17		308	308	308	308	308	308	308	308	308	308	308
26	18		309	309	309	309	309	309	309	309	309	309	309
27	19		310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
28	20		311	311	311	311	311	311	311	311	311	311	311
29	21		312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312
30	22		313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313
31	23		314	314	314	314	314	314	314	314	314	314	314
32	24		315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
33	25		316	316	316	316	316	316	316	316	316	316	316
34	26		317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317
35	27		318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
36	28		319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319

Figura 9 Il foglio di lavoro ordini al giorno, la parte di reportistica finale

2.7 Il foglio di lavoro “ Dati_input ”

In questo foglio di lavoro sono contenuti tutti i parametri del sistema su cui si va ad agire per modificare le simulazioni. E' da questo foglio che si agisce per modificare il carico complessivo di sistema inteso come carico in presente in Preshop Pool e sistema produttivo. Si specificano inoltre la norma complessiva e per stazione, il numero di stazioni, il numero di linee, il carico accettato in ingresso alla Preshop Pool, il Routing, il tempo di attraversamento del sistema produttivo, il numero di ordini presenti nella Preshop Pool nel primo giorno di simulazione, la Time Limit.

B12		fx 0,8												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		
1														
2	Numero h/gg	8	h/gg											
3	N Stazioni	20	staz					<i>Carico totale presente in PSP</i>	25551,39529					
4	N Stazioni per linea	5	staz					<i>Carico totale presente nel sistema produttivo</i>	0					
5	Capacità stazioni/gg	480	min/gg					<i>Carico totale rilasciato</i>	137249,54					
6	% Norma carico	150%												
7	Norma carico	7500	min/gg					<i>Carico ordini nuovi in Ingresso nel sistema</i>	137448,60					
8	Time limit	50	gg											
9	Nordini PSP iniziale	291	ord											
10	Capacità sistema / gg	9600	min/gg											
11	Max Carico di sistema	163000	min											
12	Routing	0,8												
13	Code	140400	Min code											
14	T ATT	13,51333	gg											
15	Più tardi- più presto	5	gg											
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														
35														
36														

Figura 10 Il foglio di lavoro Dati input

2.8 Il foglio di lavoro “ Preshoppool prima “

In questo foglio di lavoro è presente la Preshop Pool da cui l’algoritmo di limitazione o il modello di bilanciamento vanno a selezionare i job per il rilascio. L’intera Preshop Pool viene copiata da una macro che verrà descritta in seguito dal foglio Preshop Pool Dopo.

Nelle colonne di fianco alla Preshop Pool è presente un controllo del numero di job presenti, mentre nella Cella B3 viene misurato il contenuto di lavoro di tutti gli ordini.

(CellaB3) =SOMMA(C8:V65536)

	A	B	C	D	E	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
1														
2														
3	Carico totale presente in PSP	25551,39529												
4														
5														
6	Numero ordine	Nome ordine	Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 20	DUE DATE							
7									Controllo	Posizione ordine				
8	1	266	48,33291676	17,67152088	9,382780304	16,12846243	27		266	1				
9	2	267	46,54001832	66,22896648	0	42,40932806	26		534	2				
10	3	268	45,72164948	38,49198974	12,73442829	38,77960839	27		804	3				
11	4	270	27,27315396	7,511748908	59,51785853	27,08123174	30		1080	4				
12	5	271	56,11601585	84,13492788	0	0	25		1355	5				
13	6	272	0	37,02494341	5,017928191	13,12006889	26		1632	6				
14	7	273	38,47280003	32,63442366	25,08577811	0	28		1911	7				
15	8	274	36,10699445	54,34355531	76,77545535	0	25		2192	8				
16	9	275	22,40842171	16,85296592	42,23815205	23,26166361	27		2475	9				
17	10	276	0	30,26079208	69,80089115	7,5702114	28		2760	10				
18	11	277	40,7364735	19,29671569	15,07836946	4,55761062	25		3047	11				
19	12	278	83,57250547	67,77315944	0	13,81104586	24		3336	12				
20	13	279	16,46920459	53,47267039	0	5,034053177	29		3627	13				
21	14	280	21,63872649	13,32065308	33,58442553	19,80684427	29		3920	14				
22	15	281	11,50272426	88,58584686	32,58073483	54,73346732	26		4215	15				
23	16	282	31,63566446	11,6560421	58,13797718	25,62201961	26		4512	16				
24	17	284	86,3082971	10,58346468	0	16,03515943	28		4828	17				
25	18	285	50,14356368	24,63536095	15,47753947	38,08647647	29		5130	18				
26	19	286	0	27,31832608	0	65,8696032	26		5434	19				
27	20	287	24,46860057	30,32066774	35,26282905	31,32023136	27		5740	20				
28	21	288	30,36069136	16,2965747	49,12661361	70,38248169	25		6048	21				
29	22	289	14,92906288	39,07410048	30,86815241	42,31712966	29		6358	22				
30	23	290	30,78948481	18,19106913	0	28,85397422	29		6670	23				
31	24	291	0	18,98267533	23,00788177	78,8913855	25		6984	24				
32	25	292	2,269028702	33,68518183	17,40056251	12,87250748	28		7300	25				
33	26	293	53,3503189	46,85593701	0	3,816908757	30		7618	26				
34	27	294	87,05502121	7,90606008	49,07865419	30,70563366	28		7938	27				
35	28	295	37,5174109	14,13884289	21,54958495	48,27790141	28		8260	28				
36	29	296	65,50219494	32,6606476	21,49848126	16,01143346	30		8584	29				

Figura 11 Il foglio di lavoro Preshoppool prima

2.9 Il foglio di lavoro “ da copiare “

In questo foglio di lavoro viene svolto un ruolo fondamentale per il corretto funzionamento dell’algoritmo di limitazione. Per prima cosa gli ordini provenienti dal foglio Preshop Pool Prima vengono copiati mediante una macro nel foglio “da copiare“, successivamente si sviluppa un primo rilascio dei job ovvero vengono rilasciati job finchè non viene saturata una stazione.

Per il rilascio dei job si utilizzano le seguente formulazioni in serie:

- 1- Per prima cosa per ogni job e stazione a partire dalla Cella Y8 si utilizza :

$$(CellaY8) =SE(SOMMA(B\$8:B8)<=Y\$3;SOMMA(B\$8:B8);0)$$

Che restituisce la cumulata dei tempi di lavorazione finchè non viene superato il carico per stazione che è possibile allocare.

- 2- Successivamente viene assegnato un valore 1 nella colonna AU se l’ordine è stato assegnato. L’ordine viene assegnato se non causa il superamento del carico di lavoro in tutte le stazioni
- 3- La macro che verrà mostrata in seguito va a ricercare altri job che non causino il superamento del carico in tutte le stazioni.

	A	B	U	V	W	X	Y	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
3	Giorno	1					7500	7500	7500	7500	7500	7500	Carico da rilasciare	Carichi totali per stazione EDD	7426.1648
4					Capacità		7500	7500	7500	7500	7500	7500	150000	Carichi Parziali per stazione EDD	1382.0858
6	N ordine	Staz 1	Staz 20	DUE DATE	Posizione	Nome Ordine	Staz 1	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20	Carico cumulato	Ordini rilascio cumulato	422
8	266	48.33292	16.12846243	27	1	266	48.33292	56.62484	45.81024	39.60755	13.08795	16.12846	489.7786838	1	1
9	267	46.54002	42.40932806	26	2	267	94.87294	85.41427	64.34249	39.60755	45.01167	58.53779	920.3973693	1	1
10	268	45.72165	38.77960839	27	3	268	140.5946	133.1027	121.7723	39.60755	74.35582	97.3174	1388.310608	1	1
11	270	27.27315	27.08123174	30	4	270	167.8677	161.188	143.3027	75.22588	74.35582	124.3986	2033.45472	1	1
12	271	56.11602	0	25	5	271	223.9838	188.9036	143.3027	83.47379	142.1687	124.3986	2574.062135	1	1
13	272	0	13.12006869	26	6	272	223.9838	197.0434	147.4165	118.082	142.1687	137.5187	3035.931606	1	1
14	273	38.4728	0	28	7	273	262.4566	243.2834	147.4165	154.3614	174.1276	137.5187	3640.861845	1	1
15	274	36.10699	0	25	8	274	298.5635	269.0691	156.0846	162.1867	205.6036	137.5187	4053.661195	1	1
16	275	22.40842	23.26166361	27	9	275	320.972	290.016	168.3866	201.1644	210.7421	160.7804	4480.080727	1	1
17	276	0	7.5702114	28	10	276	320.972	321.9842	188.8416	246.5307	210.7421	168.3506	5109.660832	1	1
18	277	40.73647	4.55761062	25	11	277	361.7084	334.684	204.7135	246.5307	274.3911	172.9082	5504.385992	1	1
19	278	83.57251	13.81104586	24	12	278	445.2809	388.3282	204.7135	262.1245	307.3167	186.7192	6011.354762	1	1
20	279	16.4692	5.034053177	29	13	279	461.7502	388.3282	222.7986	273.1737	342.097	191.7533	6539.357618	1	1
21	280	21.63873	19.80684427	29	14	280	483.3889	458.6812	263.6794	311.2722	369.1752	211.5601	7112.258094	1	1
22	281	11.50272	54.73346732	26	15	281	494.8916	465.2392	274.9851	311.2722	382.5394	266.2936	7584.303567	1	1
23	282	31.63566	25.62201961	26	16	282	526.5273	484.1537	274.9851	311.2722	412.5203	291.9156	7973.8758	1	1
24	284	86.3083	16.03515943	28	17	284	612.8356	516.8123	302.9065	355.3756	421.1289	307.9508	8473.24982	1	1
25	285	50.14356	38.08647647	29	18	285	662.9791	548.3811	314.7432	421.9276	421.1289	346.0373	9153.652179	1	1
26	286	0	65.8696032	26	19	286	662.9791	601.4822	427.6208	484.8197	427.8154	411.9069	9692.195263	1	1
27	287	24.4686	31.32023136	27	20	287	687.4477	601.4822	438.0913	503.8872	444.7881	443.2271	10077.67385	1	1
28	288	30.36069	70.38248169	25	21	288	717.8084	680.8476	438.0913	564.444	487.1006	513.6096	10556.75876	1	1
29	289	14.92906	42.31712966	29	22	289	732.7375	721.0869	444.5264	587.6259	520.8342	555.9267	11077.65765	1	1
30	290	30.78948	28.85397422	29	23	290	763.527	763.214	467.1103	621.1289	571.5952	584.7807	11539.13989	1	1
31	291	0	78.8913855	25	24	291	763.527	827.1725	501.1151	621.1289	634.6033	663.6721	12084.02559	1	1
32	292	2.269029	12.87250748	28	25	292	765.796	862.2887	524.4736	647.3162	674.4535	676.5446	12497.7134	1	1
33	293	53.35032	3.816908757	30	26	293	819.1463	878.3484	558.77	668.9103	675.9535	680.3615	13047.49658	1	1
34	294	87.05502	30.70563366	28	27	294	906.2013	889.7231	605.1082	712.7152	736.7094	711.0671	13561.92327	1	1
35	295	37.51741	48.27790141	28	28	295	943.7187	889.7231	729.7147	712.7152	736.7094	759.345	14237.08611	1	1
36	296	65.50219	16.01143346	30	29	296	1009.221	889.7231	772.5145	724.5155	759.6634	775.3564	14870.19597	1	1

Figura 12 Il foglio da copiare

Per conoscere quanto carico è possibile allocare ad ogni stazione il procedimento è il seguente:

- 1- Lettura dei valori dei carichi per stazione derivanti da Arena. La scrittura avviene nelle Celle AU5:BN5
- 2- Poiché i valori scritti da Arena non vengono riconosciuti come numerici è necessario attivare la funzione VALORE(AU5) per ottenere valori numerici utilizzabili nelle formule seguenti
- 3- Si sottrae alla norma definita per ogni stazione nel foglio " Dati_input " il valore del carico medio derivante da Arena, ottenendo così il carico allocabile in ogni giornata per ogni stazione. (Cella Y3)

Appendice A: Excel 2007

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT
1					3	4	5	6	7	21	22						
2					Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 19	Staz 20						
3	7500	7500	Carico da rilasciare	Carichi totali per stazione EDD	7426,1648	7496,655	6798,986	7367,51	6252,828	6746,025	6526,163	137252,4		Valori del carico			
4	7500	7500	150000	Carichi Parziali per stazione EDD	1382,0858	1443,92	1182,847	796,0873	1196,461	1392,367	1305,57	25551,4		staz 1	staz 2	staz 3	staz 4
5				Carichi per stazione fine giornata										0	0	0	0
6	Staz 19	Staz 20	Carico cumulato	Ordini rilascio cumulato	422									0	0	0	0

Figura 13 Seconda parte del foglio da copiare

2.10 Il foglio di lavoro "Preshoppool rilascio"

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

	A	B	C	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	Nome Ordini candida Binario		Giorno	1	Posizione rilascio	Ordini rilasciati	Input Arena	Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14
2	1	1			1	1	1	79,22	17,91	27,40	14,20	0,00	20,10	70,74	22,81	32,93	49,37	23,03	29,42	41,51	32,07
3	2	1			2	1	1	105,09	0,00	0,00	51,89	51,92	25,57	26,63	14,29	60,57	0,00	7,08	30,67	21,99	63,55
4	3	1			3	1	1	72,91	4,73	38,52	61,65	33,49	6,38	6,69	0,00	54,15	21,31	13,26	0,00	0,00	51,92
5	4	1			4	1	1	0,00	51,55	0,00	2,42	25,31	90,81	37,64	53,71	66,44	0,00	50,19	22,05	52,54	46,68
6	5	1			5	1	1	81,82	24,93	0,00	26,39	34,50	0,00	0,00	19,27	0,00	0,00	0,00	59,04	23,34	33,32
7	6	1			6	1	1	21,82	36,45	49,70	4,00	14,60	11,95	0,00	27,35	26,30	57,85	46,08	31,95	0,00	0,00
8	7	1			7	1	1	68,75	24,93	0,00	0,00	29,39	####	0,00	30,77	65,25	57,41	43,10	26,98	37,02	0,00
9	8	1	In giallo dove devono andare le macro		8	1	1	44,74	63,74	21,85	26,36	0,00	69,34	0,00	12,39	39,35	30,72	23,63	27,10	11,76	0,00
10	9	1			9	1	1	81,62	34,65	37,84	0,00	32,23	0,00	14,70	44,32	60,68	28,04	10,89	37,95	55,77	17,90
11	10	1			10	1	1	41,33	0,00	15,17	26,92	15,95	24,21	31,22	42,16	34,83	16,91	0,00	0,00	16,88	39,51
12	11	1			11	1	1	30,19	0,00	31,90	0,00	59,90	26,46	0,00	36,24	31,20	40,59	0,00	27,59	0,00	51,25
13	12	1			12	1	1	7,35	20,91	37,78	0,00	5,21	68,00	8,53	32,25	0,00	3,26	35,75	59,06	19,45	16,58
14	13	1			13	1	1	21,14	0,00	31,41	22,77	0,00	0,00	24,73	25,31	26,84	77,95	22,67	0,00	44,48	82,05
15	14	1			14	1	1	17,85	18,52	0,00	71,24	0,00	2,65	40,10	40,28	0,00	37,74	50,23	0,00	0,00	40,88
16	15	1			15	1	1	0,00	58,21	46,39	0,00	0,00	27,35	44,34	80,37	52,36	1,43	28,29	67,15	0,00	80,68
17	16	1			16	1	1	0,00	8,84	76,53	70,13	59,19	0,00	64,75	42,34	14,58	15,10	18,72	22,41	0,00	50,96
18	17	1			17	1	1	35,90	49,91	36,67	23,09	20,62	15,68	0,00	33,46	48,58	13,80	92,53	29,28	50,07	23,22
19	18	1			18	1	1	52,54	20,87	59,87	41,87	0,00	0,00	41,65	29,02	17,47	61,90	13,79	13,30	12,89	69,20
20	19	1			19	1	1	2,89	24,91	0,00	0,00	59,09	53,09	32,67	61,38	69,92	15,49	21,03	41,68	18,41	5,79
21	20	1			20	1	1	19,99	7,17	18,06	2,05	0,00	8,60	2,34	64,63	9,97	16,63	47,83	35,39	0,00	0,00
22	21	1			21	1	1	0,00	8,36	6,40	10,51	8,01	26,91	16,44	0,00	12,81	26,56	36,73	9,59	33,18	15,54
23	22	1			22	1	1	66,98	0,00	67,34	27,93	24,31	70,88	18,38	59,40	70,61	0,00	8,62	0,00	28,56	0,00
24	23	1			23	1	1	33,31	31,77	28,25	5,99	42,41	41,00	62,96	26,26	44,17	58,72	70,95	32,91	14,20	0,00
25	24	1			24	1	1	19,39	20,14	12,18	80,56	6,89	72,48	38,94	43,20	40,84	10,99	38,67	6,52	14,86	20,48
26	25	1			25	1	1	12,33	21,53	48,39	6,91	56,65	45,27	34,06	34,46	29,49	22,04	94,15	0,00	35,45	28,30
27	26	1			26	1	1	0,00	10,18	20,26	41,83	30,65	22,34	0,00	20,10	56,79	17,10	20,17	0,00	33,76	64,14
28	27	1			27	1	1	3,92	30,12	16,91	0,00	19,26	0,00	0,00	6,07	8,14	11,49	0,00	0,00	12,65	29,65
29	28	1			28	1	1	0,00	32,43	26,04	29,65	13,39	25,58	16,00	40,66	96,70	23,96	61,52	84,38	45,67	51,31
30	29	1			29	1	1	0,00	10,73	38,37	45,79	6,87	2,79	17,35	71,29	11,31	24,86	77,15	25,34	12,79	41,22
31	30	1			30	1	1	10,37	24,83	0,00	7,89	18,02	0,00	0,00	8,43	32,46	13,05	55,42	54,59	12,44	10,72
32	31	1			31	1	1	35,77	32,72	30,23	55,04	13,24	1,97	59,84	37,04	0,00	0,00	48,74	25,27	0,00	34,43
33	32	1			32	1	1	60,54	26,75	16,68	0,00	9,29	17,68	0,00	9,48	41,55	48,22	11,97	29,06	93,58	0,00
34	33	1			33	1	1	57,12	45,27	31,94	8,88	35,54	36,35	18,15	43,91	69,57	17,89	95,49	21,68	0,00	12,05
35	34	1			34	1	1	35,98	31,07	0,00	26,80	15,63	0,00	0,00	48,17	30,14	30,46	62,43	8,75	0,00	0,00
36	35	1			35	1	1	0,00	18,99	16,78	96,02	0,00	0,00	0,00	36,97	16,11	34,46	4,83	0,00	22,54	0,00

Figura 14 Il foglio di lavoro Preshoppool rilascio

In questo foglio di lavoro vengono riportati mediante macro gli ordini rilasciati dall'algoritmo di limitazione o dal modello di bilanciamento. Riportati gli ordini è necessario attivare la macro elimina ripetizioni che si preoccupa di immettere nella colonna G gli ordini senza ripetizioni o Celle mancanti.

Nella colonna H vengono contati il numero di job rilasciati assegnando il valore 1 ad ogni job presente nella colonna G.

(CellaH2) =SE(G2>0;1;0)

Nelle celle verdi Arena legge i tempi di lavorazione e gli eventuali ricircoli che i job possono avere. La formulazione necessaria è la seguente:

(CellaI2) =CERCA.VERT(\$G2;annoeff!\$B\$8:\$W\$8125;annoeff!C\$5;FALSO)

I ricircoli invece vengono riportati nel seguente modo:

(CellaAG2) =CERCA.VERT(\$G2;ricircoli!\$B\$6:\$D\$8123;2;FALSO)

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20	Due date				Ricircoli	Staz4	Staz9		
2	22,81	32,93	49,37	23,03	29,42	41,51	32,07	21,73	26,25	51,49	14,44	0,00	75,45	30	tempi_processamento_produzione_A			0	0			
3	14,29	60,57	0,00	7,08	30,67	21,99	63,55	0,00	0,00	9,56	0,00	2,87	35,46	26				0	0			
4	0,00	54,15	21,31	13,26	0,00	0,00	51,92	45,97	35,27	89,84	0,00	0,00	0,00	26				0	8			
5	53,71	66,44	0,00	50,19	22,05	52,54	46,69	0,00	16,58	20,56	0,00	19,01	26,22	27				0	0			
6	19,27	0,00	0,00	0,00	59,04	23,34	33,32	13,97	11,75	4,72	52,48	74,40	17,65	27				0	0			
7	27,35	26,30	57,85	46,08	31,95	0,00	0,00	58,27	28,53	12,56	62,60	0,00	23,42	28				0	0			
8	30,77	65,25	57,41	43,10	26,98	37,02	0,00	35,04	28,87	20,96	37,77	44,98	60,35	28				0	0			
9	12,39	39,35	30,72	23,63	27,10	11,76	0,00	37,48	78,46	0,00	47,92	7,11	88,51	28				0	0			
10	44,32	60,68	28,04	10,89	37,95	55,77	17,90	45,40	0,00	0,00	45,47	2,43	0,00	27				0	0			
11	42,16	34,83	16,91	0,00	0,00	16,88	39,51	44,52	25,18	17,71	4,36	14,69	45,98	29				0	0			
12	36,24	31,20	40,59	0,00	27,59	0,00	51,25	13,28	1,40	45,83	0,00	9,74	0,00	25				0	0			
13	32,25	0,00	3,26	35,75	59,06	19,45	16,59	0,00	0,00	31,88	0,00	36,91	20,50	27				0	0			
14	25,31	26,64	77,95	22,67	0,00	44,48	62,05	0,00	38,92	19,15	21,08	30,29	11,61	27				0	0			
15	40,28	0,00	37,74	50,23	0,00	0,00	40,89	20,73	17,83	19,76	17,94	0,00	0,00	25				0	0			
16	80,37	52,36	1,43	28,29	67,15	0,00	80,69	19,01	13,08	63,54	28,69	18,02	25,36	28				0	0			
17	42,34	14,58	15,10	18,72	22,41	0,00	50,96	20,13	0,00	14,06	39,18	20,76	4,94	28				0	0			
18	33,46	48,58	13,80	92,53	29,28	50,07	23,22	77,84	0,00	48,80	18,43	0,00	0,00	28				0	0			
19	29,02	17,47	61,90	13,79	13,30	12,89	69,20	12,18	25,34	13,39	6,05	11,23	16,84	30				0	0			
20	61,38	69,92	15,49	21,03	41,68	18,41	5,79	41,48	13,24	25,52	13,92	9,02	38,60	30				0	0			
21	64,63	9,97	16,63	47,83	35,39	0,00	0,00	11,17	0,00	0,00	29,11	0,00	16,46	26				0	0			
22	0,00	12,81	28,56	36,73	9,59	33,18	15,54	65,40	29,79	38,24	24,51	0,00	0,00	28				0	0			
23	59,40	70,61	0,00	8,62	0,00	28,56	0,00	41,84	73,10	11,72	7,87	14,67	0,00	27				0	0			
24	26,26	44,17	58,72	70,95	32,91	14,20	0,00	114,62	44,48	11,54	17,98	45,17	20,29	31				0	0			
25	43,20	40,84	10,99	38,67	6,52	14,96	20,48	33,71	2,98	18,54	29,15	28,76	18,73	32				0	0			
26	34,46	29,49	22,04	94,15	0,00	35,45	28,30	14,88	4,56	33,98	23,01	6,61	0,00	30				0	0			
27	20,10	56,79	17,10	20,17	0,00	33,76	64,14	26,38	0,00	64,80	18,16	22,83	16,95	28				0	6			
28	6,07	8,14	11,49	0,00	0,00	12,65	29,85	11,76	33,08	19,64	28,09	58,50	20,91	27				0	0			
29	40,66	96,70	23,96	61,52	84,38	45,67	51,31	0,00	0,00	4,90	44,14	40,32	57,15	29				0	0			
30	71,29	11,31	24,86	77,15	25,34	12,79	41,22	30,78	21,59	34,15	17,47	0,00	5,02	30				0	0			
31	8,43	32,46	13,05	55,42	54,59	12,44	10,72	18,55	0,00	0,00	19,79	53,65	12,28	27				0	0			
32	37,04	0,00	0,00	48,74	25,27	0,00	34,43	45,64	14,88	21,56	30,66	0,00	29,17	28				0	8			
33	9,48	41,55	48,22	11,97	29,06	93,58	0,00	33,53	33,99	65,76	17,50	34,68	13,18	29				0	0			
34	43,91	69,57	17,89	95,49	21,88	0,00	12,05	34,68	9,52	21,84	27,00	15,37	55,10	31				0	0			
35	46,17	30,14	0,00	62,43	8,75	0,00	0,00	56,81	0,00	70,63	42,26	0,00	86,51	24				0	7			
36	36,97	16,11	34,46	4,83	0,00	22,54	0,00	12,50	51,41	24,29	12,02	80,71	39,70	26				0	0			

Figura 15 Il foglio di lavoro da copiare, la parte da cui Arena legge i valori di tempi di lavorazione e ricircoli

2.11 Il foglio di lavoro “ Data output “

In questo foglio di lavoro sono effettuate principalmente due operazioni:

- 1- Agevolazione dell’aggiornamento della Preshop Pool andando ad assegnare valore uno agli ordini rilasciati e riportando il nome degli ordini non rilasciati.
- 2- Si tiene conto dei job presenti in psp e dei job rilasciati in modo da garantire gli automatismi necessari all’aggiornamento della Preshop Pool. Il foglio inoltre fornisce in input ad Arena dei dati che saranno poi rielaborati nello storico come il numero di ordini in Preshop pool, gli ordini rilasciati, gli ordini appena giunti a sistema e la Preshop Pool al momento del rilascio.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Foglio che consente di agevolare aggiornamento dei job in psp, dando valore 1 ai job non ancora assegnati									
2										
3	Nome ordine	Ordini rilasciati	Ordini rimasti al giorno successivo	Nome ordini giorno successivo		Nordini rilasciatiPSP	Numero ordini Psp non schedulati	Numero totale ordini	Ordini Arrivati	
4	1	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
5	2	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
6	3	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
7	4	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
8	5	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
9	6	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
10	7	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
11	8	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
12	9	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
13	10	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
14	11	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
15	12	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
16	13	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
17	14	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
18	15	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
19	16	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
20	17	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
21	18	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
22	19	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
23	20	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
24	21	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
25	22	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
26	23	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
27	24	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
28	25	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
29	26	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
30	27	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
31	28	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
32	29	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
33	30	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
34	31	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
35	32	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187
36	33	1	0	0	0	267	-217	20,00	30,00	-187

Figura 16 Il foglio di lavoro Data output, la parte di conteggio ordini

Nella parte di sinistra del foglio, più precisamente nelle colonne dalla A alla E, ci si occupa di assegnare un valore 1 ai job rilasciati, in modo da poter facilmente sapere quali job sono rimasti a sistema.

Nella cella B4 funziona la seguente formula che restituisce il valore 1 se il job è stato assegnato:

`(CellaB4)=SE(A4="";0;SE(A4=0;0;CERCA.VERT(A4;'Preshoppoolrilascio'!A2:B2106;2;FALSO))`

Per sapere gli ordini rimasti al giorno successivo si usa la formula inserita nella cella C4:

(CellaC4) =SE(A4=0;0;SE(B4=0;1;0))

Si passa ora alla seconda parte del foglio dove si contano gli ordini rilasciati, in psp e appena arrivati.

Per contare gli ordini rilasciati si utilizza;

(CellaF4) =SOMMA('Preshoppool rilascio'!H2:H301)

Per gli ordini in Preshop Pool:

(CellaG4) =Preshoppool_dopo!Y4-F4

Per gli ordini appena giunti a sistema:

(CellaI4) =SOMMA(Ordini_al_giorno!\$Z\$44:\$Z\$73)

Infine per conoscere l'ammontare ordini in Preshop Pool compresi quelli appena arrivati:

(CellaJ4) =I4+G4

Il secondo compito svolto dal foglio è appunto quello di fornire dati di input ad Arena indicando in particolare:

- 1- N ordini rilasciati
- 2- N ordini nuovi
- 3- N ordini Preshop Pool post rilascio
- 4- N ordini Preshop Pool pre rilascio

Per fare ciò si utilizza una macro che copia i dati dalle colonne mostrate in precedenza nel momento in cui essi assumono i valori giusti. Il funzionamento della macro sarà mostrato in seguito.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1											
2											
3											
4	Numero ordini Psp non schedulati	Numero totale ordini	Ordini Arrivati			N rilasci	N ordini rimasti post rilascio	N ordini psp la mattina	N nuovi ordini	Ordini psp giorno seguente	
5	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
6	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
7	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
8	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
9	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
10	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
11	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
12	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
13	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
14	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
15	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
16	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
17	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
18	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
19	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
20	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
21	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
22	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
23	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
24	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
25	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
26	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
27	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
28	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
29	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
30	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
31	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
32	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
33	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
34	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
35	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	
36	-217	20,00	30,00	-187		267	24	265	26	50	

Figura 17 Il foglio Data output, la parte da cui Arena legge i dati

2.12 Il foglio di lavoro “ Preshoppool_dopo “

Il foglio si lavoro “ Preshoppool_dopo “ svolge essenzialmente due compiti:

- 1- Riporta gli ordini rilasciati con i relativi tempi standard di produzione e li somma per verificare l’ammontare del carico rilasciato
- 2- Riporta gli ordini non rilasciati in Preshop Pool aggiungendo ad essi quelli appena giunti a sistema. Inoltre nel caso in cui gli ordini fossero già presenti in Preshop Pool, si preoccupa di ridurre la Due Date di una unità.

Per prima cosa nella cella B1 è presente il carico di lavoro complessivamente rilasciato:

(Cella B1) =SOMMA.SE(C4:V294;”>0”)

Gli ordini rilasciati vengono trovati mediante un CERCA VERTICALE:

(Cella B4) =CERCA.VERT(A4;’Preshoppool rilascio!’\$F\$2:\$G\$293;2;FALSO)

così come i tempi produttivi relativi agli ordini rilasciati:

(Cella

C4)

=SE(\$B4>0;CERCA.VERT(\$B4;annostd!\$B\$8:\$X\$8125;Preshoppool_dopo!C\$2;FALSO);0)

C4		=SE(\$B4>0;CERCA.VERT(\$B4;annostd!\$B\$8:\$X\$8125;Preshoppool_dopo!C\$2;FALSO);0)																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	Carico totale ordini rilasciati	137249,54																					
2																							
3	Posizione	Nome ord	Staz 1	Staz 2	Staz 3	Staz 4	Staz 5	Staz 6	Staz 7	Staz 8	Staz 9	Staz 10	Staz 11	Staz 12	Staz 13	Staz 14	Staz 15	Staz 16	Staz 17	Staz 18	Staz 19	Staz 20	DUE DATE
4	1	79,79	20,47	27,53	1,38	0,00	18,66	78,64	25,39	32,17	42,99	19,67	34,38	42,36	26,78	17,72	26,75	40,29	13,87	0,00	79,61	30	
5	2	110,89	0,00	0,00	56,91	42,94	27,61	29,88	12,38	61,29	0,00	8,47	38,14	19,05	53,54	0,00	0,00	9,83	0,00	3,78	36,03	26	
6	3	75,65	4,84	43,25	46,83	41,38	11,57	9,87	0,00	59,30	22,55	18,21	0,00	0,00	51,98	45,01	35,11	90,46	0,00	0,00	0,00	26	
7	4	0,00	59,17	0,00	6,25	28,57	79,35	28,59	47,36	69,87	0,00	46,51	11,17	48,03	46,96	0,00	14,19	17,65	0,00	24,56	28,42	27	
8	5	84,24	98,27	73,47	28,48	37,20	0,00	0,00	16,79	0,00	0,00	0,00	63,88	26,72	22,85	11,65	15,77	9,73	52,09	65,47	14,17	27	
9	6	23,03	33,10	51,62	4,53	15,78	15,54	0,00	34,42	25,20	57,10	44,80	27,87	0,00	0,00	65,01	28,05	14,03	57,25	0,00	27,36	28	
10	7	64,32	25,44	0,00	0,00	20,03	115,57	0,00	27,00	58,86	47,98	44,20	24,57	38,58	0,00	30,96	37,98	24,92	38,19	42,96	57,50	28	
11	8	49,86	69,08	27,62	24,20	0,00	63,67	0,00	3,40	36,49	25,92	23,78	23,72	14,20	0,00	26,29	71,17	0,00	46,45	8,80	74,72	28	
12	9	97,67	40,94	39,68	0,00	32,75	0,00	18,07	47,60	62,42	26,17	9,41	41,01	60,63	19,20	44,36	0,00	0,00	43,53	6,13	0,00	27	
13	10	45,76	0,00	16,75	28,42	6,17	28,18	32,56	36,57	43,15	14,06	0,00	0,00	15,77	37,95	53,94	18,37	20,87	7,43	2,29	44,28	29	
14	11	31,83	0,00	23,34	0,00	62,26	29,10	0,00	39,14	24,09	34,89	0,00	32,26	0,00	50,50	18,42	2,24	42,06	0,00	11,39	0,00	25	
15	12	3,85	23,38	43,25	0,00	9,84	57,94	7,81	37,08	0,00	3,83	40,87	67,59	17,91	12,86	0,00	0,00	26,44	0,00	37,44	25,26	27	
16	13	22,69	0,00	35,79	24,29	0,00	0,00	20,84	28,44	27,52	70,84	16,36	0,00	41,31	65,43	0,00	32,06	16,84	19,19	27,89	12,55	27	
17	14	22,41	17,23	0,00	67,30	0,00	5,69	28,02	41,42	0,00	33,41	50,32	0,00	0,00	43,79	23,94	12,52	22,57	18,75	0,00	0,00	25	
18	15	0,00	61,22	52,01	0,00	0,00	26,18	42,77	85,54	65,96	6,05	31,88	69,52	0,00	91,36	20,26	18,51	50,40	32,18	17,26	29,51	28	
19	16	0,00	12,82	72,22	67,95	55,55	0,00	71,44	41,96	15,72	17,77	22,13	24,94	0,00	59,99	23,20	0,00	6,55	41,59	15,81	8,32	28	
20	17	43,78	55,09	34,51	22,53	16,23	20,54	0,00	38,74	42,35	7,68	91,82	20,93	49,48	24,31	74,47	0,00	48,61	19,41	0,00	0,00	28	
21	18	58,18	27,35	51,24	47,31	0,00	0,00	42,58	24,17	17,63	57,54	10,47	8,79	17,35	79,44	13,90	28,85	8,84	8,51	12,65	19,93	30	
22	19	8,68	33,94	0,00	0,00	65,40	61,39	28,52	55,92	68,20	15,85	14,56	45,93	4,72	1,43	40,91	17,16	29,26	6,13	13,30	33,33	30	
23	20	22,16	7,66	17,71	3,01	0,00	2,02	5,71	61,89	8,64	19,63	33,61	37,44	0,00	0,00	6,48	0,00	0,00	28,95	0,00	2,53	26	
24	21	0,00	12,78	6,41	12,87	8,90	32,90	14,01	0,00	6,50	35,72	45,19	15,47	39,44	4,02	63,72	13,59	43,32	21,82	0,00	0,00	28	
25	22	66,07	0,00	67,47	26,79	27,04	69,80	8,02	60,00	53,19	0,00	6,05	0,00	35,10	0,00	42,73	79,65	11,32	10,26	17,03	0,00	27	
26	23	34,63	35,21	27,52	7,33	43,82	40,28	56,30	30,40	43,38	54,59	60,01	28,64	12,32	0,00	97,98	42,69	12,60	18,99	42,92	24,72	31	
27	24	32,75	24,95	13,32	87,00	11,72	67,03	47,41	43,53	46,04	3,92	42,81	10,54	18,23	3,40	37,28	5,88	20,54	33,54	25,75	22,09	32	
28	25	15,45	20,71	38,53	10,74	41,95	54,86	30,13	31,60	24,60	25,63	97,44	0,00	39,09	30,97	19,09	3,12	27,21	26,42	6,64	0,00	30	
29	26	0,00	14,06	21,08	27,02	26,33	25,78	0,00	21,46	55,49	18,16	20,60	0,00	21,79	62,06	30,93	0,00	63,25	22,35	29,54	10,35	28	
30	27	10,31	28,94	13,50	0,00	22,05	0,00	0,00	4,55	9,76	14,81	0,00	0,00	12,43	35,06	3,99	39,96	24,68	12,03	50,66	25,10	27	
31	28	0,00	36,18	27,44	21,02	17,75	27,34	20,35	38,51	110,69	28,65	61,41	81,54	52,56	46,94	0,00	0,00	8,24	49,56	36,39	63,58	29	
32	29	0,00	11,07	36,92	46,55	7,73	6,81	18,33	73,29	15,55	33,83	78,27	26,41	13,31	40,69	31,99	12,89	36,77	16,50	0,00	7,98	30	
33	30	13,87	13,76	0,00	2,28	15,62	0,00	0,00	9,90	36,21	2,00	54,10	47,71	1,74	16,81	20,14	0,00	0,00	12,51	49,95	13,11	27	
34	31	39,54	28,37	32,95	57,44	17,81	6,18	65,16	37,55	0,00	0,00	49,51	22,03	0,00	35,55	43,73	15,01	12,50	29,19	0,00	31,96	28	
35	32	62,57	30,96	20,05	0,00	8,19	22,11	0,00	10,52	45,51	38,95	16,15	21,53	88,30	0,00	33,99	27,74	70,58	21,75	33,85	1,91	29	
36	33	49,51	49,49	27,35	11,32	35,06	41,09	24,42	49,10	78,01	17,61	84,09	24,47	0,00	13,83	33,83	8,63	32,38	25,77	13,78	62,52	31	

Figura 18 Il foglio di lavoro Preshoppool_dopo, la parte degli ordini rilasciati

Successivamente si scrivono gli ordini che sono rimasti al giorno successivo, eliminando gli ordini appena rilasciati.

X	Y	Z	AA	AW	AX	AY	AZ	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
		ORDINI A PORTAFOGLIO NON RILASCIATI																
		Posizione	0															
N ordini psp	50,00	1	266	0	1	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	1				
psp dopo	-217	2	266	0	2	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	2				
		3	266	0	3	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	3				
		4	266	0	4	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	4				
		5	266	0	5	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	5				
		6	266	0	6	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	6				
		7	266	0	7	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	7				
		8	266	0	8	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	8				
		9	266	0	9	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	9				
		10	266	0	10	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	10				
		11	266	0	11	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	11				
		12	266	0	12	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	12				
		13	266	0	13	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	13				
		14	266	0	14	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	14				
		15	266	0	15	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	15				
		16	266	0	16	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	16				
		17	266	0	17	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	17				
		18	266	0	18	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	18				
		19	266	0	19	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	19				
		20	266	0	20	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	20				
		21	266	0	21	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	21				
		22	266	0	22	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	22				
		23	266	0	23	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	23				
		24	266	0	24	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	24				
		25	266	0	25	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	25				
		26	266	0	26	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	26				
		27	266	0	27	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	27				
		28	266	0	28	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	28				
		29	266	0	29	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	29				
		30	266	0	30	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	30				
		31	266	0	31	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	31				
		32	266	0	32	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	32				
		33	266	0	33	0	0,00	0,00	#N/D		1	266	0	33				

Figura 19 Il foglio Preshoppool_dopo, la parte inerente gli ordini rimasti in Preshop Pool

Per prima cosa nella colonna AA si scrivono gli ordini rimasti al giorno successivo. La formulazione di queste celle è abbastanza complessa e comporta una problematica: alcuni ordini vengono ripetuti svariate volte uguali nella sequenza. Per ovviare questa problematica intervengono poi le colonne BX e BY.

(CellaAA4)= =SE(Z4<=\$Y\$4;CERCA.VERT(1;'Data output'!C4:\$D\$363;2;FALSO);"")

Il senso della formulazione è il seguente: finchè la posizione dell'ordine è minore del numero di ordini in Preshop Pool esso va cercato in "Data Output", viceversa significa che si è giunti al numero massimo di ordini presenti in Preshop Pool contando quelli appena rilasciati.

Per risolvere il problema citato in precedenza si procede nel seguente modo:

- 1- Nella colonna BV si assegna un numero di posizione per ogni ordine. Se l'ordine in questione viene ripetuto più volte il numero di posizione rimane identico

(CellaBV4) =SE(AA4<>AA3;BV3+1;BV3)

- 2- Nella colonna BX si ottiene la lista dei job non rilasciati maggiorati di quelli appena giunti senza ripetizioni

(CellaBX4) =SE(BY4>'Data output'!\$J\$4;0;CERCA.VERT(BY4;BV4;BW303;2;FALSO))

Con Data output J4 contenente il numero di job compresi nella Preshop Pool.

Agendo in questa maniera si riescono ad eliminare le ripetizioni in maniera semplice ed efficace senza dover ricorrere a macro.

2.13 Il foglio di lavoro “Giorno”

Questo foglio benché possa apparire desolante è il fulcro di tutte le macro che verranno spiegate in seguito. Difatti è grazie a questo foglio che gli automatismi necessari per una simulazione non presidiata vengono attivati. Nella cella A1 è presente un numero identificativo del giorno della simulazione che Arena riscrive da un giorno con l’altro. Il cambiamento di valore di questa cella attiva la macro CambiamentoCella responsabile dell’attivazione di tutto il foglio Excel e del file di Lingo. Allo stesso modo sono stati creati i seguenti fogli di lavoro, necessari all’attivazione di macro:

- 1- Resettaps che attiva la macro “dacopiare1”
- 2- 2parteEDD che attiva la macro “pspdopo2”
- 3- Salvataggio che attiva la macro “salva” necessaria per il modello di bilanciamento

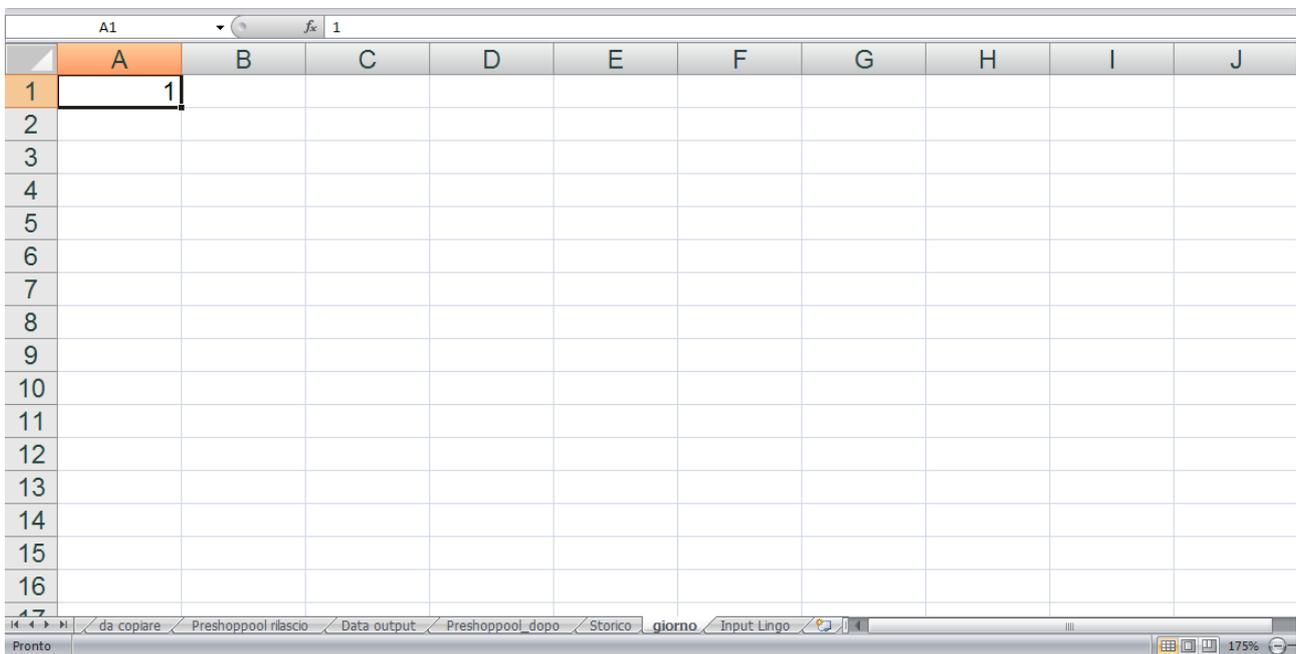


Figura 20 Il foglio di lavoro Giorno

2.14 Le Macro

Ai fini di un corretto funzionamento del foglio di lavoro, specialmente per quanto riguarda l'algoritmo di limitazione del carico EDD si è rivelato necessario programmare determinate operazioni mediante il linguaggio Visual Basic presente all'interno di Excel 2007.

Per quanto riguarda il foglio di lavoro utilizzato per la simulazione dell'algoritmo di limitazione del carico vengono eseguite tre macro in sequenza:

- 1- Dacopiare1, che si occupa di cancellare una serie di colonne in modo da preparare il foglio di lavoro alla schedulazione.
- 2- Dacopiare2, che svolge la fase di Order Entry nel sistema andando a copiare gli ordini in ingresso dal foglio Ordini al giorno nei fogli PreshoppoolPrima e daCopiare, questa macro si occupa infine di eseguire l'algoritmo di limitazione
- 3- PSPdopo2, che si occupa di aggiornare la Preshop Pool cancellando gli ordini rilasciati ed aggiornando i due fogli PreshoppoolPrima e daCopiare.

Per prima cosa è opportuno chiarire il funzionamento dell'algoritmo EDD e in quale maniera le macro ne hanno favorito l'implementazione.

2.14.1 L'algoritmo di limitazione EDD

I passi da seguire per l'algoritmo di limitazione sono i seguenti:

- 1- Ordinamento dei job in Preshop Pool in base alla due date. Attività svolta da macro.
- 2- Selezione dei job da rilasciare in ordine di due date finchè non viene superato il limite imposto ad almeno una stazione. Attività svolta dal foglio "da copiare" di Excel senza ausilio di macro
- 3- Selezione tra i job rimanenti di quelli i cui tempi di lavorazione sommati al carico già allocato non superano la norma prevista per ogni stazione. Attività svolta da macro
- 4- Rilascio dei job ed inserimento dei nuovi arrivati. Attività svolta in parte dal foglio "Preshoppool dopo" di Excel e in parte da macro che copiano il contenuto del foglio nei due fogli "da copiare" e "Preshoppool Prima".
- 5- Ultimate le operazioni, al trascorrere della giornata si ritorna al passo 1.

2.14.2 Il codice VBA per l'algoritmo di limitazione del carico.

Per prima cosa si esegue la macro dacopiare1, richiamata dal foglio ResettaPSP.

```
Sheets("Dati_input").Select  
  
    Range("B9").Select  
  
    Selection.Copy  
  
    Range("D18").Select  
  
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
        :=False, Transpose:=False  
  
    Application.CutCopyMode = False
```

Questa prima parte di codice si preoccupa di aggiornare nel foglio dati input il numero di ordini entrati in Preshop Pool dal primo giorno ad oggi.

```
Sheets("Preshoppool rilascio").Select  
  
Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("A2:B502").Select  
  
Selection.ClearContents  
  
Sheets("Preshoppool prima").Select  
  
Range("W8").Select  
  
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
  
ActiveWorkbook.Worksheets("Preshoppool prima").Sort.SortFields.Clear  
  
ActiveWorkbook.Worksheets("Preshoppool prima").Sort.SortFields.Add Key:=Range _  
("W8"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _  
xlSortNormal  
  
With ActiveWorkbook.Worksheets("Preshoppool prima").Sort  
    .SetRange Range("A8:W373")
```

.Header = xlNo

.MatchCase = False

.Orientation = xlTopToBottom

.SortMethod = xlPinYin

.Apply

End With

Questa seconda parte invece cancella alcune colonne che riportano gli ordini rilasciati il giorno prima, evitando inconvenienti dovuti a ordini contati due volte o ordini cancellati.

Successivamente si attiva la macro dacopiare2 che attiva la fase di order entry e che implementa l'algoritmo di limitazione EDD.

Per prima cosa nella fase di Order Entry si copiano e incollano gli ordini appena entrati nei due fogli di lavoro contenenti la Preshop Pool. Inizializzando due variabili definite "nome ordine" e "nuovi" si creano dei riferimenti nel codice VBA in modo che si possano compiere due operazioni:

- 1- Copiare il giorno di ingresso nel sistema dei job in anno standard
- 2- Copiare nei fogli Preshop Prima e da copiare gli ordini appena entrati nelle giuste celle.

Sheets("Ordini_al_giorno").Select

Set nomeordine = Worksheets("Ordini_al_giorno").Range("c7")

Range("cc7:cc36").Select

Selection.Copy

Sheets("annostd").Select

Cells(7 + nomeordine, 30).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _

:=False, Transpose:=False

Sheets("Ordini_al_giorno").Select

Range("bg7:cb36").Select

Selection.Copy

Sheets("da copiare").Select

Set nuovi = Worksheets("da copiare").Range("b1")

Cells(8 + nuovi, 1).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _

:=False, Transpose:=False

Sheets("Preshoppool prima").Select

Set nuovi = Worksheets("Preshoppool prima").Range("b1")

Cells(8 + nuovi, 2).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _

:=False, Transpose:=False

Terminata questa fase si ordinano i job presenti in preshop pool secondo la loro due date.

Sheets("da copiare").Select

Range("v8:v508").Select

ActiveWorkbook.Worksheets("da copiare").Sort.SortFields.Clear

ActiveWorkbook.Worksheets("da copiare").Sort.SortFields.Add Key:=Range _

("v8"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _

xlSortNormal

With ActiveWorkbook.Worksheets("da copiare").Sort

.SetRange Range("a8:v508")

.Header = xlNo

.MatchCase = False

.Orientation = xlTopToBottom

.SortMethod = xlPinYin

.Apply

End With

Successivamente si azzera il carico allocato alle macchine e lo inizializza al carico parziale ottenuto mediante un primo rilascio degli ordini in Excel nel foglio “da copiare”.

Sheets("da copiare").Select

Range("au3:bn3").Select

Selection.ClearContents

Range("ax8:ax307").Select

Selection.ClearContents

For i = 1 To 20

Cells(3, 46 + i) = Cells(4, 46 + i)

Next i

Si inizializzano poi le variabili utilizzate dall’algoritmo ai valori di carico determinati dal foglio Excel.

Set carm1 = Worksheets("da copiare").Range("au3")

Set carm2 = Worksheets("da copiare").Range("av3")

Set carm3 = Worksheets("da copiare").Range("aw3")

Set carm4 = Worksheets("da copiare").Range("ax3")

Set carm5 = Worksheets("da copiare").Range("ay3")

Set carm6 = Worksheets("da copiare").Range("az3")

Set carm7 = Worksheets("da copiare").Range("ba3")

Set carm8 = Worksheets("da copiare").Range("bb3")

Set carm9 = Worksheets("da copiare").Range("bc3")

Set carm10 = Worksheets("da copiare").Range("bd3")

Set carm11 = Worksheets("da copiare").Range("be3")

Set carm12 = Worksheets("da copiare").Range("bf3")

Set carm13 = Worksheets("da copiare").Range("bg3")

Set carm14 = Worksheets("da copiare").Range("bh3")

Set carm15 = Worksheets("da copiare").Range("bi3")

Set carm16 = Worksheets("da copiare").Range("bj3")

Set carm17 = Worksheets("da copiare").Range("bk3")

Set carm18 = Worksheets("da copiare").Range("bl3")

Set carm19 = Worksheets("da copiare").Range("bm3")

Set carm20 = Worksheets("da copiare").Range("bn3")

Set lavm1 = Worksheets("da copiare").Range("b8")

Set lavm2 = Worksheets("da copiare").Range("c8")

Set lavm3 = Worksheets("da copiare").Range("d8")

Set lavm4 = Worksheets("da copiare").Range("e8")

Set lavm5 = Worksheets("da copiare").Range("f8")

Set lavm6 = Worksheets("da copiare").Range("g8")

Set lavm7 = Worksheets("da copiare").Range("h8")

Set lavm8 = Worksheets("da copiare").Range("i8")

Set lavm9 = Worksheets("da copiare").Range("j8")

Set lavm10 = Worksheets("da copiare").Range("k8")

Set lavm11 = Worksheets("da copiare").Range("l8")

Set lavm12 = Worksheets("da copiare").Range("m8")

Set lavm13 = Worksheets("da copiare").Range("n8")

Set lavm14 = Worksheets("da copiare").Range("o8")

Set lavm15 = Worksheets("da copiare").Range("p8")

Set lavm16 = Worksheets("da copiare").Range("q8")

Set lavm17 = Worksheets("da copiare").Range("r8")

Set lavm18 = Worksheets("da copiare").Range("s8")

Set lavm19 = Worksheets("da copiare").Range("t8")

Set lavm20 = Worksheets("da copiare").Range("u8")

Ora si controlla la presenza di ordini che possano saturare meglio la capacità.

For i = 1 To (ordini - 1)

If Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 49) > 0 Then

If Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 47) = 1 Then

Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 50).Value = 1

ElseIf Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 47) = 0 Then

If Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 1) > 0 Then

lavm1 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 2)

lavm2 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 3)

lavm3 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 4)

lavm4 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 5)

lavm5 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 6)

lavm6 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 7)

lavm7 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 8)

lavm8 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 9)

lavm9 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 10)

lavm10 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 11)

lavm11 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 12)

lavm12 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 13)

lavm13 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 14)

lavm14 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 15)

lavm15 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 16)

lavm16 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 17)

lavm17 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 18)

lavm18 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 19)

lavm19 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 20)

lavm20 = Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 21)

If carm1 + lavm1 <= Worksheets("da copiare").Range("y3") Then

If carm2 + lavm2 <= Worksheets("da copiare").Range("z3") Then

If carm3 + lavm3 <= Worksheets("da copiare").Range("aa3") Then

If carm4 + lavm4 <= Worksheets("da copiare").Range("ab3") Then

If carm5 + lavm5 <= Worksheets("da copiare").Range("ac3") Then

If carm6 + lavm6 <= Worksheets("da copiare").Range("ad3") Then

If carm7 + lavm7 <= Worksheets("da copiare").Range("ae3") Then

If carm8 + lavm8 <= Worksheets("da copiare").Range("af3") Then

If carm9 + lavm9 <= Worksheets("da copiare").Range("ag3") Then

If carm10 + lavm10 <= Worksheets("da copiare").Range("ah3") Then

If carm11 + lavm11 <= Worksheets("da copiare").Range("ai3") Then

If carm12 + lavm12 <= Worksheets("da copiare").Range("aj3") Then

If carm13 + lavm13 <= Worksheets("da copiare").Range("ak3") Then

If carm14 + lavm14 <= Worksheets("da copiare").Range("al3") Then

If carm15 + lavm15 <= Worksheets("da copiare").Range("am3") Then

If carm16 + lavm16 <= Worksheets("da copiare").Range("an3") Then

If carm17 + lavm17 <= Worksheets("da copiare").Range("ao3") Then

If carm18 + lavm18 <= Worksheets("da copiare").Range("ap3") Then

If carm19 + lavm19 <= Worksheets("da copiare").Range("aq3") Then

If carm20 + lavm20 <= Worksheets("da copiare").Range("ar3") Then

carm1 = carm1 + lavm1

carm2 = carm2 + lavm2

carm3 = carm3 + lavm3

carm4 = carm4 + lavm4

carm5 = carm5 + lavm5

carm6 = carm6 + lavm6

carm7 = carm7 + lavm7

carm8 = carm8 + lavm8

carm9 = carm9 + lavm9

carm10 = carm10 + lavm10

carm11 = carm11 + lavm11

carm12 = carm12 + lavm12

carm13 = carm13 + lavm13

carm14 = carm14 + lavm14

carm15 = carm15 + lavm15

carm16 = carm16 + lavm16

carm17 = carm17 + lavm17

carm18 = carm18 + lavm18

carm19 = carm19 + lavm19

carm20 = carm20 + lavm20

Worksheets("da copiare").Cells(7 + i, 50).Value = 1

End If (ripetuto per ogni if utilizzato, se ne riporta solo uno per brevità)

Next i

Vengono ora aggiornati i valori di carico per stazione appena ottenuti tramite algoritmo di limitazione del carico.

Worksheets("da copiare").Range("au3") = carm1

Worksheets("da copiare").Range("av3") = carm2

Worksheets("da copiare").Range("aw3") = carm3

Worksheets("da copiare").Range("ax3") = carm4

Worksheets("da copiare").Range("ay3") = carm5

Worksheets("da copiare").Range("az3") = carm6

Worksheets("da copiare").Range("ba3") = carm7

Worksheets("da copiare").Range("bb3") = carm8

Worksheets("da copiare").Range("bc3") = carm9

Worksheets("da copiare").Range("bd3") = carm10

Worksheets("da copiare").Range("be3") = carm11

Worksheets("da copiare").Range("bf3") = carm12

Worksheets("da copiare").Range("bg3") = carm13

Worksheets("da copiare").Range("bh3") = carm14

Worksheets("da copiare").Range("bi3") = carm15

Worksheets("da copiare").Range("bj3") = carm16

Worksheets("da copiare").Range("bk3") = carm17

Worksheets("da copiare").Range("bl3") = carm18

Worksheets("da copiare").Range("bm3") = carm19

Worksheets("da copiare").Range("bn3") = carm20

Una volta definiti gli ordini rilasciati essi vengono copiati nelle prime due colonne del foglio "Preshoppool rilascio".

Range("aw8:ax307").Select

Selection.Copy

Sheets("Preshoppool rilascio").Select

Range("A2").Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _

:=False, Transpose:=False

Ultimate queste procedure di rilascio si attivano ora una serie di macro necessarie all'aggiornamento della Preshop Pool. Per prima cosa si occupano di copiare dati di interesse del

foglio "Data Output" per fornire un corretto input ad Arena, successivamente si preoccupano di cancellare i fogli "Preshoppool prima" e "da copiare" e di incollarvi i dati della nuova Preshop Pool presi dal foglio "Preshoppool dopo".

Sheets("Data output").Select

Range("F4:I4").Select

Selection.Copy

Range("L4").Select

*Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False*

Sheets("Preshoppool prima").Select

Range("B8:W49").Select

Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select

Selection.Copy

Sheets("Preshoppool rilascio").Select

Range("BA2").Select

ActiveSheet.Paste

Sheets("da copiare").Select

Worksheets("da copiare").Range("a8:v307").Select

Selection.ClearContents

Sheets("Preshoppool_dopo").Select

Worksheets("Preshoppool_dopo").Range("Ay4:Bt303").Select

Selection.Copy

Sheets("da copiare").Select

Worksheets("da copiare").Range("a8").Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Sheets("Preshoppool prima").Select

Worksheets("Preshoppool prima").Range("b8:w307").Select

Selection.ClearContents

Sheets("da copiare").Select

Worksheets("da copiare").Range("a8:v307").Select

Selection.Copy

Sheets("Preshoppool prima").Select

Worksheets("Preshoppool prima").Range("b8").Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Sheets("Preshoppool rilascio").Select

Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d1").Select

2.15 Come automatizzare il funzionamento delle macro

Come spiegato in precedenza nel foglio di lavoro Excel sono presenti tre macro che devono essere attivate in sequenza. I fogli di lavoro adibiti all'attivazione di macro sono tre:

- 1- Resettapsp che attiva dacopiare1
- 2- Giorno che attiva dacopiare2
- 3- 2parteedd che attiva pspdopo2

All'interno di questi fogli nella cella A1 agisce una macro che svolge la funzione di attivare le varie routine non appena il valore nella cella viene modificato.

Le modifiche nel valore della cella vengono apportate da Arena mediante accessi in scrittura tramite due possibili modalità:

- 1- Blocco ReadWrite che si occupa di cambiare la cella in giorno
- 2- Scrittura mediante codice VBA presente in Arena

Il funzionamento di queste parti verrà spiegato nella prossima sezione dell'Appendice.

Per quanto riguarda il foglio di lavoro Excel è necessario inserire all'interno dei tre fogli la seguente macro:

Foglio resetta PSP.

```
Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)
```

```
If Cambio1 <> Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d2") Then dacopiare1
```

```
CambiamentoReset
```

```
End Sub
```

Foglio Giorno.

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

If Cambio <> Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d1") Then dacopiare2

CambiamentoCella

End Sub

Foglio 2parteedd

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

If Cambio3 <> Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d3") Then pspdopo2

CambiamentoRoutine2

End Sub

Queste tre macro eseguono essenzialmente 3 compiti:

- 1- Controllano che il valore contenuto nella cella di riferimento sia uguale al valore di una variabile determinata tramite le macro CambiamentoRoutine2, CambiamentoReset e CambiamentoCella il cui funzionamento verrà mostrato in seguito.
- 2- Nel caso in cui il valore sia differente attivano le tre macro necessarie all'aggiornamento e al rilascio degli ordini in Preshop Pool
- 3- Lanciano le macro CambiamentoRoutine2, CambiamentoReset e CambiamentoCella necessarie all'aggiornamento delle variabili di riferimento.

Le tre macro sopra citate sono le seguenti:

Sub CambiamentoCella()

Worksheets("Preshoppool rilascio").Select

If Cambio = "" Then Cambio = 0

Cambio = Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d1")

End Sub

Sub CambiamentoReset()

Sheets("Preshoppool rilascio").Select

If Cambio1 = "" Then Cambio1 = 0

Cambio = Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d2")

End Sub

Sub CambiamentoRoutine2()

Sheets("2parteedd").Select

If Cambio3 = "" Then Cambio3 = 0

Cambio3 = Worksheets("Preshoppool rilascio").Range("d3")

End Sub

Infine nella gestione progetti di Excel nella sezione ThisWorkbook è necessario inserire il seguente codice che attiva le tre macro appena descritte all'apertura del foglio di lavoro.

Sub Workbook_Open()

CambiamentoCella

CambiamentoReset

CambiamentoRoutine2

End Sub

2.16 Modifiche da apportare per la simulazione con il modello di bilanciamento

Per quanto concerne il modello di bilanciamento le modifiche da apportare al foglio di lavoro sono poche e consistono nell'introduzione di tre ulteriori fogli:

- 1- Il foglio di lavoro InputCplex che svolge funzioni simili al foglio dacopiare
- 2- Il foglio di lavoro salvataggio, che si preoccupa di attivare le macro necessarie al salvataggio automatico del file Excel, necessario per una corretta interazione con ILOGCPLEX.
- 3- Il foglio di lavoro Pesì contenente i pesi necessari al modello di bilanciamento dei carichi di lavoro.

2.16.1 Il foglio di lavoro inputCplex

Nome ordine	Staz1	Staz2	Staz3	Staz4	Staz5	Staz6	Staz7	Staz8	Staz9	Staz10	Staz11	Staz12	Staz13	Staz14	Staz15	Staz16	Staz17	Staz18	Staz19	Staz20	DD	Tard	Presto
1	38.95241	23.61195	143.3376	0	54.56089	35.19597	26.78032	51.64794	26.09467	16.06021	82.07265	25.63211	17.49063	33.4973	31.75514	21.2079	43.52621	47.30437	63.33902	37.85987	33	29	17
2	42.90124	15.52365	94.95904	0	106.5789	56.98018	23.5262	29.94679	0	45.7362	33.2595	46.38899	59.62928	32.53899	0	9.003862	62.12923	17.79465	27	23	15		
3	0	36.43803	9.230554	32.56972	7.857658	0	0	13.35749	17.94486	24.59195	76.0722	69.20962	0	13.02559	19.6752	60.63098	82.77725	50.44467	24	20	13		
4	42.65042	155.0194	16.20621	34.89577	22.95337	73.35094	48.8811	20.7255	25.53004	16.65338	0	7.077603	42.87245	29.9584	36.99243	46.74462	38.45592	25.32877	57.94229	9.348206	30	26	14
5	0	15.29204	40.4095	10.17882	78.90071	21.4563	0	24.14608	33.69535	48.48795	53.9796	29.14311	24.27432	63.96732	31.14197	0	35.25844	19.63607	0	21	17	11	
6	0	0	55.15715	0	50.39386	0	4.371792	67.11384	104.3452	27.90727	39.60297	46.22149	2.827205	33.62306	70.76144	59.65059	56.68714	34.72734	0	26	22	15	
7	0	0	0	0	44.38955	30.05688	87.39037	0	78.33289	78.20884	13.20452	17.95186	74.94446	108.3353	0	51.94418	15.04336	16.00565	62.82988	30	26	15	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.89049	96.31421	103.7597	68.8237	0	32.96148	51.0042	48.86237	35.72478	57.58989	21	17	16	
9	44.16792	32.49902	24.50152	51.46617	27.04706	65.1262	41.93795	0	56.79554	19.13954	68.68687	14.63456	18.75895	0	58.1875	34.14327	0	0	1.96197	23	19	16	
10	0	29.98226	60.52536	0	23.63952	27.9989	22.69564	0	27.04594	16.0349	0	0	0	0	56.53227	0	0	74.88887	133.871	23	19	10	
11	23.03766	0	29.21813	42.40476	11.98401	0	0	0	0	0	0	143.2681	21.982	83.50489	59.43272	66.33292	0	40.99994	26.28534	53.05215	24	20	14
12	67.85994	0	23.95185	108.0224	24.84161	54.27829	26.35056	40.74231	123.1821	0	0	0	0	0	27.0763	51.9895	35.87305	31.15066	10.76024	28	24	16	
13	26.26903	16.95207	14.88187	14.85614	64.34036	12.26878	16.30613	36.3881	0	65.5314	74.98794	0	16.31903	23.1022	28.99133	51.43951	56.23715	26.12993	26.38876	10.75017	25	21	11
14	0	18.73238	85.16221	19.79586	40.96394	0	0	0	0	56.52478	20.43242	35.95612	0	28.60375	40.52442	29.79229	34.5418	0	1.930943	17	13	15	
15	10.72765	0	120.53171	40.57873	29.09392	129.7712	0	30.58635	43.26955	0	64.88293	13.8291	0	15.07214	18.70938	37.02932	21.85571	15.87688	19.3244	25	21	15	
16	15.93236	0	42.41444	41.19347	0	0	32.00619	0	78.25427	27.53988	0	59.47272	8.598904	68.10802	71.98268	0	37.62055	40.34509	32.15333	0	22	18	12
17	0	20.06730	74.37325	63.28062	0	0	101.2021	56.13903	0	70.95374	185.3186	0	0	31.888871	4.218378	34.47239	47.65309	22.69646	36.77532	33.42204	29	25	15
18	0	0	0	0	0	0	54.27951	56.89809	67.89554	13.05823	0	28.72772	44.48732	38.6882	160.2221	66.99542	18.32201	30.35192	65.77413	19.24491	27	23	15
19	31.2788	55.09324	36.6301	36.9406	0	156.6548	182.7261	17.20204	0	36.66638	92.68243	0	9.643875	141.052	40.38727	18.44665	19.06371	35.14635	0	34	30	13	
20	24.69687	0	61.79495	28.82035	19.2710	35.76694	18.43105	10.84072	0	25.53497	109.3982	16.91881	0	3.343443	63.72687	8.271988	9.01818	59.87294	47.78571	36.0215	23	19	14
21	15.5379	0	66.44137	12.46512	0	0	0	0	0	23.43383	85.61222	85.08391	0	82.53492	0	91.99561	10.99982	87.20829	61.26084	25	21	13	
22	86.62569	63.03687	14.52375	12.13524	0	25.01955	0	0	0	55.55683	18.8185	41.51696	0	12.50213	27.8252	42.50567	26.52792	15.53059	61.0633	0	20	16	
23	43.38415	0	42.28975	0	28.09983	62.6843	45.3984	35.73588	8.34222	82.982	57.70818	44.52735	76.3772	55.79588	43.3444	40.14664	31.97659	44.86289	23.76655	44.1241	36	32	16
24	32.47995	12.14842	11.22425	0	2.382981	72.44446	29.27718	37.95408	0	30.55413	59.65553	13.19432	45.06778	15.89554	81.92425	47.19437	0	20.43673	10.77955	60.93064	24	20	13
25	0	0	0	0	0	0	0	45.44485	11.34937	41.25888	0	0	135.2024	104.4262	84.67831	40.68125	0	27.99505	0	22.2771	21	17	15
26	17.74713	59.04941	122.36	33.09333	857.3853	48.74149	67.88095	25.55018	63.71607	42.85902	109.0957	74.28810	22.5925	11.30871	125.3709	8.95915	25.90273	52.41899	56.30206	32.97414	46	42	11
27	0	0	0	0	0	59.23176	0	2157.123	52.12536	46.0305	0	93.63944	16.71286	53.37879	52.77643	94.09107	50.22836	28.48581	25.03736	82.38337	27	23	10

Figura 21 il foglio di lavoro InputCplex

Questo foglio di lavoro consente di aggiornare i job presenti in Preshop Pool in modo che ILOGCPLEX possa agevolmente accedervi. Per prima cosa nelle colonne da A a V sono presenti il nome ordine tempi di lavorazione e Due Date dei job presenti in Preshop Pool.

Gli ordini vengono inseriti in questo foglio dalla macro dacopiare2, il cui codice è lo stesso mostrato in precedenza con la differenza che anziché copiare nel foglio “dacopiare” gli ordini in Preshop Pool questi ultimi sono copiati nel foglio “InputCplex”.

Dalla cella W16 per tutta la lunghezza della Preshop Pool agisce la seguente formula che si preoccupa di calcolare l’istante di rilascio al più tardi.

W16 =SE.ERRORE(SE(V16=0;15;SE(V16-'Preshoppool rilascio'!\$D\$1-Dati_input!\$B\$13<=0;1;V16-'Preshoppool rilascio'!\$D\$1-Dati_input!\$B\$13));15)

Per prima cosa nel momento in cui la formula dovesse restituire #n#d la formula restituisce 15 in modo che ILOGCPLEX possa comunque lavorare senza intoppi. Dopodichè si verifica che la due date sia maggiore di zero in modo da non creare anomalie. Infine se le due condizioni sono soddisfatte viene determinato l’istante al più tardi come (Due date – Tempo attraversamento stimato) – Oggi.

Nelle celle da B5:U5 sono riportati i valori di delta obiettivo che permettono al modello di bilanciamento di sapere il carico da allocare alle varie stazioni. La formula è molto semplice e riporta semplicemente i valori già presenti in “dacopiare”.

B5 = 'da copiare'!\$A\$5

Nella parte destra del foglio sono presenti delle celle che attivano dei link necessari alla lettura degli output forniti da IlogCplex. Il programma salva i propri output su dei file che sono obbligatoriamente chiusi, per questo motivo è necessario attivare le seguenti formule:

AA16 ='D:\Prova \[outputcplex.xls]Foglio1'!A1

Questo link viene attivato da una apposita macro chiamata “aggiornamento” che verrà spiegata in seguito.

2.17 Il foglio di lavoro pesi

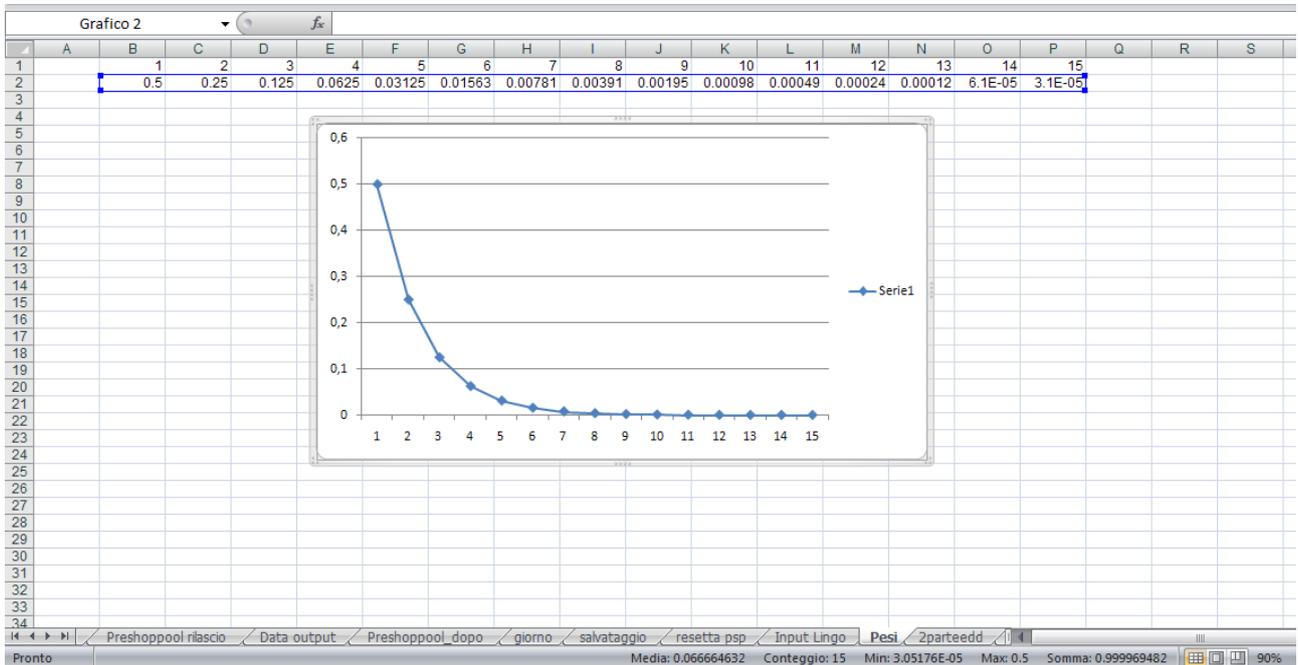


Figura 22 Il foglio di lavoro Pesi

Questo foglio è necessario per fornire ad Ilog Cplex i pesi necessari alla simulazione. Mediante un ausilio grafico fornisce un'utile grafico dell'andamento dei pesi al passare dei giorni.

2.18 Le macro necessarie per il bilanciamento

Il foglio di lavoro "definitivo_bilancia.xlsm" necessita di alcune macro aggiuntive per il corretto funzionamento.

Le aggiunte e le modifiche sono le seguenti:

- 1- Nella macro "dacopiare2" i file sono copiati nel foglio "Input Cplex" anziché "dacopiare".
- 2- Eliminazione della parte di codice relativa all'algorithmo EDD.
- 3- Aggiunta della macro "salvataggio" necessaria a salvare il file Excel al termine di ogni giornata simulata.
- 4- Aggiunta della macro "aggiornamento" che attiva i link presenti in "InputCplex".
- 5- Aggiunta della macro "click" che attiva il puntatore del mouse in corrispondenza del pulsante play di ILOG CPLEX in modo da avviare la risoluzione.

Per prima cosa viene attivata la macro "salvataggio" che consiste nel seguente codice:

Sub salvataggio()

ActiveWorkbook.Save

SetCursorPos 150, 200

mouse_event &H2, 100, 20, 30, GetMessageExtraInfo()

mouse_event &H4, 1000, 100, 40, GetMessageExtraInfo()

SendKeys "{ENTER}", True

End Sub

Questa macro viene attivata poco prima del lancio di Ilog Cplex. La prima riga di codice si preoccupa di salvare il file mentre la seconda parte sposta il puntatore del mouse ed esegue un doppio click in corrispondenza delle coordinate indicate. Mettendo la finestra di Ilog Cplex in corrispondenza del puntatore si avvia la risoluzione.

Questo espediente si è rivelato necessario dal momento in cui non era possibile effettuare un accesso più diretto ai file necessari al lancio della risoluzione.

In seguito alla risoluzione del problema si leggono i dati da “outputcplex.xls” mediante la macro “aggiornamento”

Sub aggiornamento()

ActiveWorkbook.UpdateLink Name:="D:\Prova\outputcplex.xls", Type:=xlExcelLinks

End Sub

Appendice B. L'infrastruttura della simulazione: Arena 13.0.

In questa sezione viene presentato il funzionamento della parte principale della simulazione: la rappresentazione dello shop floor mediante il simulatore Arena 13.0 sviluppato dalla Rockwell Software.

3 Introduzione ad Arena 13.0

Arena 13.0, programma sviluppato e distribuito dalla Rockwell Software, consente di simulare il comportamento di un qualsiasi sistema produttivo mediante la combinazione di appositi blocchi precostituiti.

Per prima cosa è necessario aggiungere alla libreria di Arena i blocchi necessari alla simulazione non presenti nei Basic Process nel seguente modo:

File-> Template Panel -> Attch -> Advanced process

Una volta aggiornata la libreria si può procedere con la costruzione del sistema produttivo.

In particolare ai fini di una corretta simulazione è necessario creare all'interno di un unico file tre sistemi differenti aventi compiti diversi, dalla simulazione vera e propria dello shop floor, alla simulazione dello scorrere dei giorni.

I tre differenti sistemi da simulare sono i seguenti:

- Gestione del tempo e attivazione macro
- Simulazione dello shop floor
- Gestione delle code

Nel primo sistema di gestione del tempo e attivazione macro, viene creata una entità giornaliera denominata "Giorno", utile a sincronizzare il passare del tempo con lo shop floor, ad attivare i moduli di lettura e scrittura da file per estrarre dal foglio excel i dati necessari e scrivere poi su txt i report della simulazione. Tale entità inoltre si occupa di attivare la macro utile a passare dalla schermata di Arena a quella di Excel necessaria per la conduzione di simulazioni in modalità non presidiata.

Nel secondo sistema di simulazione dello shop floor vengono create giornalmente tante entità quante sono gli ordini rilasciati dall'algoritmo di limitazione o di bilanciamento. Anche in questo caso le singole entità si occupano di attivare i blocchi di lettura e scrittura da file necessari per conoscere i tempi produttivi di ogni singolo ordine e altri valori di interesse come i riciccoli o le due date.

Infine nel terzo sistema di gestione delle code viene creata una singola entità al termine di ogni giornata lavorativa responsabile del calcolo di alcune variabili necessarie per la determinazione delle code alle macchine, dei tempi di produzione giornalieri e altri parametri di interesse.

Una spiegazione molto più dettagliata ed approfondita circa il funzionamento delle singole parti e le motivazioni che hanno portato allo sviluppo di un sistema composto in questo modo sarà mostrata nei prossimi paragrafi.

Per velocizzare lo svolgimento delle simulazioni si è rivelato necessario un piccolo accorgimento per quanto riguarda la scrittura dei report per le analisi successive. Inizialmente tutti i dati venivano salvati in un file di excel denominato Storico.xls, questo comportava però dei rallentamenti enormi in quanto il programma Arena faticava a gestire contemporaneamente due file di excel. Si è deciso quindi di scrivere i report su dei file di testo .txt e rielaborarli successivamente a mano, riducendo così i tempi della simulazione di circa 5 volte.

I file creati ad hoc per la scrittura da parte di Arena sono i seguenti:

- Storico_ordini.txt
- Dati_mattina.txt
- Dati_sera.txt

3.1 Il primo sistema: il sistema di gestione del tempo e attivazione delle macro.

Come anticipato in precedenza questa parte si preoccupa di simulare il trascorrere della giornata andando ad attivare in momenti prefissati del giorno i blocchi di lettura e scrittura e i moduli VBA di attivazione delle macro.

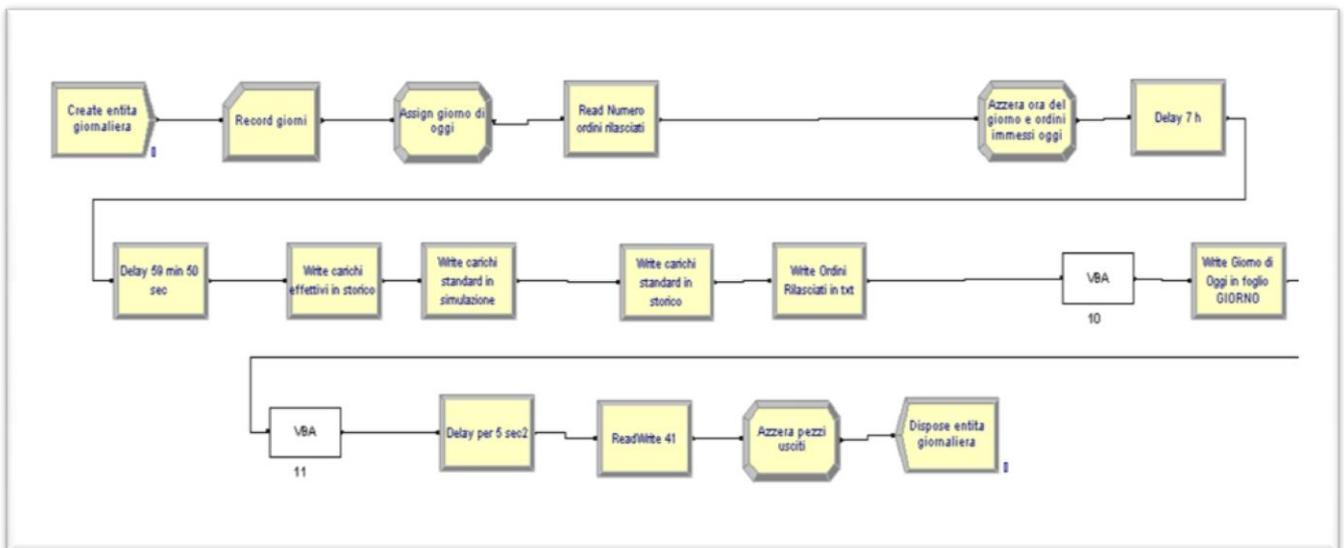


Figura 23 Il sistema di gestione del tempo

Per prima cosa tramite il modulo create, presente nel pannello basic process di Arena, si genera l’entità giornaliera con frequenza pari a otto ore, di modo da creare l’entità “Giornata” all’inizio di ogni giornata produttiva.

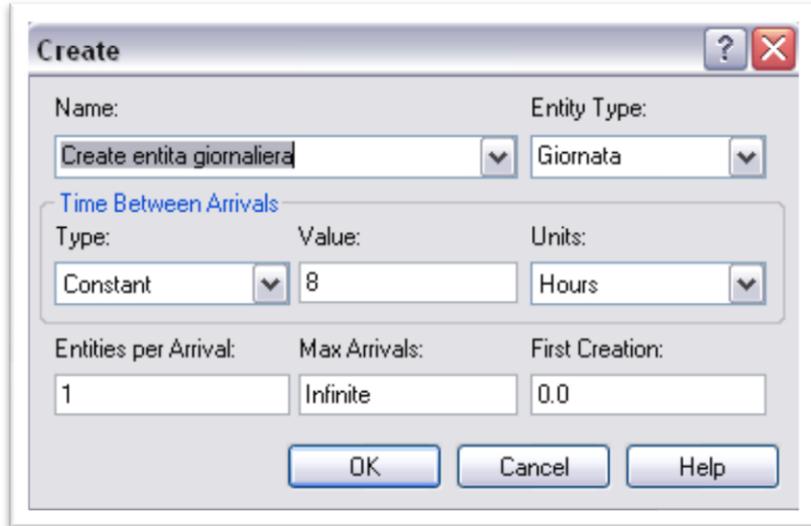


Figura 24 Il modulo di creazione dell'entità giornata

Successivamente l'entità creata passa per un modulo denominato Record giorni che permette di contare il numero di entità transitate. Tale funzione viene utilizzata per aggiornare la giornata simulata, in quanto il modulo Record aumenta di una unità il contatore all'inizio di ogni giorno.

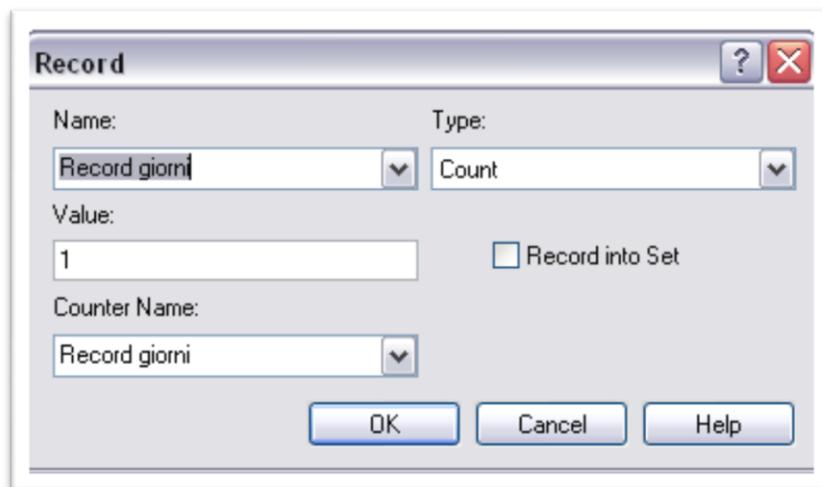


Figura 25 Il modulo Record Giorni

In particolare viene assegnato al contatore lo stesso nome del modulo di pertinenza. Questi accorgimenti rendono più semplice e veloce la creazione e l'utilizzo di Arena.

Una volta definito il contatore è necessario assegnarne il valore a una variabile denominata "Oggi", che nel corso della simulazione avrà il compito fondamentale di attivare la macro presente nella cella A1 del file di Excel necessaria all'attivazione del modello di bilanciamento o dell'algoritmo di limitazione.

Si utilizza quindi un modulo Assign che consente di assegnare i valori voluti alle variabili e attributi del sistema.

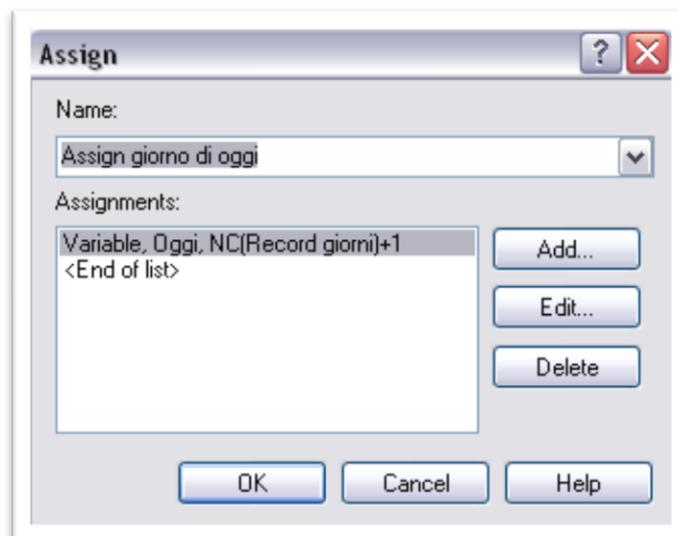


Figura 26 Il modulo Assign giorno di oggi

Per assegnare il valore del contatore alla variabile giorno è possibile richiamare la funzione già presente in Arena NC() inserendo tra parentesi il nome della variabile che si vuole assegnare. In particolare al valore ottenuto tramite contatore viene aumentato di una unità in quanto il primo rilascio viene fatto a sistema vuoto, di conseguenza prima che il programma Arena entri in funzione.

L'entità passa ora in un modulo ReadWrite che si occupa di leggere dal file di Excel alcuni valori di interesse come il numero di ordini rilasciati, gli ordini presenti in PSP, gli ordini appena giunti a sistema. Per leggere dati da un file Excel è necessario definire i nomi delle celle di riferimento mediante l'apposito comando che si può trovare facilmente nella sezione formule del programma. Una volta definiti i nomi delle celle è necessario creare dei riferimenti in Arena mediante il blocco

File, facilmente individuabile nella sezione Advanced Process. L'intero procedimento non viene illustrato in quanto questa appendice è creata allo scopo di fornire una spiegazione strutturata del funzionamento dell'infrastruttura più che della sua realizzazione vera e propria.

Nella finestra Record Number del modulo ReadWrite è necessario inserire come valore il contatore appena calcolato, di modo che ogni giorno Arena legga la riga successiva della tabella.

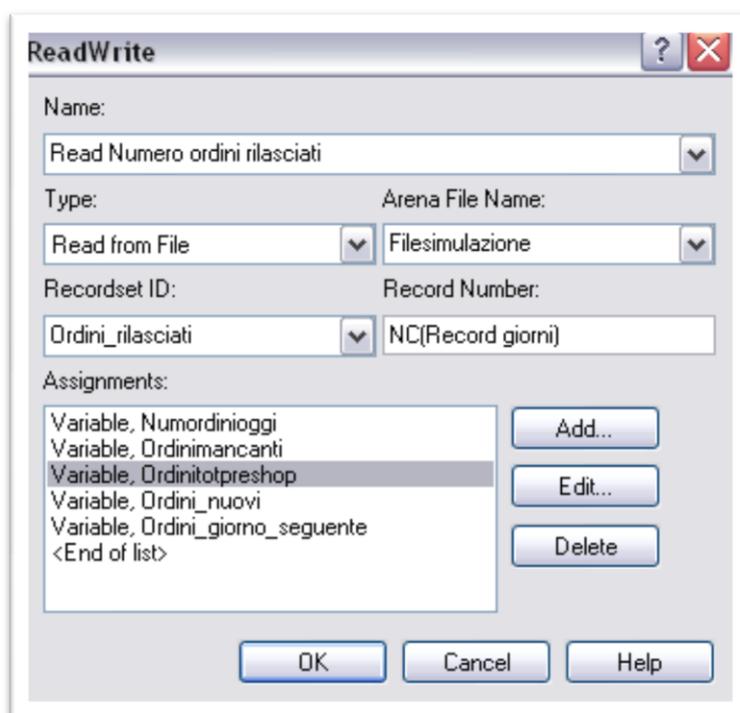


Figura 27 Il modulo di lettura degli ordini rilasciati

Il successivo modulo Assign consente di azzerare il numero di ordini immessi nel sistema, una variabile che viene utilizzata nella simulazione dello shop floor allo scopo di immettere nel sistema la quantità esatta di pezzi rilasciati. Viene calcolata inoltre la cumulata degli ordini rilasciati, utile per verificare il controllo degli input e degli output del sistema.



Figura 28 Il modulo Assign per azzerare gli ordini rilasciati

Una volta effettuate queste operazioni preliminari, l'entità viene inserita in due blocchi Delay in serie che la trattengono per tutta la giornata, rilasciandola a dieci secondi dalla fine.

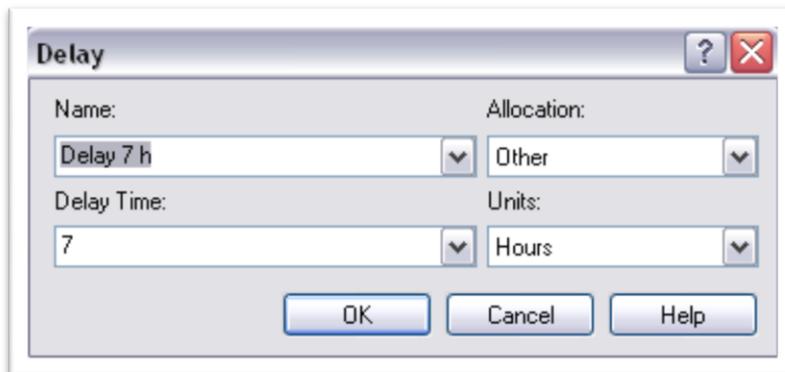


Figura 29 Il modulo Delay 7 ore

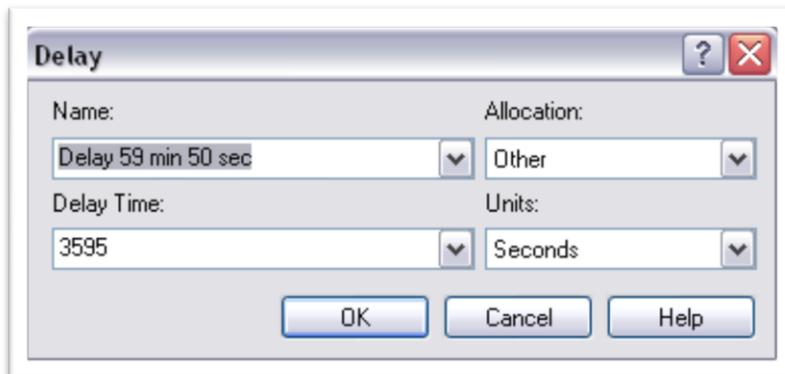


Figura 30 Il modulo Delay 59 minuti e 50 secondi

Si effettua il rilascio a dieci secondi dalla fine in modo da poter attivare le macro necessarie al bilanciamento dei carichi di lavoro e dell'algoritmo di limitazione.

Prima dell'attivazione della macro è opportuno creare una serie di moduli ReadWrite che vadano a scrivere sui file di report i valori dei carichi sia effettivi che standard; è inoltre necessario scrivere i carichi delle macchine sul file di Excel in modo tale da conoscere lo stato del sistema al momento del rilascio.

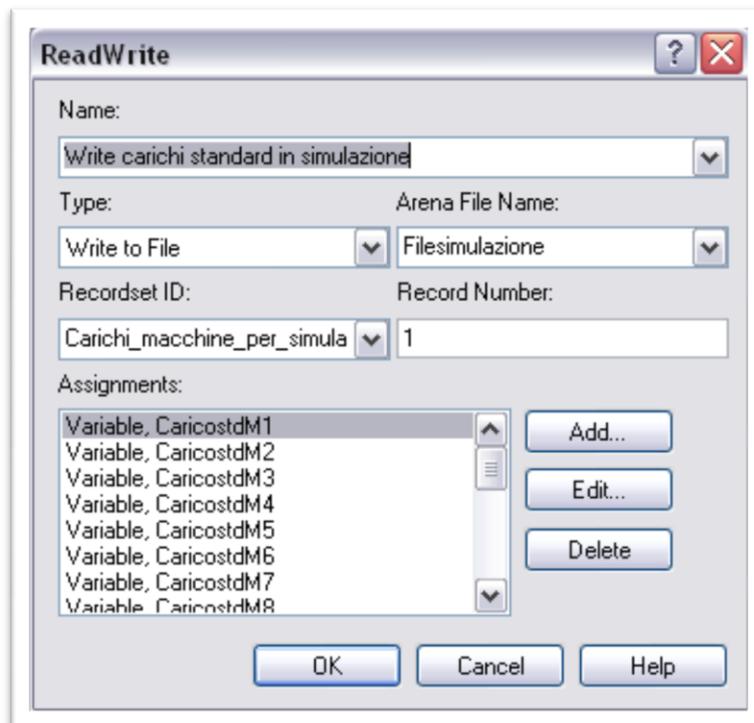


Figura 31 Il modulo ReadWrite per la scrittura dei carichi nel file di simulazione

Nella finestra Record Number viene inserito il valore uno in modo che Arena scriva sempre sulla prima riga delle celle nominate.

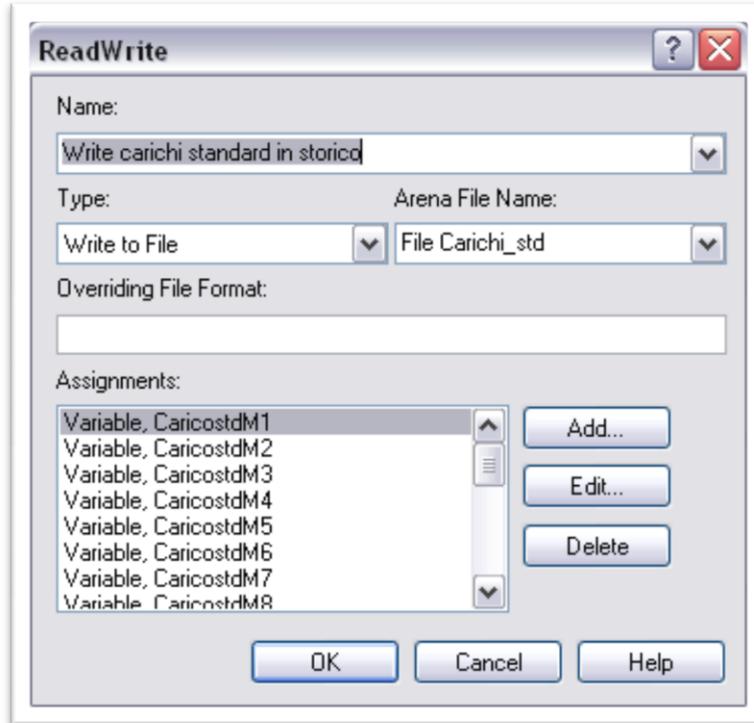


Figura 32 Il modulo ReadWrite per la scrittura dei carichi nel file di report

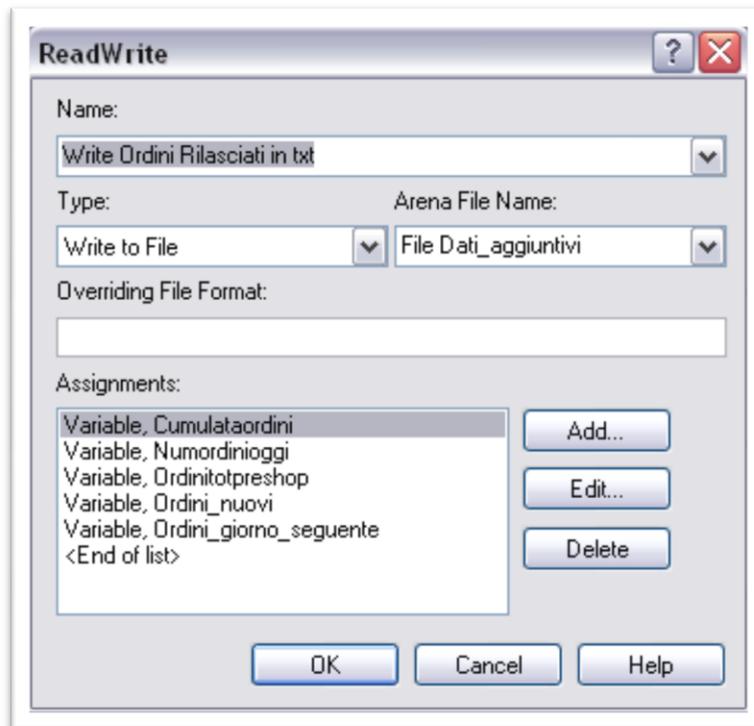


Figura 33 Il modulo ReadWrite per la scrittura dei dati aggiuntivi nel file di report

Ultimate le scritture l'entità passa nel primo modulo VBA che serve a mettere in primo piano la finestra di Excel, in modo da effettuare le simulazioni in modalità non presidiata, senza che sia necessario passare manualmente da una finestra all'altra.

Il codice inserito all'interno del modulo VBA è il seguente:

```
Private Sub VBA_Block_10_Fire()  
  
Dim definitivo As Object  
  
Set definitivo = GetObject("C:\Prova\definitivo.xls")  
  
definitivo.Application.Visible = True  
  
  
  
definitivo.Sheets("resetta psp").Select  
  
cambio1 = definitivo.Worksheets("resetta psp").Range("a1")  
  
definitivo.Worksheets("resetta psp").Range("a1") = cambio1 + 1  
  
End Sub
```

Il significato di questa macro è il seguente: la prima parte si preoccupa di passare in primo piano la finestra di Excel per evitare blocchi durante la simulazione. La seconda parte invece si preoccupa di attivare la macro necessaria al reset della PSP definita “ da copiare1 “ il cui funzionamento è stato spiegato nella sezione relativa ad Excel.

Inserendo questa stringa all'interno del modulo1 della gestione progetti e il codice mostrato in precedenza in ThisDocument il tutto funziona senza problemi.

Il successivo modulo ReadWrite consente la scrittura nella casella A1 del foglio Giorno di Excel, necessaria all'attivazione delle macro.

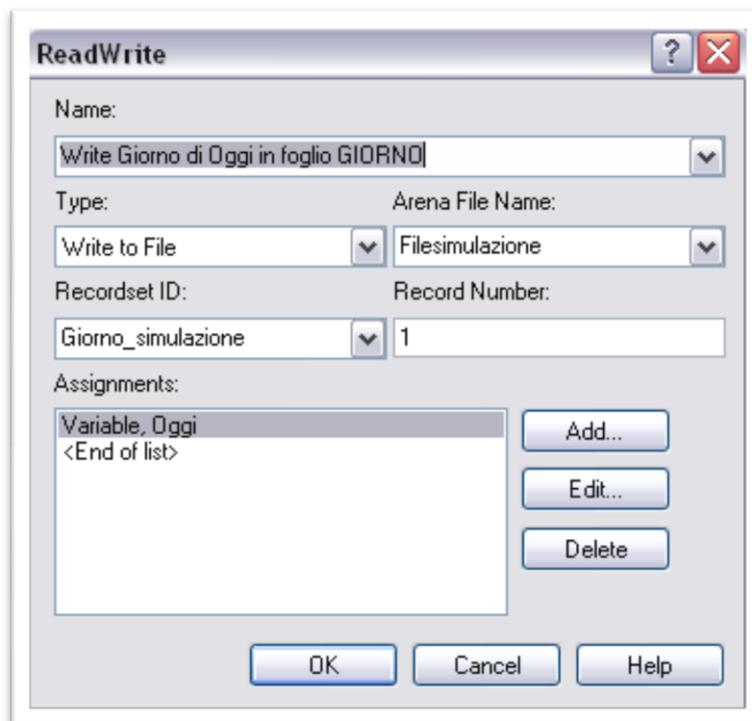


Figura 34 Il modulo ReadWrite per l'attivazione delle macro in Excel

Successivamente viene inserito un nuovo modulo VBA che svolge una funzione simile al primo ovvero si preoccupa di passare in primo piano la finestra di Excel ed attiva la macro definita “ pspdopo2 “ necessaria all’aggiornamento della Preshop Pool in seguito al rilascio dei job nel sistema.

Il codice contenuto nel blocco è il seguente:

```
Private Sub VBA_Block_10_Fire()
```

```
Dim definitivo As Object
```

```
Set definitivo = GetObject("C:\Prova\definitivo.xls")
```

```
definitivo.Application.Visible = True
```

```
definitivo.Sheets("2parteedd").Select
```

```
cambio3 = definitivo.Worksheets("2parteedd").Range("a1")
```

definitivo.Worksheets("2parteedd").Range("a1") = cambio3 + 1

End Sub

Nella parte finale della gestione del tempo si scrivono il numero di job usciti giornalmente dal sistema e li si azzerà, in modo da trovare poi nel report il numero di job usciti ogni giorno. Infine si fanno trascorrere gli ultimi cinque secondi della giornata e di distrugge l'entità tramite il modulo Dispose.

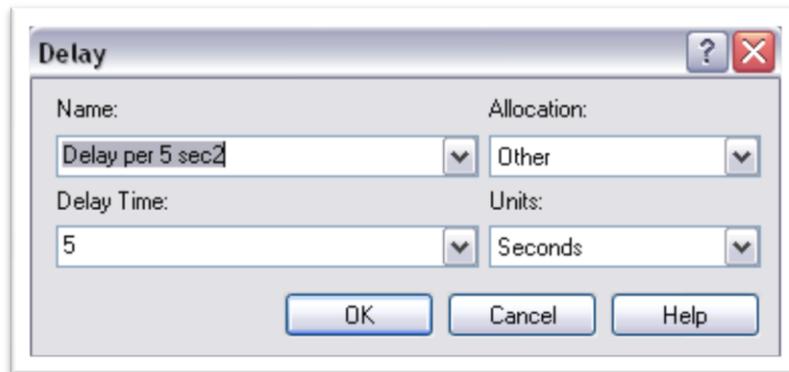


Figura 35 Delay per cinque secondi

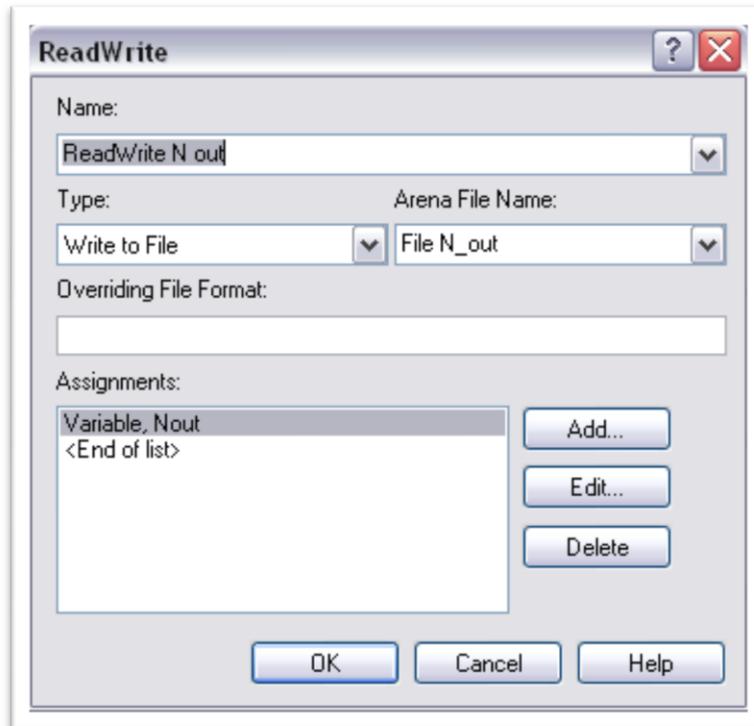


Figura 36 Il modulo ReadWrite per scrivere i pezzi usciti in giornata

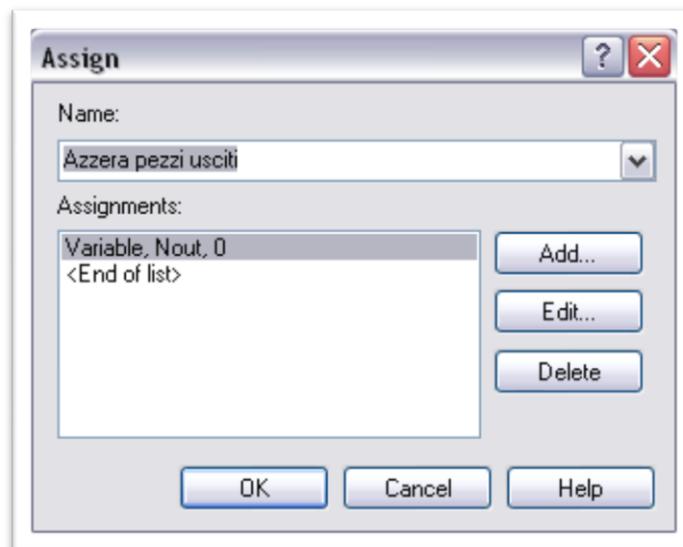


Figura 37 Modulo Assign per azzerare il Numero di Job usciti

3.2 Il secondo sistema: il sistema di simulazione dello shop floor.

Il sistema di simulazione dello shop floor è il cuore vero e proprio della simulazione grazie al quale è stato validato il modello di bilanciamento oggetto di tesi. La creazione dello shop floor ha richiesto l'utilizzo di un gran numero di blocchi, superiori al centinaio, che consentissero di simulare il comportamento di un sistema reale. Per una migliore comprensione della procedura utilizzata si suddivide il sistema in quattro parti fondamentali:

1. Parte prima: l'ingresso degli ordini nello shop floor
2. Parte seconda: la simulazione della singola stazione
3. Parte terza: l'attesa delle varie componenti nel punto di assemblaggio
4. Parte quarta: l'uscita degli ordini dal sistema.

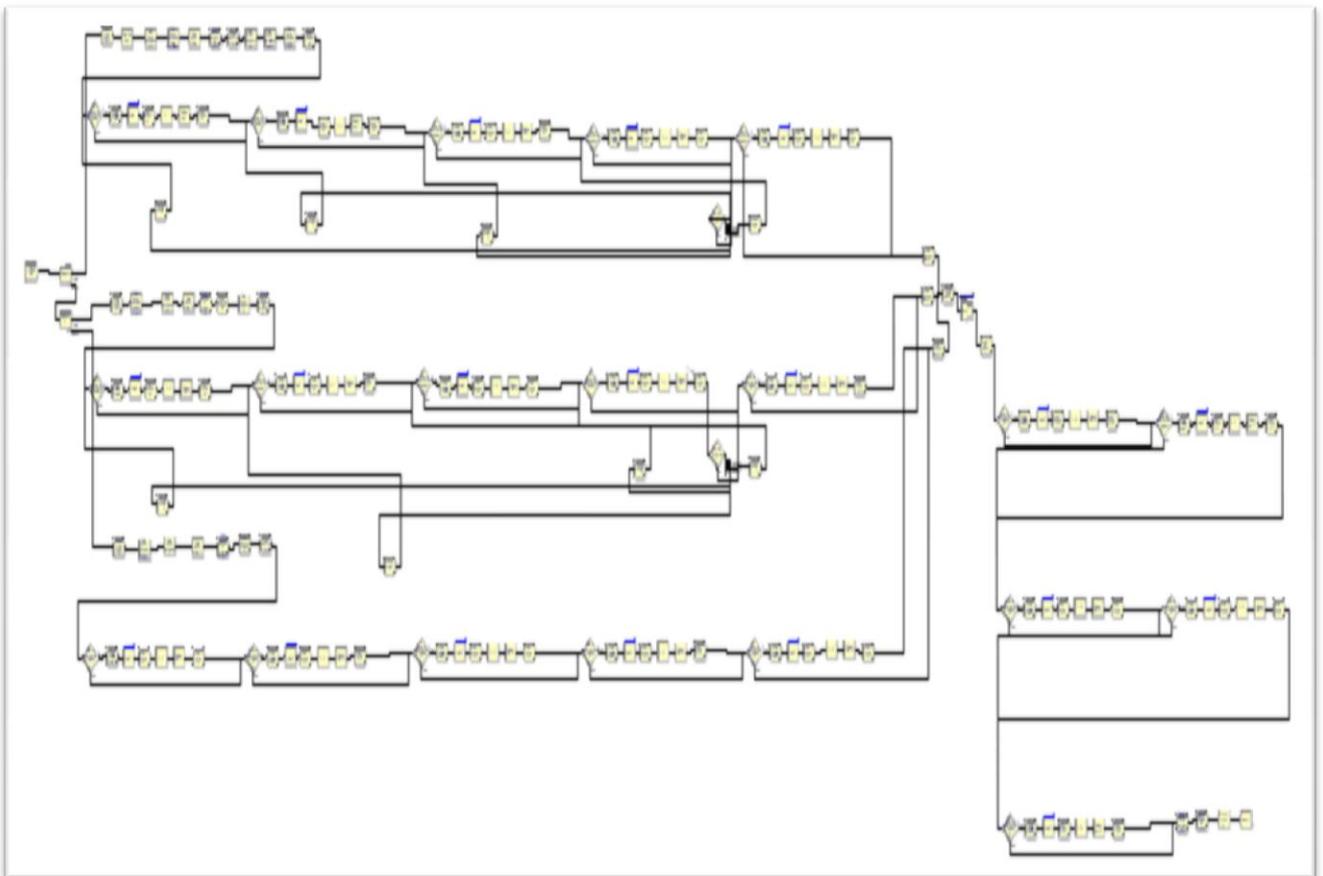


Figura 38 Il sistema di simulazione dello shop floor

3.2.1 Parte prima: L'ingresso degli ordini nello shop floor

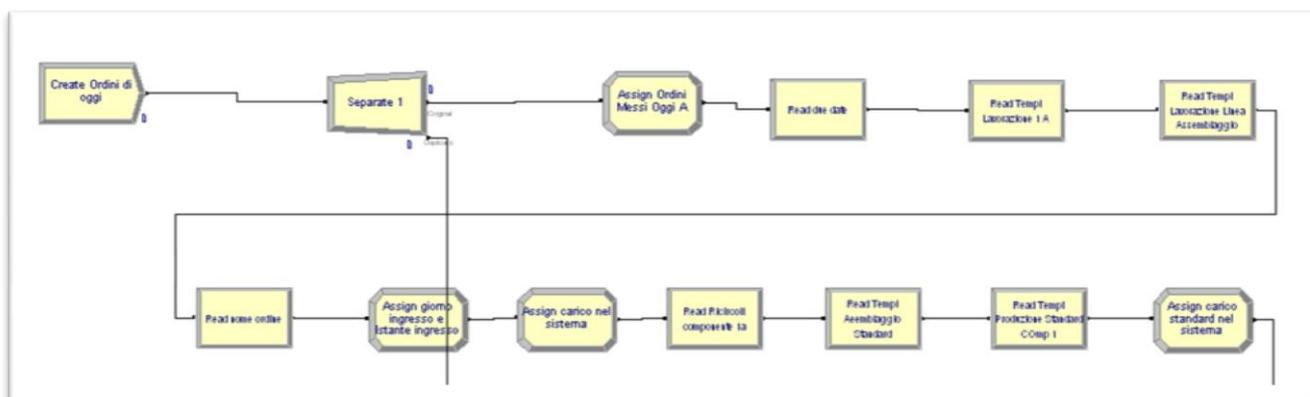


Figura 39 L'ingresso degli ordini nello shop floor

Questa parte del sistema si preoccupa di creare gli ordini in ingresso nel sistema e di triplicarli in modo da simulare l'ingresso dei vari componenti del job nelle linee produttive. Unitamente all'ingresso nel sistema una serie di moduli ReadWrite si occupano di leggere due date, tempi di lavorazione, ricircoli, tempi di lavorazione effettivi (comprendenti imprevisti) e il nome dell'ordine. Altri moduli di Assign si occupano invece di aggiornare le variabili del sistema come i carichi alle varie stazioni, la posizione degli ordini all'interno del rilascio giornaliero e il giorno di ingresso nel sistema.

Per prima cosa il modulo Create genera un numero di entità pari al numero di ordini rilasciati, si è inoltre scelto di generare le entità leggermente dopo l'inizio della giornata lavorativa, con circa un millisecondo di differenza. Questo è dovuto al fatto che per generare gli ordini giornalieri è necessario che l'entità Giornata legga dal file di Excel il numero di ordini rilasciati dall' algoritmo di limitazione o dal modello di bilanciamento. Successivamente al modulo Create sono presenti due moduli Separate che duplicano le entità.

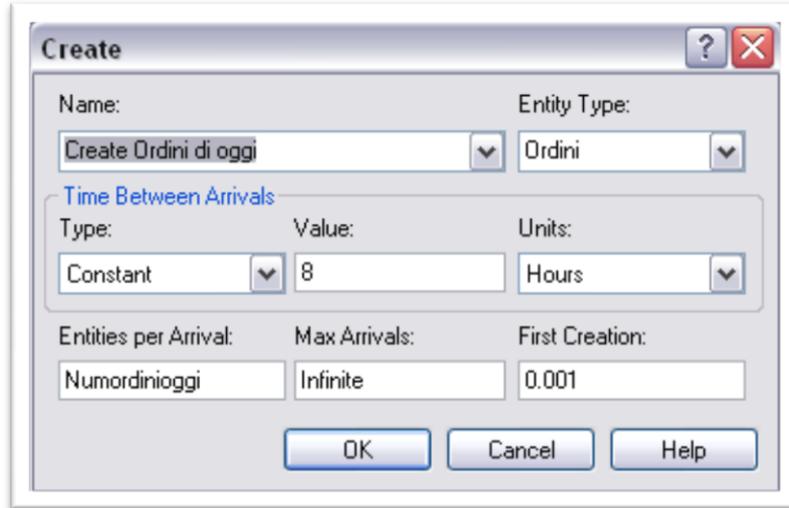


Figura 40 Il modulo Create ordini giornalieri

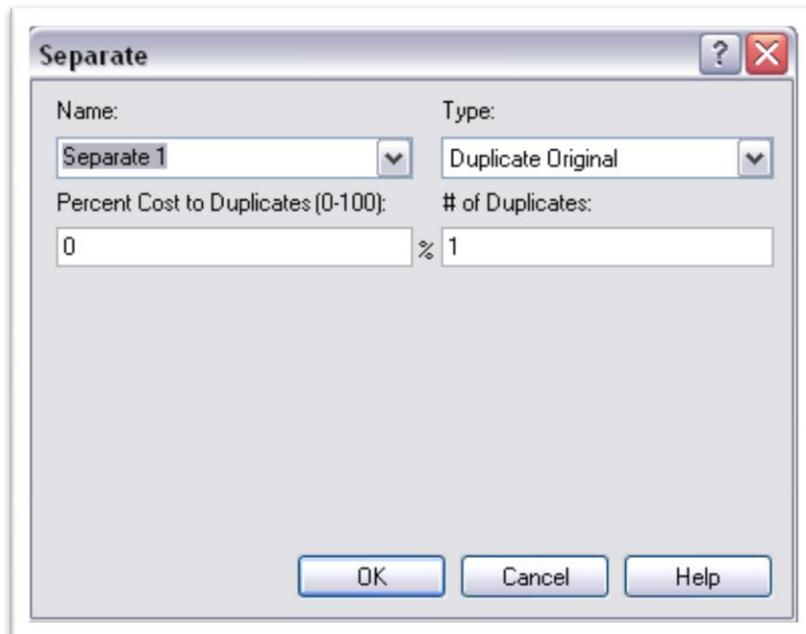


Figura 41 Il Modulo per duplicare le entità

Successivamente gli ordini entrano in un modulo Assign che si preoccupa di assegnare la posizione dell'ordine nel batch giornaliero, di modo che Arena sappia con certezza quali righe delle tabelle di dati leggere nei successivi moduli ReadWrite.

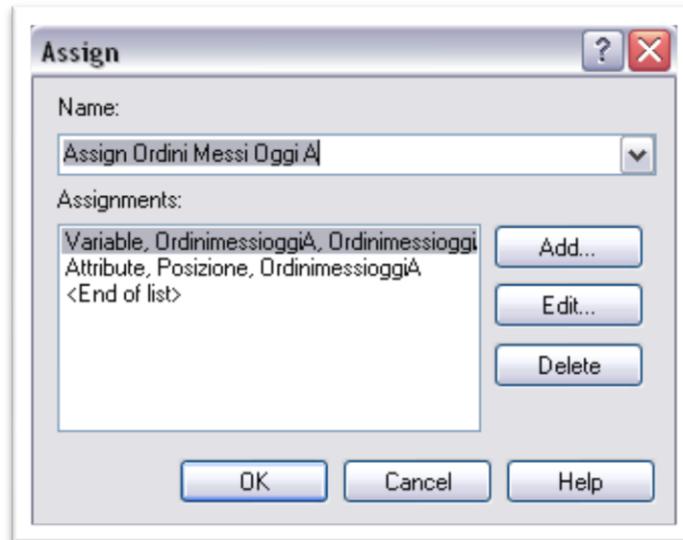


Figura 42 Il Modulo Assign ordini immessi

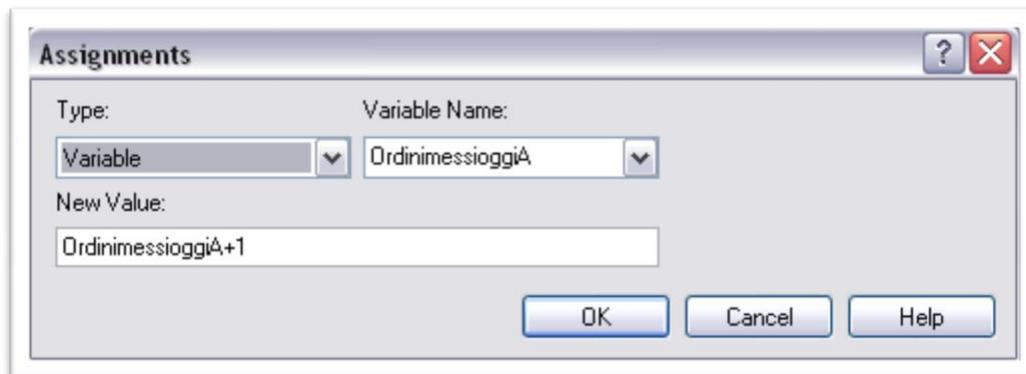


Figura 43 Modalità di assegnazione della posizione

Nei moduli ReadWrite seguenti si effettuano le operazioni di lettura da file dei valori di interesse. Si preferisce riportare tutti i moduli di modo che si possa comprendere meglio i dati necessari per la simulazione.

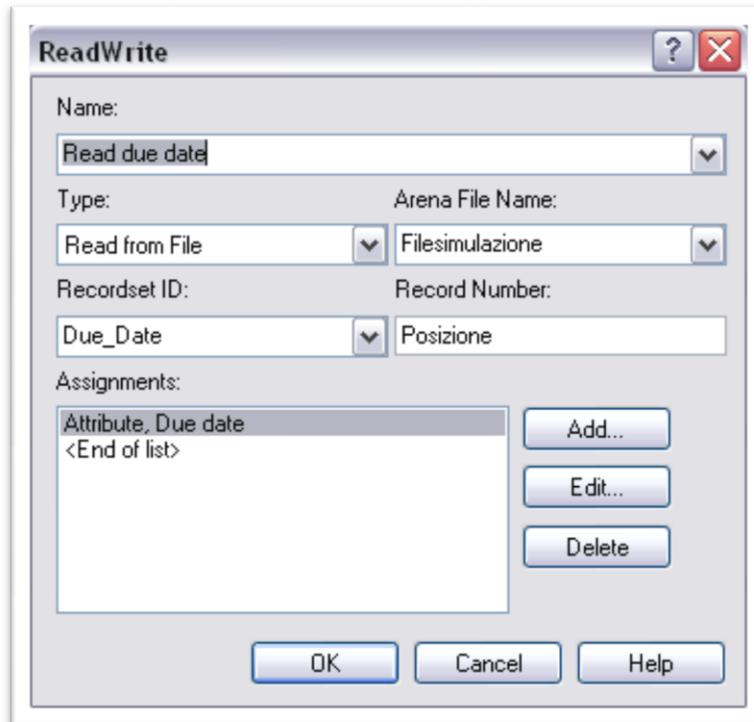


Figura 44 Il modulo di lettura delle Due Date

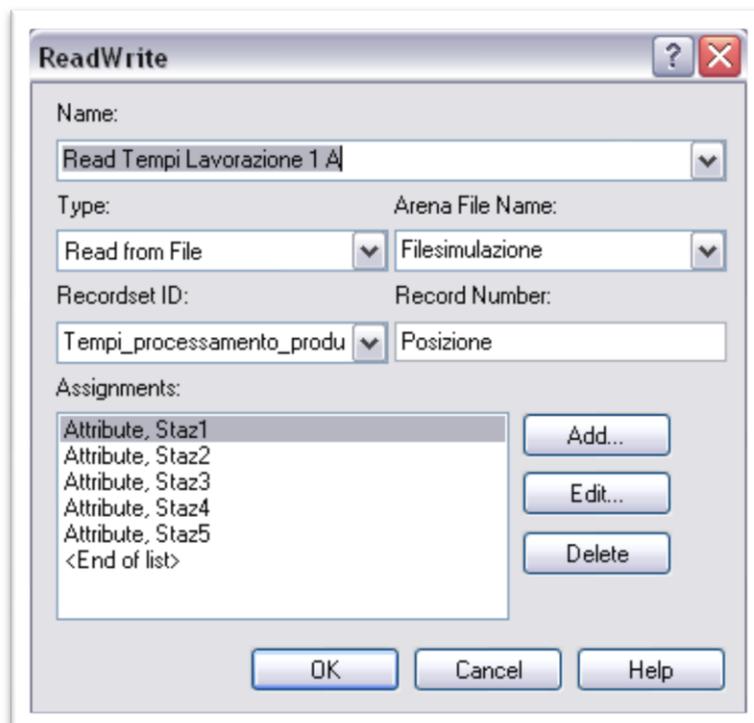


Figura 45 Il modulo di lettura dei tempi di lavorazione

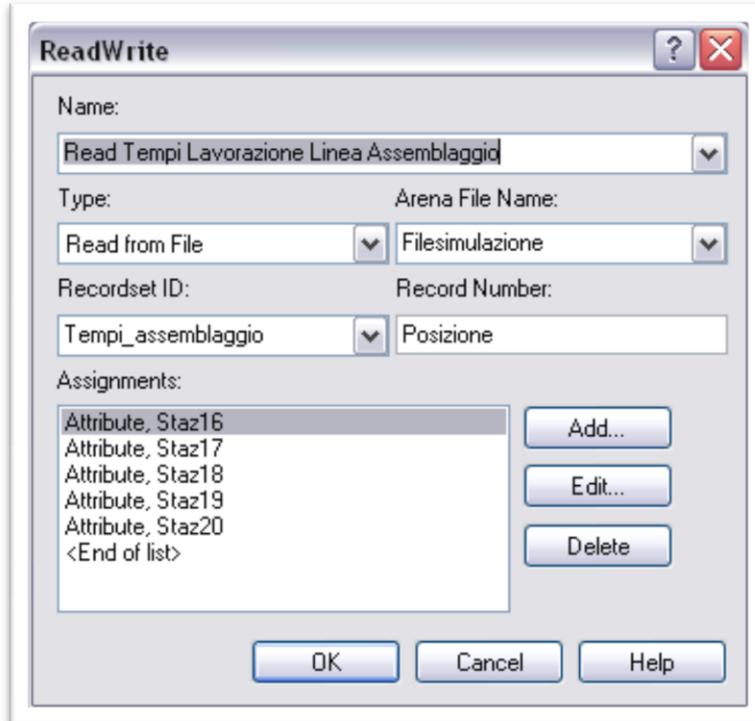


Figura 46 Il modulo di lettura dei tempi di assemblaggio

Come si può notare viene immesso un modulo che permette di leggere i tempi di assemblaggio dei tre componenti. Questo modulo è presente solamente in una delle tre linee di ingresso nel sistema, in modo da poter aggiornare nella giusta maniera i carichi anche per la fase finale di assemblaggio.

Sono inoltre presenti altri tre moduli ReadWrite che leggono:

- Nome Ordine
- Tempi di lavorazione standard
- Tempi di assemblaggio effettivi (solo su una linea)
- Ricircoli

Il successivo modulo Assign consente il calcolo della Due Date, del giorno di ingresso nel sistema e dell'istante di ingresso nel sistema. In particolare per la determinazione dell'istante di ingresso nel sistema si utilizza la funzione tnow di Arena che restituisce l'istante temporale in cui la si attiva.

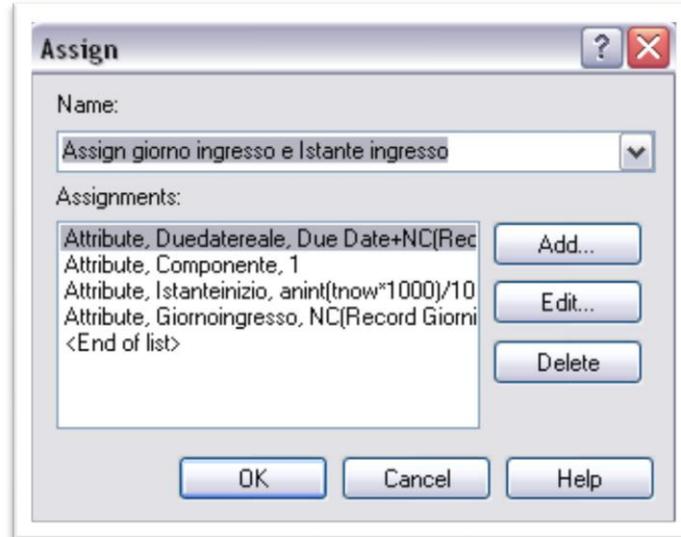


Figura 47 Il modulo Assign istante inizio

Il modulo Assign seguente consente l'aggiornamento dei carichi nel sistema man mano che i job entrano nello shop floor. Per raggiungere questo obiettivo la variabile CaricoMx deve essere maggiorata del tempo di lavorazione nella stazione x del job j.

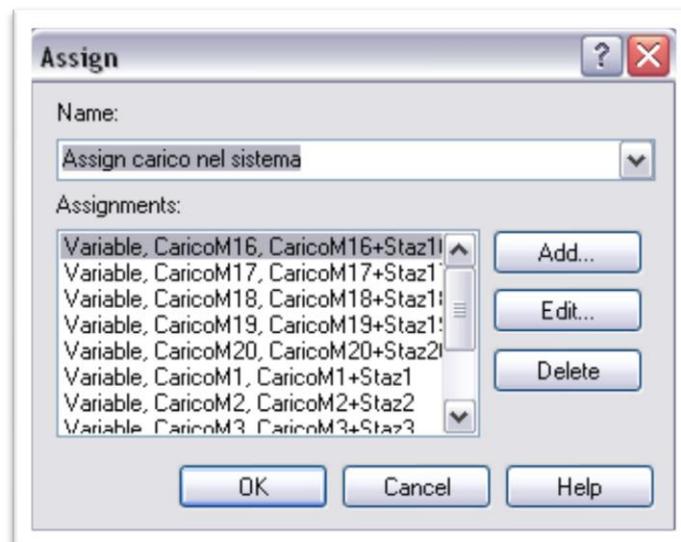


Figura 48 Il modulo di aggiornamento dei carichi di sistema

Una volta superato anche quest'ultimo modulo il job è pronto per entrare nella simulazione vera e propria della fase di lavorazione.

3.2.2 Parte seconda: la simulazione della singola stazione

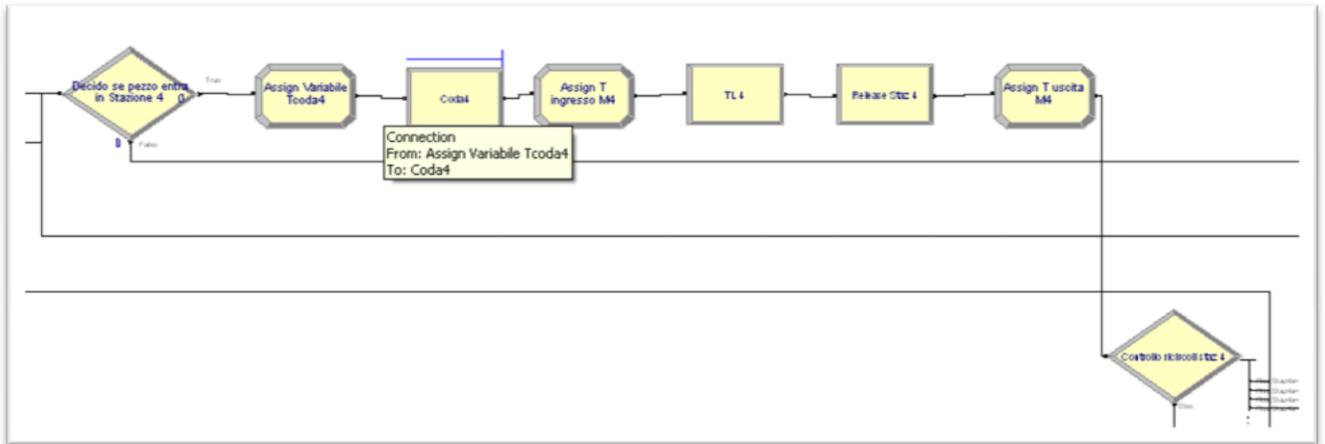


Figura 49 La simulazione della singola stazione

Questa parte del sistema permette la simulazione della lavorazione delle varie stazioni, compresa la modellazione delle stazioni di controllo qualità che fanno ricircolare i componenti nelle stazioni dove le lavorazioni si sono rivelate difettose.

Per prima cosa è necessario simulando dei general job shop decidere se il componente entra nella stazione o deve essere indirizzato nella stazione successiva. Per questo motivo il primo modulo è denominato Decide e permette di decidere in base all'attributo tempo di lavorazione se il job può essere lavorato o meno dalla stazione.

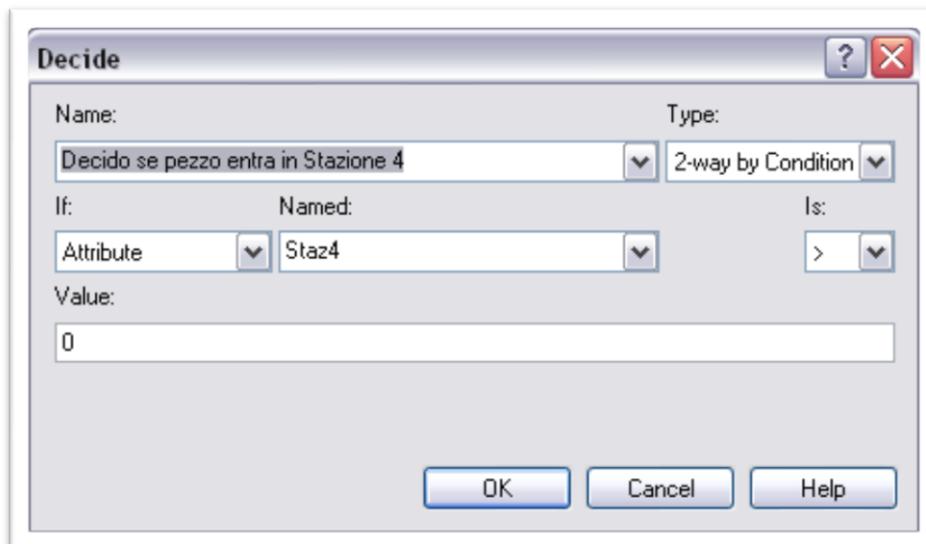


Figura 50 Il modulo Decide ingresso in stazione

Entrato nella stazione il componente aumenta il tempo di coda presente nel buffer mediante il seguente modulo Assign.

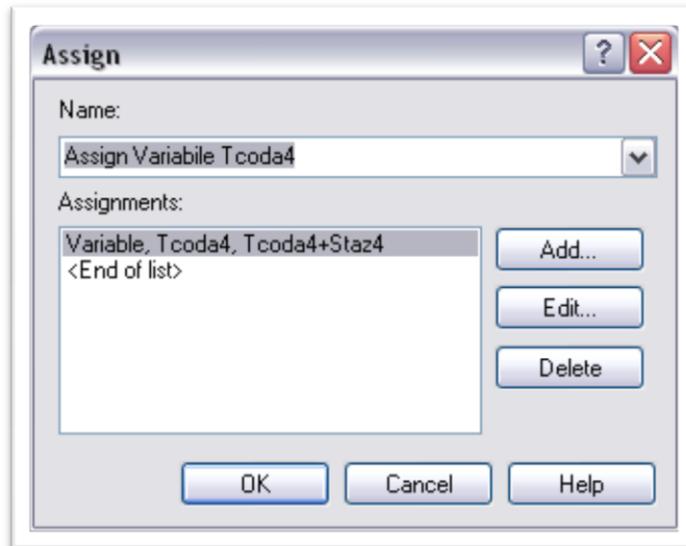


Figura 51 Modulo Assign per calcolo dei tempi coda

Una volta aggiornato il calcolo dei tempi di coda, l'entità entra in un modulo Seize che si occupa di simulare il funzionamento di una coda vera e propria liberando il componente solo nel momento in cui non ha più pezzi davanti e la stazione di pertinenza è libera.

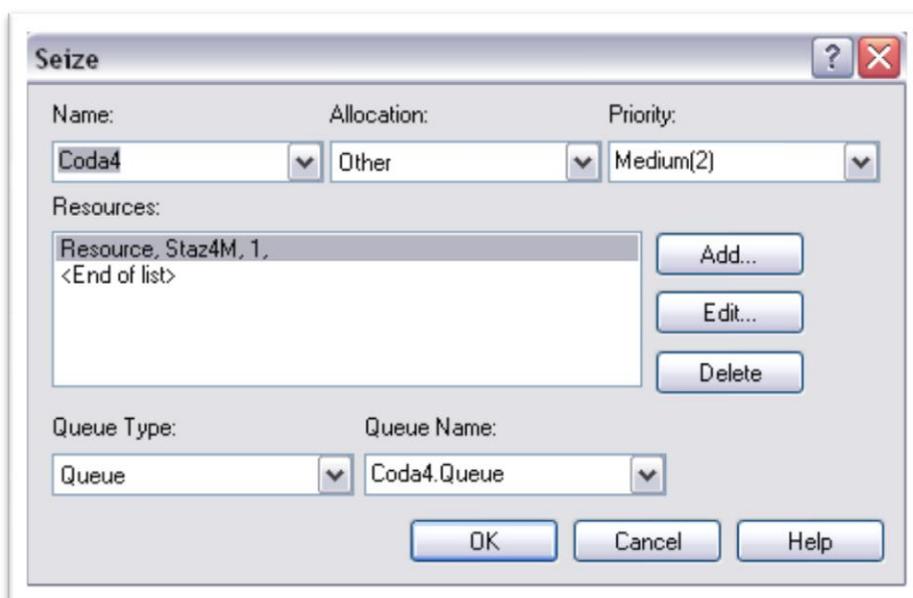


Figura 52 Il modulo Seize per le code

Successivamente poco prima del suo ingresso in macchina l'entità passa attraverso un modulo Assign che si occupa di aggiornare il tempo di coda, di calcolare il tempo di ingresso nella macchina e di modificare alcune variabili necessarie nel modulo di gestione delle code per il calcolo dei tempi produttivi.

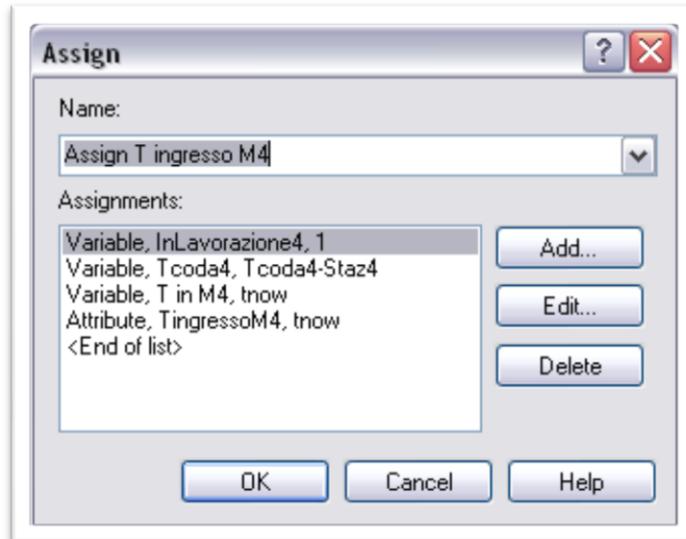


Figura 53 Il modulo Assign per aggiornamento code

Effettuate tutte queste operazioni il componente può finalmente entrare nella macchina per essere lavorato. Tale operazione viene simulata attraverso il modulo Delay che tiene fermo il pezzo per un lasso di tempo pari al tempo di lavorazione. Trascorso questo tempo la macchina viene liberata attraverso il modulo Release.

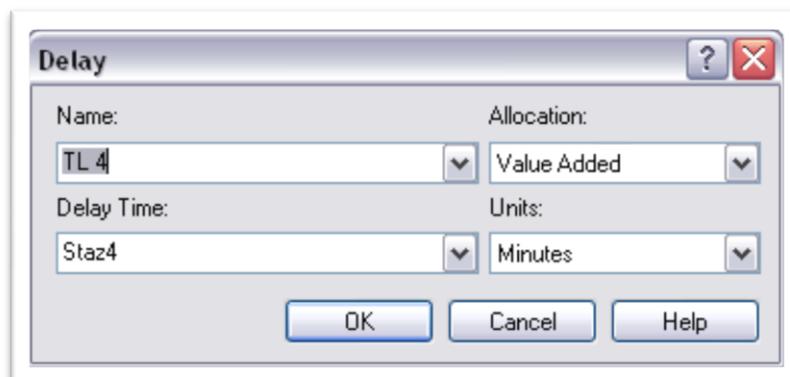


Figura 54 Il modulo Delay

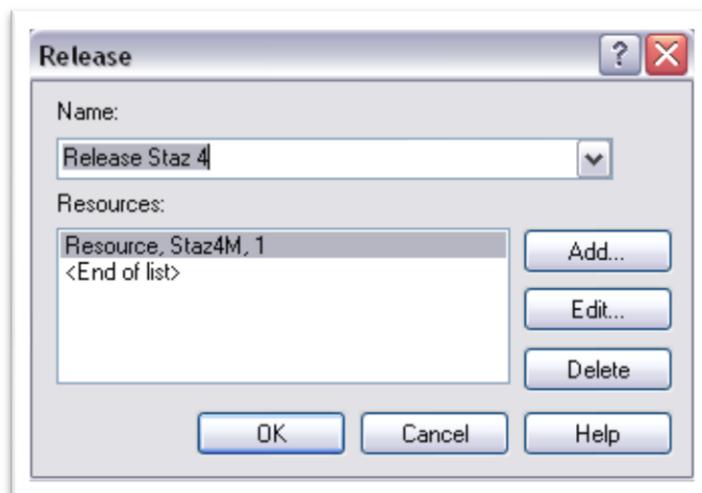


Figura 55 Il modulo Release

Uscita dalla macchina l'entità passa attraverso un modulo assign che consente di aggiornare le variabili definite in precedenza e calcolare gli istanti di uscita del componente. Viene inoltre assegnato all'entità la qualifica di Lavorato che permette di distinguere gli ordini che contano realmente come WIP e quelli che invece sono solamente dei fogli di carta di fronte alle stazioni.

Nel caso in cui la stazione in questione sia una stazione di controllo qualità si introduce un altro modulo Decide che legge il valore dell'attributo Ricircoli e rimanda il componente nella stazione indicata. A valle del modulo di Decide è necessario immettere un modulo Assign che azzeri l'attributo "Ricircoli" del job, in modo da evitare che alla stazione di controllo qualità non superi mai il controllo.

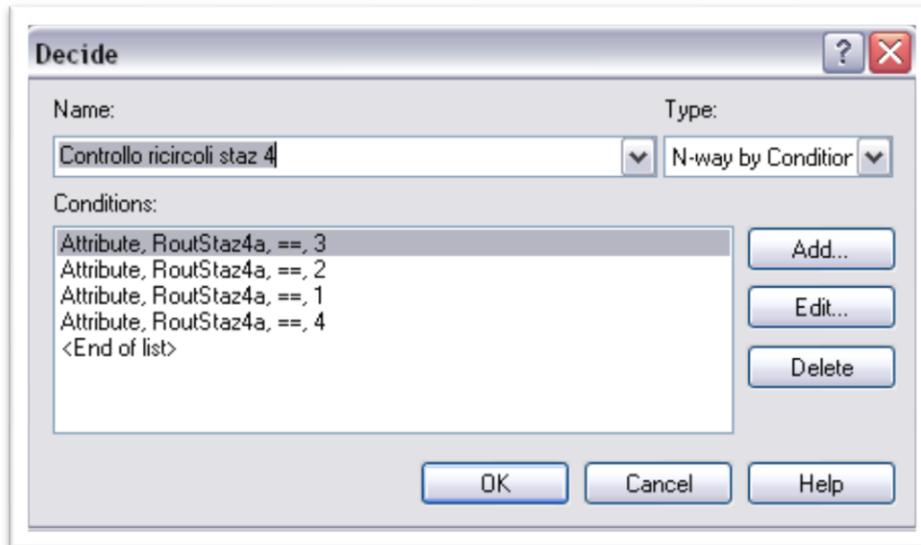


Figura 56 Il modulo per il controllo dei ricircoli

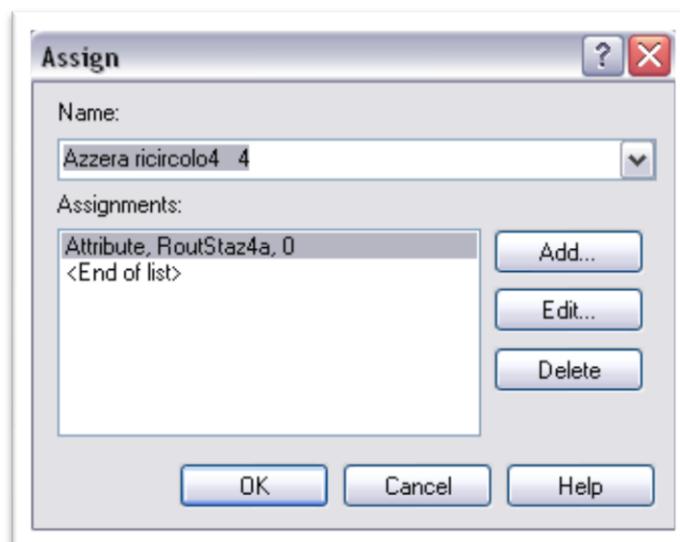


Figura 57 Il modulo assign per azzerare i ricircoli

3.2.3 Parte terza: l'attesa dei vari componenti nel punto di assemblaggio.

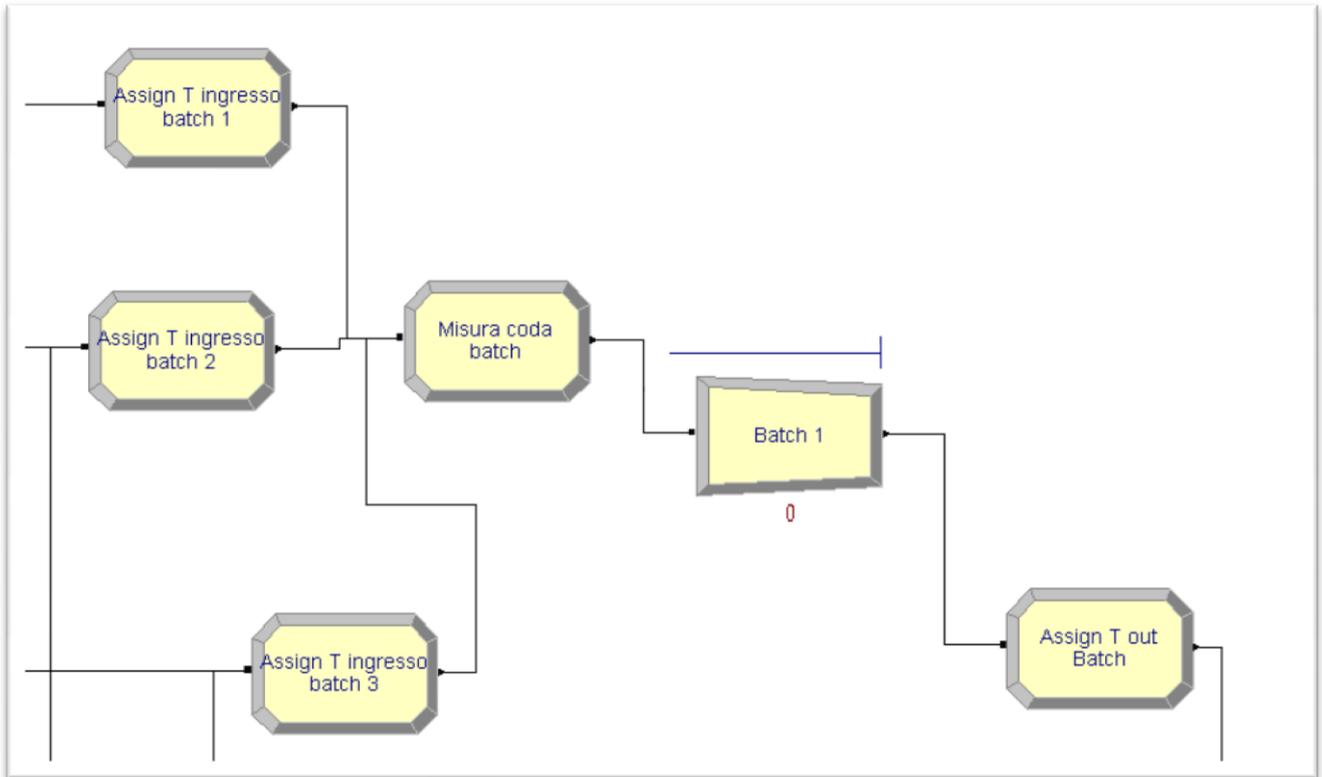


Figura 58 Parte terza: l'attesa nel modulo Batch

Questa terza parte del sistema si occupa di accumulare i componenti che hanno terminato le lavorazioni nelle linee di fabbricazione e di rilasciare tramite il modulo Batch una nuova entità derivante dall'unione delle tre componenti.

I moduli Assign posti al termine di ogni sub linea mostrati in figura consentono di misurare il momento di ingresso nel Batch allo scopo di determinare poi il massimo tempo trascorso dai componenti in attesa.

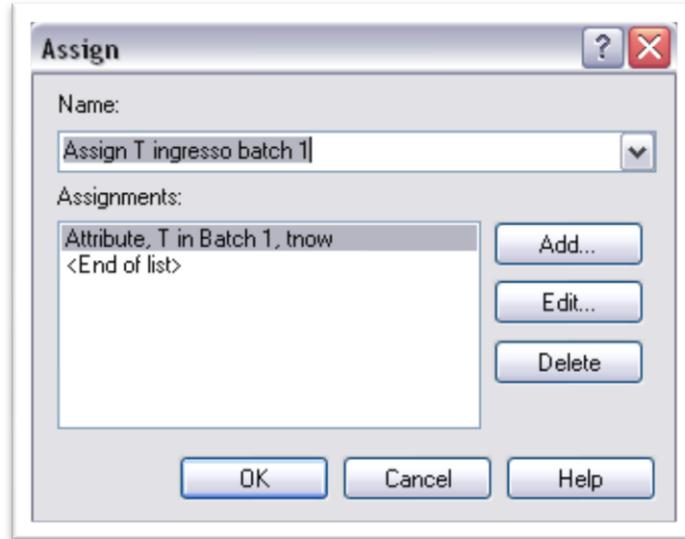


Figura 59 Il modulo Assign istante ingresso Batch

Assegnato l'istante di ingresso del componente nel buffer posto a monte dell'assemblaggio, si utilizza un altro modulo Assign per modificare la dimensione della coda presente in questa parte di sistema.

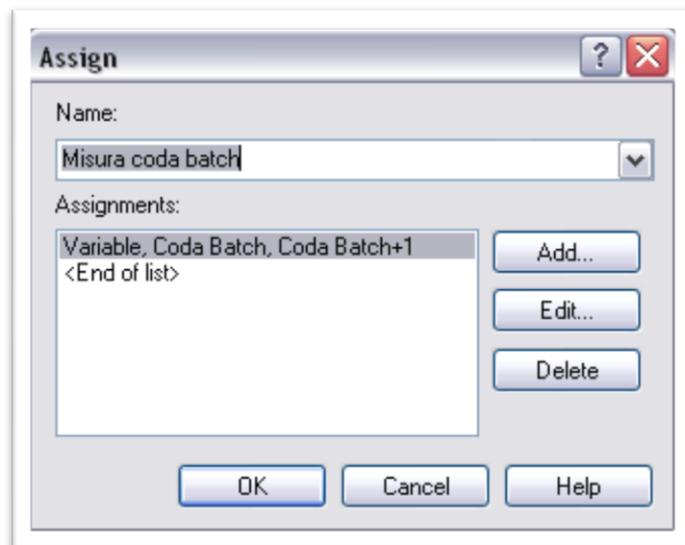


Figura 60 Il modulo Assign pezzi in coda Batch

Ora le varie entità entrano nel Batch dove rimangono in attesa che tutte le altre parti siano pronte. Questo Modulo si occupa di tenere in coda e rilasciare entità a gruppi secondo dei criteri prestabiliti, nel nostro caso il criterio che guida il rilascio è il nome ordine. Nel momento in cui tre entità aventi lo stesso nome si trovano in coda vengono rilasciate formando un'entità unica avente come attributi la somma degli attributi delle tre componenti. Si pone un problema nei valori che gli

attributi comuni come il nome ordine assumono. Per questo motivo nei file di Storico tali attributi vengono divisi per tre.

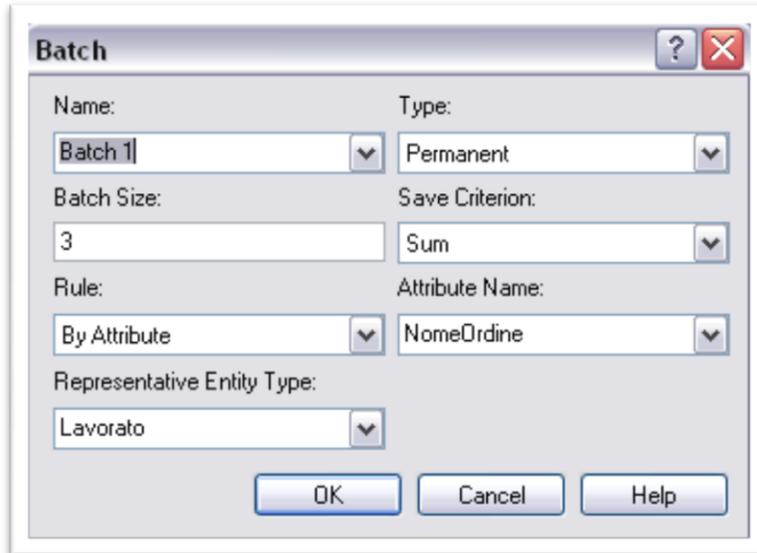


Figura 61 Il modulo Batch

Il modulo di Assign finale si occupa di ricalcolare il numero di pezzi in coda e restituisce il tempo di uscita dal Batch.

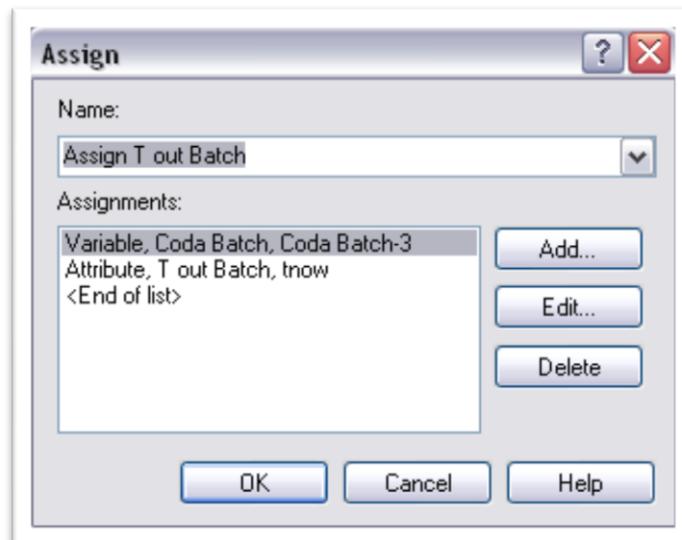


Figura 62 Il modulo Assign di uscita dal Batch

3.2.4 Parte quarta: l'uscita dal sistema.

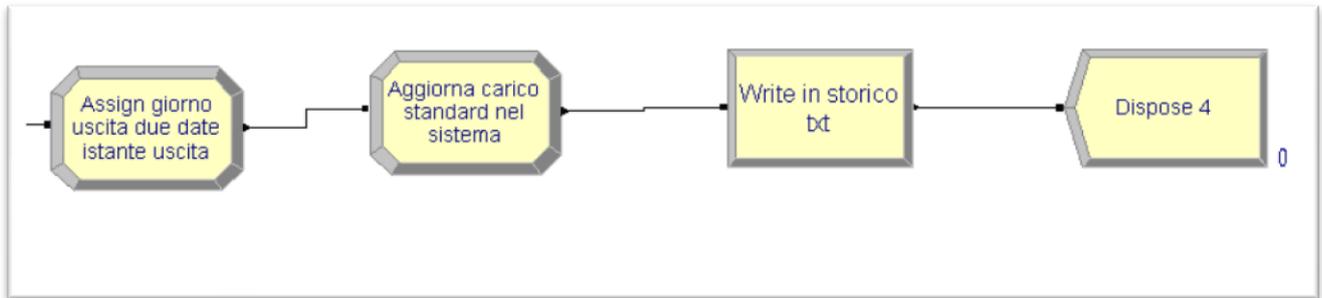


Figura 63 Parte quarta: l'uscita dal sistema

In quest'ultima parte ci si preoccupa di aggiornare i carichi delle stazioni e di salvare una serie di variabili di interesse che serviranno poi per effettuare le necessarie analisi.

Più precisamente i dati che vengono calcolati o aggiornati sono:

- Carichi alle macchine ($\text{CaricoMx} + \text{Stazx}$)
- Nome ordine ($\text{Nome ordine} / 3$)
- Istante fine ($\text{anint}(\text{tnow})$)
- Giorno uscita ($\text{NC}(\text{Record giorni})$)
- Posto ($\text{Posto} + 1$)
- Riga in storico (Posto)
- Carichi effettivi alle macchine ($\text{Carichi eff Mx} + \text{StazEff x}$)

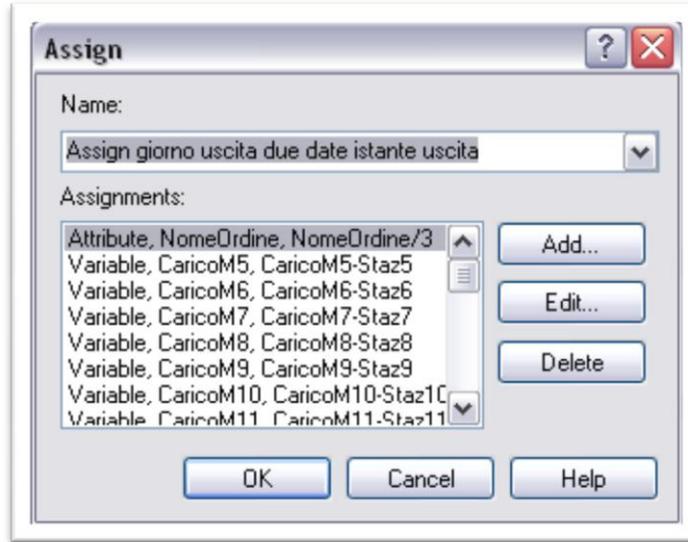


Figura 64 Il modulo Assign di aggiornamento dati in uscita

Successivamente i dati vengono salvati mediante un modulo ReadWrite apposito che scrive tutto in Storico_Ordini.txt.

Oltre ai dati appena calcolati vengono scritti gli istanti di ingresso e uscita dal sistema, dalle singole stazioni e dal Batch, in modo da avere un quadro temporale completo del percorso del job.

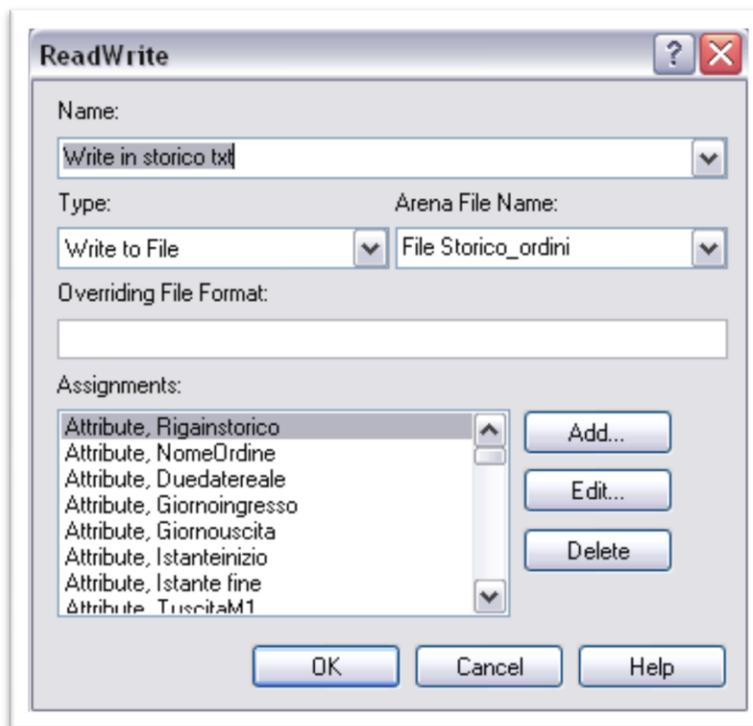


Figura 65 Il modulo ReadWrite storico ordine

3.3 Il quarto sistema: il sistema di gestione delle code.

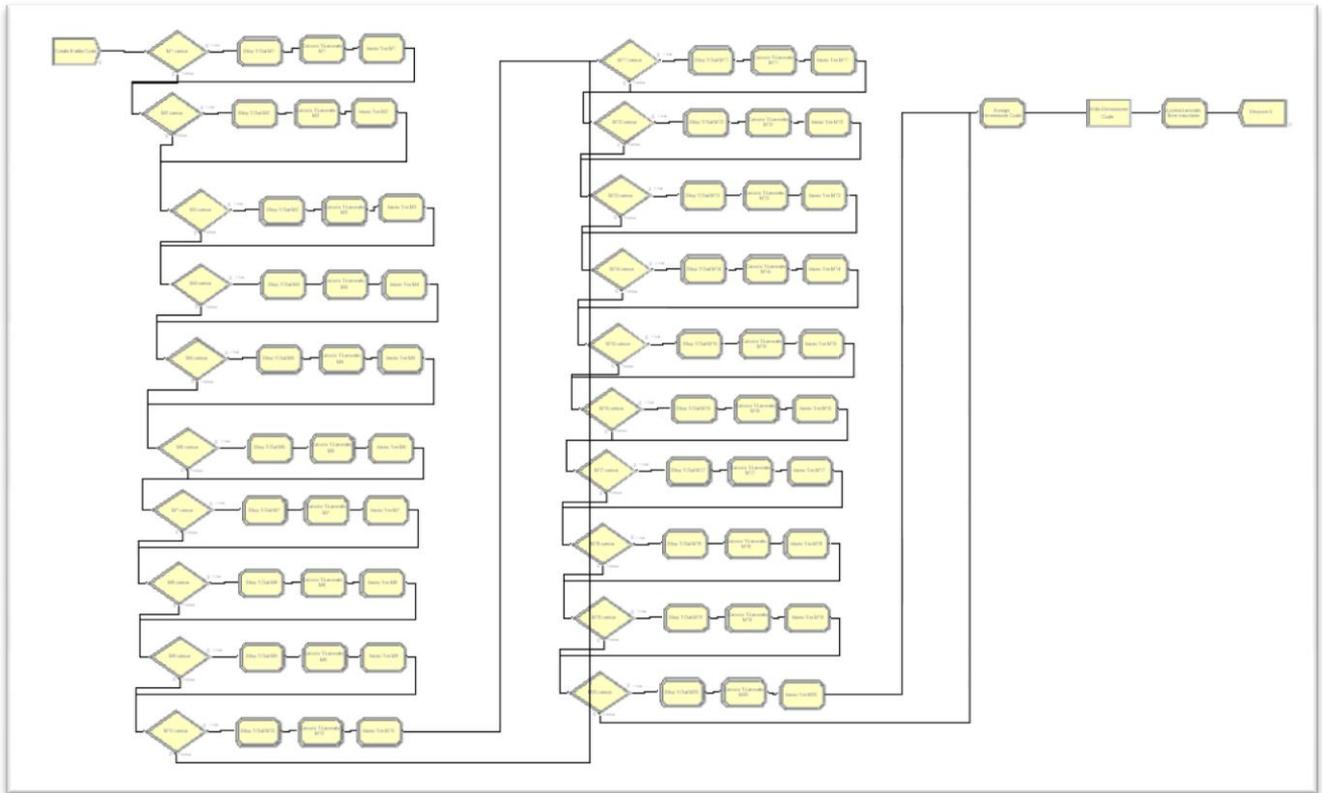


Figura 66 Il quarto sistema: il sistema di gestione delle code.

Quest'ultima parte ricopre un ruolo fondamentale per i vari file di storico consentendo un rapido calcolo dei tempi di lavorazione delle singole macchine in ogni giornata e dei pezzi in coda in ogni stazione.

Per prima cosa il modulo Create crea l'entità "Coda" alla fine della giornata lavorativa in modo da ricavare le prestazioni del sistema dopo esattamente otto ore di lavoro.

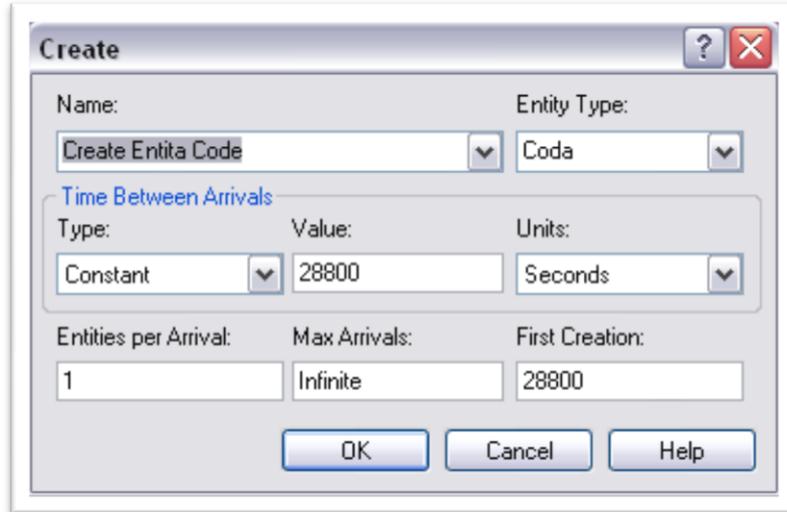


Figura 67 Il modulo Create entità coda

L'entità si trova ora a superare una serie di moduli uguali per ogni macchina necessari per la misura delle performance. Viene riportato in seguito uno dei venti sottosistemi utilizzati riferito alla stazione uno.

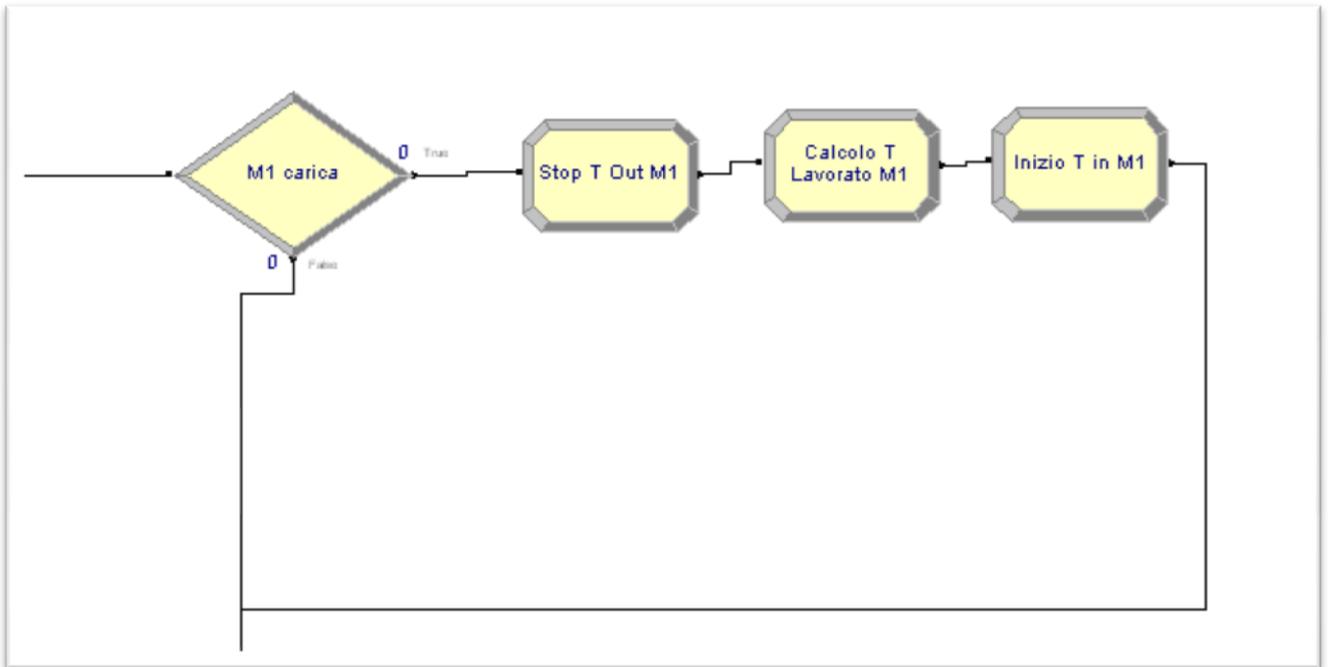


Figura 68 Il sottosistema di misurazione prestazioni singola macchina

Per prima cosa il modulo Decide come per l'ingresso in macchina si preoccupa di capire se la stazione è in lavorazione al termine della giornata. Se così è il tempo di lavorazione della stazione viene maggiorato solo del quantitativo effettivamente lavorato fino all'ora otto. Il restante contenuto

di lavoro del job viene rimandato al giorno successivo. Queste operazioni vengono effettuate dai moduli di Assign successivi, mostrati nelle prossime figure.

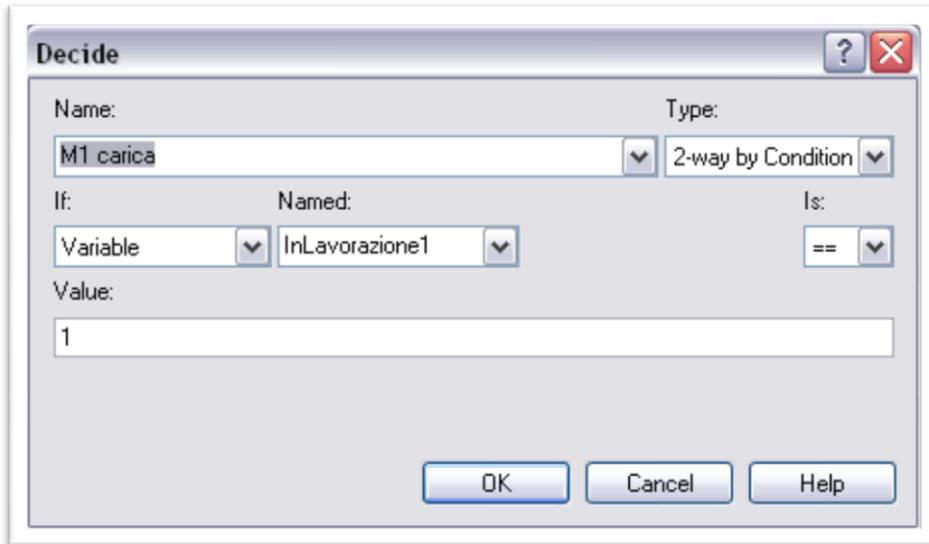


Figura 69 Il modulo di Decide macchina in lavorazione

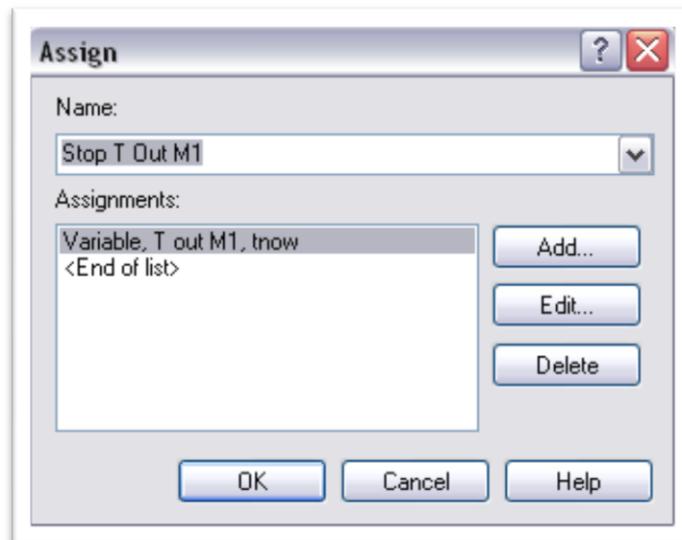


Figura 70 Il modulo di Assign per calcolo tempi produttivi

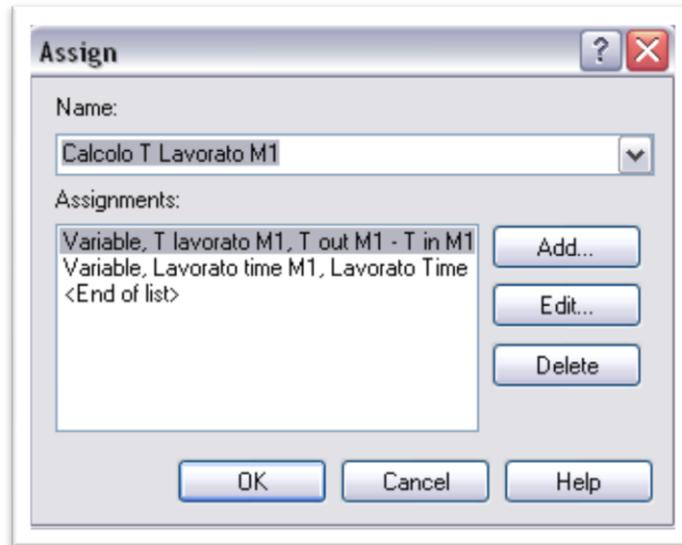


Figura 71 Il secondo modulo di Assign per calcolo tempi produttivi

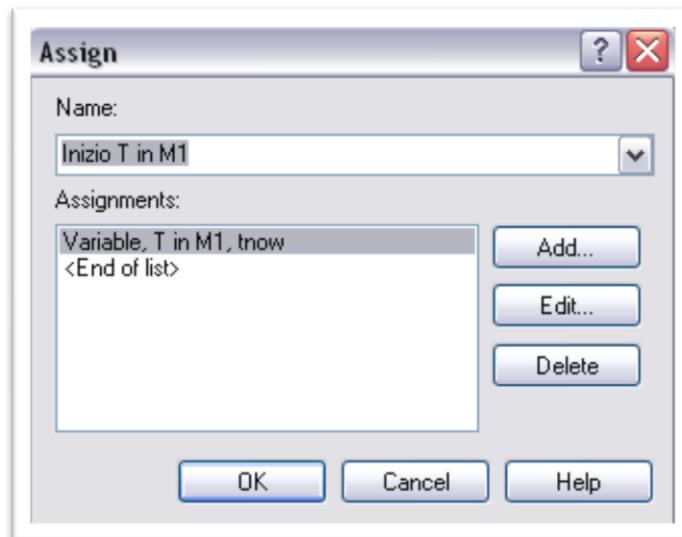


Figura 72 Il terzo e ultimo modulo di Assign per calcolo dei tempi produttivi

Superate le venti linee necessarie per tutte le stazioni l'entità si avvia verso la parte finale di quest'ultimo sistema dove vengono calcolati:

- WIP di sistema in modo da distinguere i pezzi lavorati dai pezzi che sono in coda alle macchine ma fisicamente sono solo degli ordini su foglio di carta. Per tale calcolo si utilizza la funzione di Arena EntitiesWIP (Lavorato)
- Code delle singole stazioni. Anche in questo caso si utilizza una funzione di Arena NQ (Codax.Queue)

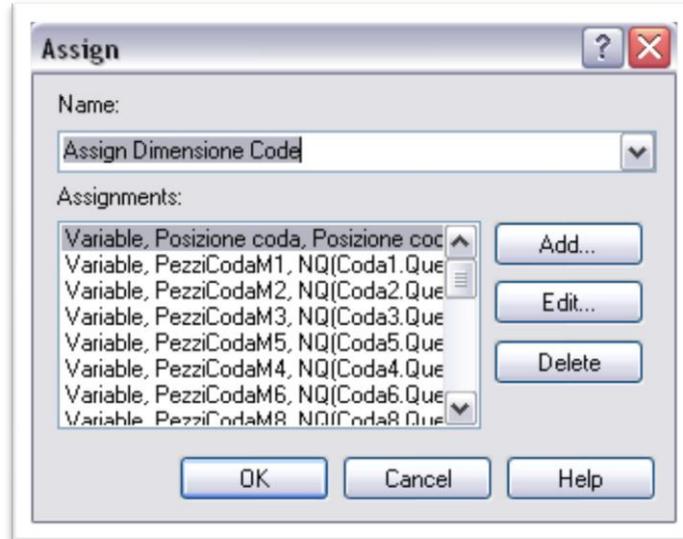


Figura 73 Il modulo Assign dimensione code

L'entità "Coda" passa poi per il penultimo blocco di questo sistema che si preoccupa di scrivere su Storico Code.txt i seguenti dati di interesse:

- WIP di sistema
- Pezzi Coda
- Macchine in lavorazione al termine della giornata
- Tempi di lavorazione giornalieri per stazione
- Tempo di Coda per stazione a fine giornata
- Il numero di pezzi in coda nel Batch.

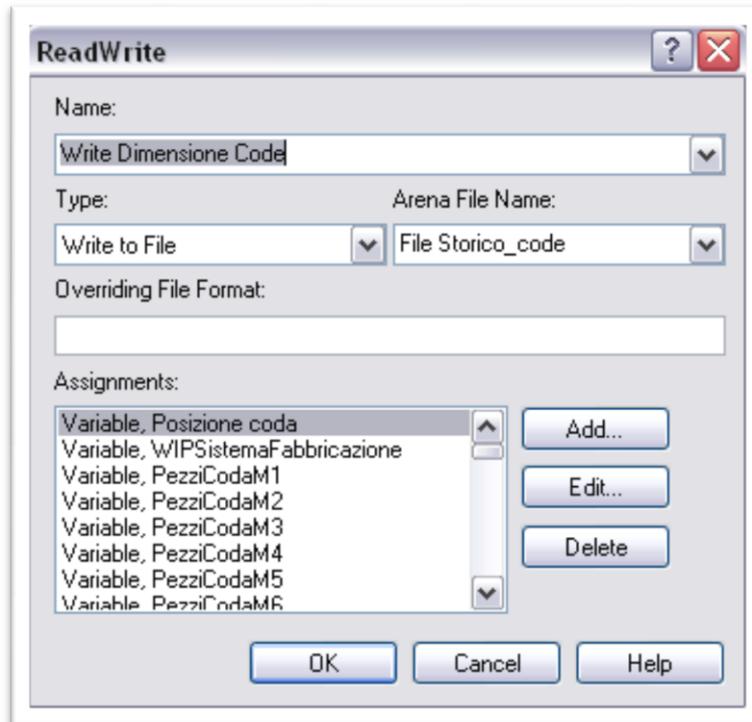


Figura 74 Il modulo ReadWrite storico code

Infine prima di essere distrutta l'entità passa per un modulo Assign che azzerà il tempo di lavorazione delle stazioni.

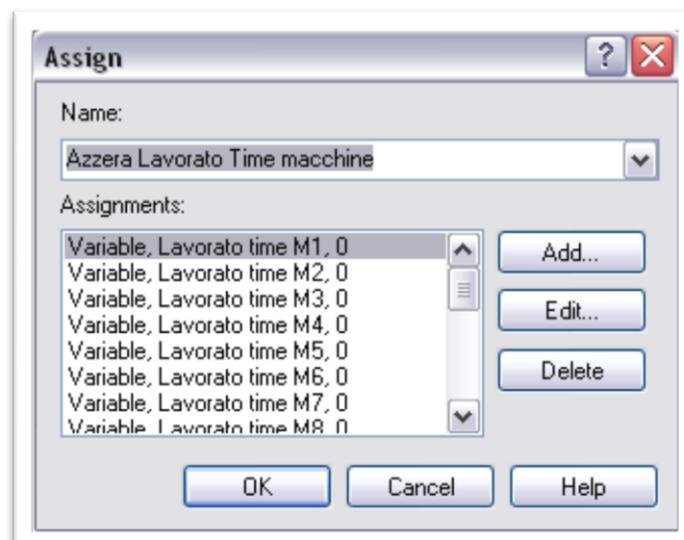


Figura 75 Il modulo Assign per azzerare i tempi di lavorazione

Con quest'ultimo blocco si conclude la modellazione del sistema di simulazione con Arena 13.0. Il sistema mostrato è stato utilizzato senza modifiche sostanziali sia per il modello di Limitazione del carico, sia per il modello di bilanciamento.

Nel successivo paragrafo verranno mostrate le modifiche da apportare al file di Arena in modo da poter utilizzare il modello di bilanciamento.

3.4 Modifiche al file di Arena per il corretto funzionamento del modello di bilanciamento

La differenza fondamentale tra rispetto al file necessario per la simulazione del modello di limitazione rispetto al modello di bilanciamento consiste nella necessità di interagire con ILOG CPLEX 5.2, il programma necessario alla risoluzione di problemi di programmazione lineare mista intera utilizzato nel lavoro di tesi.

Per poter integrare correttamente i due programmi è necessario attivare la macro “salva” contenuta nel modulo1 del foglio Excel che si preoccupa di salvare il foglio di lavoro Excel e di attivare un puntatore che clicca in corrispondenza del pulsante Play del risolutore lineare. Il funzionamento della macro “salva” è stato spiegato in precedenza nell'Appendice relativa al funzionamento di Excel.

Maggiormente nel concreto per attivare la macro “salva” è necessario introdurre un blocco ReadWrite all'interno della sezione di gestione del tempo di Arena descritta in precedenza.

Tale blocco posto subito dopo il ReadWrite necessario a scrivere il giorno nella casella “giorno” di Excel.

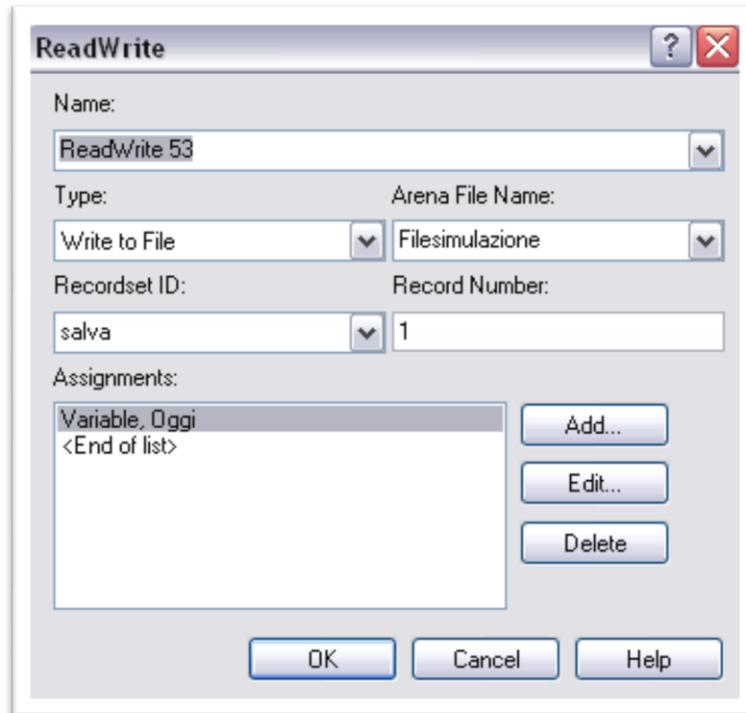


Figura 76

Successivamente è necessario un modulo VBA in cui si arresta il funzionamento di Arena per i 10 secondi necessari al salvataggio di Excel e all'attivazione di ILOG CPLEX.

Il codice contenuto nel blocco è il seguente:

```
Private Sub VBA_Block_12_Fire()
```

```
Sleep 10000
```

```
End Sub
```

La funzione Sleep consente di arrestare il funzionamento del programma per la durata necessaria allo svolgimento di tutte le operazioni di aggiornamento.

Per attivare la funzione Sleep è necessario dichiararla all'interno del Modulo1 della Gestione progetti di Visual Basic mediante il seguente comando:

```
Declare Sub Sleep Lib "kernel32" (ByVal dwMilliseconds As Long)
```

Il blocco VBA successive è lo stesso visto per la limitazione dei carichi di lavoro, con un'unica modifica derivante dalla funzione Sleep iniziale che arresta il funzionamento di Arena per tutto il tempo necessario a CPLEX per la risoluzione del problema di programmazione lineare.

```
Private Sub VBA_Block_10_Fire()
```

```
Sleep 150000
```

```
Dim definitivo As Object
```

```
Set definitivo = GetObject("D:\Prova\Definitivo_bilancia.xlsm")
```

```
definitivo.Application.Visible = True
```

```
definitivo.Sheets("resetta psp").Select
```

```
cambio1 = definitivo.Worksheets("resetta psp").Range("a1")
```

```
definitivo.Worksheets("resetta psp").Range("a1") = cambio1 + 1
```

```
End Sub
```

In questo caso si è scelto di utilizzare una Sleep di 150 secondi in quanto il tempo di risoluzione lasciato a CPLEX era di circa 120 secondi.

Il resto del sistema è esattamente identico a quello descritto in precedenza. Le uniche modifiche sono quelle appena mostrate che consistono nell'introduzione di due blocchi nuovi per l'attivazione delle macro aggiuntive presenti in Excel.

Appendice C.

L'infrastruttura della simulazione: IBM ILOG CPLEX 5.2

In questa sezione dell'Appendice viene mostrato il funzionamento del file necessario alla risoluzione del modello di bilanciamento utilizzato nel lavoro di tesi. Tramite l'utilizzo di questo potente software i tempi di calcolo sono stati dimezzati, consentendo la simulazione di run molto lunghe.

4 Introduzione al software IBM ILOG CPLEX.

IBM ILOG CPLEX è un potente motore di programmazione matematica ad alte prestazioni. Deriva il suo nome da due delle sue caratteristiche fondamentali:

- 1- L'utilizzo dell'algoritmo del semplice
- 2- L'utilizzo del linguaggio di programmazione C.

Proprio grazie alla facilità di programmazione e la potenza di calcolo questo programma è stato scelto per risolvere i problemi di programmazione mista intera necessari allo svolgimento del lavoro di tesi.

Maggiormente nel dettaglio per il funzionamento di questo software è necessario creare un file da noi denominato "balance.prj" che a sua volta conteneva altri tre file che svolgevano i seguenti compiti:

- 1- Collegamento di ILOG CPLEX al file di Excel compito svolto da "Bilanciamento.dat"
- 2- Salvataggio delle impostazioni di base desiderate (tipo di algoritmo utilizzato nella risoluzione, tempo di calcolo assegnato) svolto da "Balance.ops"
- 3- Scrittura del modello di bilanciamento in linguaggio C, svolto da "bilanciamento.mod".

Questi tre file vengono creati automaticamente nel momento in cui si accede ai Progetti di ILOG CPLEX, quindi non è necessario andarli a creare separatamente. E' il file "balance.prj" che si occupa di collegare i vari file e di utilizzarli.

L'utilizzo di questo software ha portato una serie di problematiche:

- 1- La lettura dei dati di Excel avviene solo se il file è stato salvato, viceversa legge i dati contenuti nel file l'ultima volta che è stato salvato. Questo problema è stato risolto introducendo la macro "salva" in Excel.
- 2- La scrittura dei dati in Excel avviene solo se il file è chiuso. Per questo motivo si è rivelato necessario creare un file "outputplex.xls" sempre chiuso durante la simulazione a cui il file "Definitivo_bilancia.xlsm" accede mediante la macro "aggiornamento" e con degli appositi link nel foglio "Input Cplex".
- 3- Impossibilità di avviare mediante comando SHELL di VBA la risoluzione. Per ovviare questo problema è stata creata la macro "click" che sposta il cursore del mouse e clicca in corrispondenza del pulsante play.

Nel prossimo paragrafo viene presentato il codice inserito per il corretto funzionamento del programma.

4.1 Il file “balance.ops”

Per il corretto settaggio dei parametri nel file “balance.ops” sono state scelte le opzioni in figura.

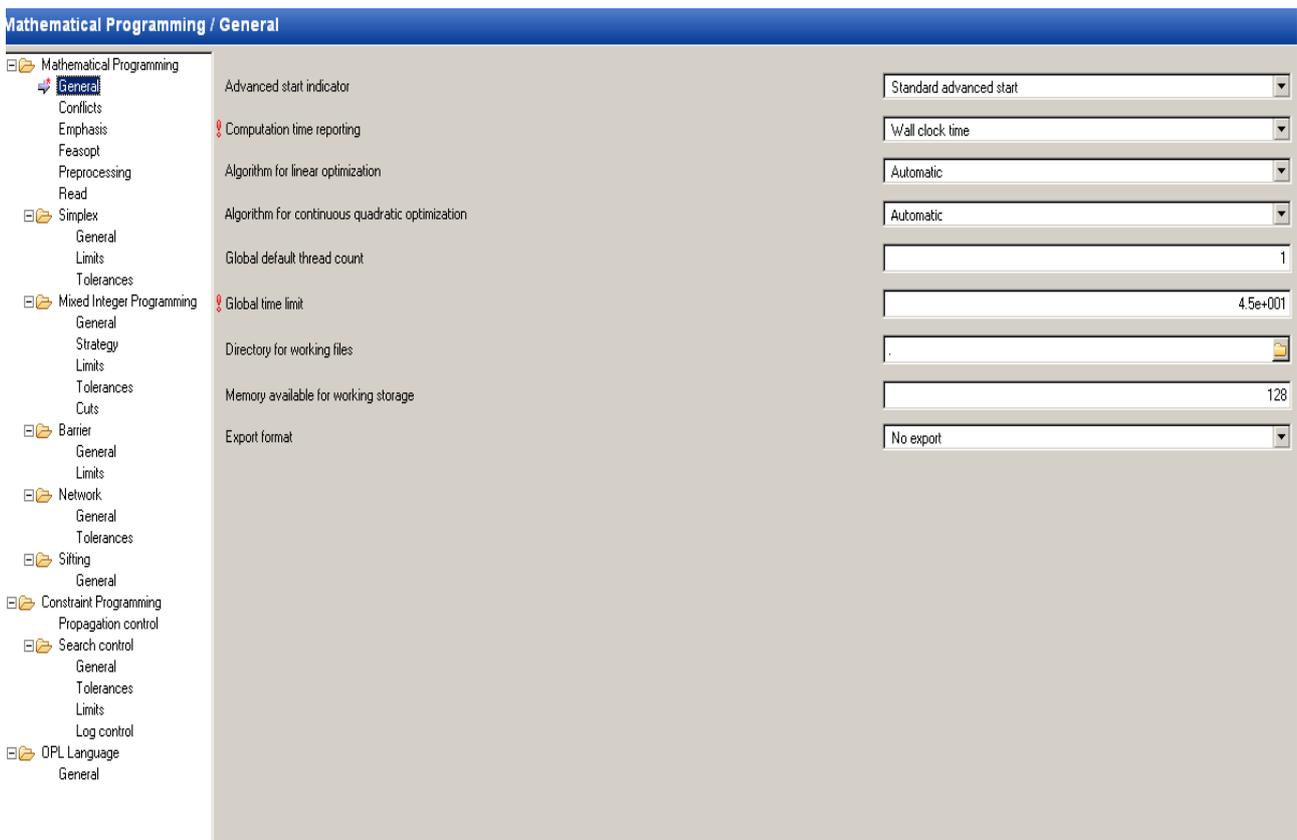


Figura 77 Il settaggio dei parametri in ILOG CPLEX

4.2 Il file “bilanciamento.dat”.

In questo file è necessario nominare le variabili e le matrici che poi il risolutore utilizzerà. Per definire le matrici si fa riferimento ai nomi attribuiti ai gruppi di celle in Excel. Per le variabili invece basta semplicemente definirne la dimensione.

Il codice scritto è il seguente:

```
SheetConnection sheet("Definitivo_bilancia.xlsm");
```

```
SheetConnection output("outputcplex.xls");
```

Questa prima parte si occupa di creare i collegamenti con i due file necessari alla lettura degli input e alla scrittura degli output.

```
cap from SheetRead(sheet, "Capacita");
```

```
pesi from SheetRead(sheet, "Pesi");
```

```
dobj from SheetRead(sheet, "Deltaobj");
```

```
nome from SheetRead(sheet, "nomecplex");
```

```
presto from SheetRead(sheet, "Presto");
```

```
tardi from SheetRead(sheet, "Tardi");
```

```
tempi from SheetRead(sheet, "t_1");
```

Questa seconda parte collega i valori contenuti in Excel alle variabili definite nel file “bilanciamento.mod”.

```
xx1 to SheetWrite(output, "output");
```

Infine in quest’ultima parte si dice al programma dove salvare gli output della risoluzione.

4.3 Il file “bilanciamento.mod”

Questo è il file principale, contiene il modello di programmazione lineare e le dimensioni di tutte le variabili del sistema.

Per prima cosa si definiscono le dimensioni delle matrici:

```
range stazione=1..20;
```

```

float cap[stazione]=...;

float dobj[stazione]=...;

range ordine=1..330;

int tardi[ordine]=...;

int presto[ordine]=...;

int nome[ordine]=...;

range batch=1..15;

float pesi[batch]=...;

float tempi[ordine][stazione]=...;

dvar boolean xx1[ordine][batch];

dvar float+ rilascio[batch][stazione];

dvar float+ si[batch][stazione];

dvar float+ ss[batch][stazione];

```

Definita questa prima parte si passa alla scrittura del modello vero e proprio.

Funzione obiettivo:

minimize

sum (b in batch :b<=6 , s in stazione)

*((si[b][s])^2 + (ss[b][s])^2) * pesi[b];*

Vincoli:

subject to {

forall (s in stazione)

si[1][s] >= dobj[s] - rilascio[1][s];

forall (s in stazione)

$ss[1][s] \geq \text{rilascio}[1][s] - \text{doj}[s];$

forall (s in stazione)

$si[2][s] \geq \text{cap}[s] - \text{rilascio}[2][s];$

forall (s in stazione)

$ss[2][s] \geq \text{rilascio}[2][s] - \text{cap}[s];$

-

-

-

forall (s in stazione)

$si[15][s] \geq \text{cap}[s] - \text{rilascio}[15][s];$

forall (s in stazione)

$ss[15][s] \geq \text{rilascio}[15][s] - \text{cap}[s];$

forall (b in batch , s in stazione)

$si[b][s] \geq 0;$

forall (b in batch , s in stazione)

$ss[b][s] \geq 0;$

forall (b in batch , s in stazione)

$\text{rilascio}[b][s] == \text{sum}(o \text{ in ordine}) \text{xx1}[o][b] * \text{tempi}[o][s];$

```
forall ( o in ordine )  
  
  sum ( b in batch: b <= tardi[o] )  
  
    xx1[o][b] == 1;  
  
  forall ( b in batch )  
  
    sum( o in ordine )  
  
    xx1[o][b] <= 300;  
  
}
```

Bibliografia

A Allahverdi The two- and m-machine flowshop scheduling problems with bicriteria of makespan and mean flowtime [Journal] // Eur J Oper Res 147(2):. - 2003. - pp. 373–396.

Allahverdi A Al-Anzi FS Evolutionary heuristics and an algorithm for the two-stage assembly scheduling problem to minimize makespan with setup times [Journal] // Int J Prod Res 44(22). - 2006. - pp. 4713–4735.

Allahverdi A Gupta JND, Aldowaisan T A review of scheduling research involving setup considerations. [Journal] // Omega Int J Manag Sci 27(2). - 1999. - pp. 219-239.

Allahverdi A Ng CT, Cheng TCE, Kovalyov M A survey of scheduling problems with setup times or costs [Journal] // Eur J Oper Res (in press). - 2007.

Allahverdi Minimizing mean #owtime in a two machine #owshop with sequence independent setup times. [Journal]. - [s.l.] : Computers and Operations Research, 2000. - 111–127 : Vol. 27.

Amaro, Hendry L.C and Kingsman Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Operations and Production Management, 1999. - 349-371 : Vol. 19.

Anderson M., Agile product development for mass customization: just-in-time, build-to-order, and agile manufacturing [Journal] // Management Consultant Lafayette. - 1997.

Bechte Theory and practice of load-oriented manufacturing control [Journal] // International Journal of Production Research 26 (3. - 1988. - pp. 375-395.

Bergamaschi [et al.] Order review and release strategies in a job shop environment: a review and a classification [Journal] // International Journal of Production Research, 35: 2.. - 1997. - pp. 399-420.

Bertrand and Wakker van de An investigation of order release and flow time allowance policies for assembly job shops. - [s.l.] : PRODUCTION PLANNING & CONTROL, 2002. - Vol. 13 (7).

Bertrand J.W.M., Van Ooijen, Workload based order release and productivity: a missing link. - [s.l.] : Production Planning & Control, 2002. - Vol. 13.

Bobrowsky Implementing a loading heuristic in a discrete release job shop. [Journal]. - [s.l.] : International journal of production research, 1989. - 1935-1948 : Vol. 27.

Bokhorst and Slomp Jannes TOWARDS TAKT TIME CONTROLLED PRODUCTION UNITS IN LOW VOLUME HIGH VARIETY ENVIRONMENTS [Journal]. - 2008.

Bokhorst J. A. C. and Slomp Jannes TOWARDS TAKT TIME CONTROLLED PRODUCTION UNITS IN LOW VOLUME HIGH VARIETY ENVIRONMENTS [Article]. - 2008.

Breithaupt Jan-Wilhelm, Land Martin and Nyhuis Peter The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented order Release [Journal]. - [s.l.] : Production Planning & Control, 2002. - 7 (625-638) : Vol. 13.

Breithaupt Jan-Wilhelm, Land Martin and Nyhuis Peter The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release [Journal] // Production Planning & Control, 13 : 7. - 2002. - pp. 625 — 638.

C. Silva L. Roque , A. Almeida MAPP – A web-based decision support system for the mould industry [Journal] // Decision Support Systems 42. - 2006. - pp. 999-1014.

Cheng Analysis of material flow in a job shop with assembly operations [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1990. - 1369-1383 : Vol. 28(7).

Cheng T.C.E. Analysis of material flow in a job shop with assembly operations [Journal] // International Journal of Production Research 28 (7). - 1996. - pp. 136 -1383.

Chihiro Watanabe* Bernadetta Kwintiana Ane Constructing a virtuous cycle of manufacturing agility: concurrent roles of modularity in improving agility and reducing lead time [Journal] // Technovation 24. - 2004. - pp. 573-583.

Christos Koulamas* George J. Kyparisis The three-stage assembly flowshop scheduling problem [Journal] // Computers & Operations Research 28 . - 2001. - pp. 689-704.

Cigolini and Portioli An experimental investigation on workload limiting methods within ORR policies in a job shop environment [Journal] // Production Planning & Control 13, 7. - 2002. - pp. 602-613.

Coy Mc and Egbelu Minimizing production flow time in a process and assembly job shop, [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1998. - 2315}2332 : Vol. 36 (8).

Doctor, Cavalier and Egbelu Scheduling for machining and assembly in a job-shop environment [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1993. - 1275}1297 : Vol. 31 (6).

E White R. and Prybutok V. The relationship between JIT practices and type of production system, [Journal]. - [s.l.] : Omega, 2001. - 113-124 : Vol. 29.

Enns An integrated system for controlling shop loading and work flows [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1995. - 2801-2820 : Vol. 33.

Enns and Costa The Effectiveness of Input Control Based on Aggregate versus Bottleneck work Loads [Journal]. - [s.l.] : Production Planning and Control, 2002. - 614-624 : Vol. 13.

Fawaz S. Al-Anzia Ali Allahverdi Heuristics for a two-stage assembly flowshopwithbicriteria ofmaximumlateness and Makespan [Journal] // Computers & Operations Research 36. - 2009. - pp. 2682-2689.

Frendall and Melnyk Assessing the impact of reducing demand variance throughput improved planning on the performance of a dual resource constrained job shop [Journal]. - [s.l.] : International journal of production research, 1995. - 1521-1534 : Vol. 33.

Fry [et al.] The effect of product structure and sequencing rule on assembly shop performance [Journal]. - [s.l.] : InternationalJournal of Production Research, 1989. - 671 }686 : Vol. 27 (4).

Gaalman Martin J. Land* and Gerard J.C. Production planning and control in SMEs: time for change [Journal] // Production Planning & Control. - 2009. - pp. 548-558.

Glassey C.R., Resende Closed-loop job release control for VLSI circuit manufacturing. - [s.l.] : IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1988. - Vol. 1.

H.P.G. van Ooijen* J.W.M. Bertrand The effects of a simple arrival rate control policy on throughput and work-in-process in production systems with workload dependent processing rates. - [s.l.] : Int. J. Production Economics, 2003. - Vol. 85.

Haouari M Daouas T Optimal scheduling of the 3-machine assembly-type flow shop [Journal] // RAIRO Rech Opér 33(4):. - 1999. - pp. 439-445.

Hariri A.M.A. and Potts C.N. A branch and bound algorithm for the two-stage assembly scheduling problem [Journal] // European Journal of OperationalResearch 103 (3). - 1997. - pp. 547-556.

Hendry and Kingsman Production planning system and their applicability to make to order companies [Journal]. - [s.l.] : European journal of operation research, 1989. - 2827-2842 : Vol. 32.

- Hendry and Wong** Alternative order release mechanism: a comparison by simulation [Journal]. - [s.l.] : International journal of production research, 1994. - 2827-2842 : Vol. 32.
- Hendry, Kingsman and Cheung** The effect of workload control (WLC) on performance in make-to-order companies [Journal] // Journal of Operations Management 16. - 1998. - pp. 63-75.
- Hendry, Kingsman and Cheung** The effect of workload control on performance in MTO companies [Journal]. - [s.l.] : journal of operations management, 1998. - 63-75 : Vol. 16.
- Huang** A comparative study of priority dispatching rules in a hybrid assembly/job shop [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1984. - 375-387 : Vol. 22.
- I. Sabuncuoglu* H.Y. Karapmmar** Analysis of order review/release problems in production systems [Journal] // Int. J. Production Economics 62. - 1999. - pp. 259-279.
- Irastorza J.C., Deane** A loading and balancing methodology for job shop control. - [s.l.] : AIIE Transactions, 1974. - Vol. 6.
- JND Gupta, VA Strusevich and C. Zwaneveld** Two-stage no-wait scheduling models with setup and removal times. [Journal]. - [s.l.] : Comput Oper Res, 1997. - 1025-1031. : Vol. 24.
- Johnson** Optimal Two and Three-Stage Production Schedule with Setup Times Included [Journal]. - [s.l.] : Naval Res. Logistics Quarterly, 1954. - 61-68. : Vol. 1.
- JWM. Bertrand AM. Van De Wakker** An investigation of order release and flow time allowance policies for assembly job shops [Journal] // Production planning & Control Vol 13 N 7. - 2002. - pp. 639-648.
- Kan A.H.G. Rinnooy** Machine Scheduling Problems [Journal] // Martinus Nijho. - 1976.
- Kingsman and G. L. C. HENDRY and B.** Job Release: Part of a Hierarchical System to Manage Manufacturing Lead Times in Make-to-order Companies [Journal] // J. OpI Res. Soc. Vol. 42, No. 10. - 1991. - pp. 871-883.
- Kingsman and Hendry** The relative contribution of input-output controls on the performance of a workload control system in Make-To-Order companies [Journal]// Production Planning & Control. - 2002. - pp. 579-590.

Kingsman and Hendry The relative contributions of input and output control on the performance of a workload control system in MTO companies [Journal]. - [s.l.] : Production Planning & Control, 2002. - 579-590 : Vol. 13.

Kingsman Brian [et al.] Responding to customer enquiries in make-to-order companies Problems and solutions [Journal] // Int. J. Production Economics 46- 47. - 1996. - pp. 219-231.

KINGSMAN L. C. HENDRY and B. G. Customer Enquiry Management: Part of a Hierarchical System to Control Lead Times in Make-to-Order Companies [Journal] // J. Oper. Res. Soc. Vol. 44, No. 1. - 1993. - pp. 61-70.

Kingsman Modeling input-output workload control for dynamic capacity planning in production control [Journal] // Int. J. Production Economics 68. - 2000. - pp. 73-93.

Kolish Integration of assembly and fabrication for Make To Order production [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Economics, 2000. - 287-306 : Vol. 68.

L. Hendry M. Landb, M. Stevenson, G. Gaalman Investigating implementation issues for workload control (WLC): A comparative case study analysis [Journal] // Int. J. Production Economics 112. - 2008. - pp. 452-469.

Land and Gaalman The performance of workload control concepts in job shop: improving the release method [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Economics, 1998. - 347-364 : Vols. 56-57.

Land and Gaalman Workload control concepts in job shops. A critical assessment [Journal] // Int. J. Production Economics 46-47. - 1996. - pp. 535-548.

Land and Kingsman The performance of workload control concepts in job shops: Improving the release method [Journal] // Int. J. Production Economics. - 1998. - pp. 347-364.

Land, Gaalman and Henrich Exploring applicability of the workload control concept [Journal] // Int. J. Production Economics. - 2004. - pp. 187-198.

Land, Gaalman and Henrich Parameters and sensitivity in workload control [Journal] // Int. J. Production Economics 104. - 2006. - pp. 625-638.

Lander and Liker The Toyota Production System and art: making highly customized and creative products the Toyota way [Journal] // International Journal of Production Research. - 2007.

Lander and Liker The Toyota Production System and art: making highly customized and creative products the Toyota way [Journal] // International Journal of Production Research. - 2007.

Law and Carson A Sequential Procedure for Determining the Length of a Steady-State Simulation [Journal]. - [s.l.] : Operations Research, 1979. - 5 : Vol. 27.

Lee C.Y., Cheng T.C.E. and B.M.T. Lin Minimizing the makespan in the 3-machine assembly-type flowshop scheduling problem [Journal] // Management Science 39 (5. - 1993. - pp. 616-625.

Mabert and Ragatz An evaluation of an order release mechanism in a job shop environment [Journal]. - [s.l.] : Decision Sciences, 1988. - 167-189 : Vol. 19.

Masao Yokoyama a *, Daryl L. Santos Discrete Optimization Three-stage flow-shop scheduling with assembly operations to minimize the weighted sum of product completion times [Journal] // European Journal of Operational Research 161. - 2001. - pp. 689-704.

Melnyk and Ragatz Order review/Release and its impact on the shop floor [Journal]. - [s.l.] : Production and Inventory Management, 1989. - 13-17 : Vol. 29.

MILTENBURG JOHN LEVEL SCHEDULES FOR MIXED-MODEL ASSEMBLY LINES IN JUST IN TIME PRODUCTION SYSTEMS [Journal] // MANAGEMENT SCIENCE 35 (2). - 1989. - pp. 192-207.

Mosca Dispense dal corso di Gestione degli Impianti Industriali [Book]. - [s.l.] : Università di Genova, 2007.

Muda and Hendry Proposing a world-class manufacturing concept for the make-to-order sector [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 2002. - 353-373 : Vol. 40.

Muda and Hendry Proposing a world-class manufacturing concept for the make-to-order sector, [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 2002. - 353-373 : Vol. 40.

Oosterman, Land and Gaalman The influence of shop characteristics on workload control [Journal] // Int. J. Production Economics 68. - 2000. - pp. 107-119.

Papadopoulou T.C. and Mousavi A. SCHEDULING OF NON-REPETITIVE LEAN MANUFACTURING SYSTEMS UNDER UNCERTAINTY USING INTELLIGENT AGENT SIMULATION [Article]. - 2008.

Papadopoulou Theopisti C. and Mousavi Alireza SCHEDULING OF NON-REPETITIVE LEAN MANUFACTURING SYSTEMS UNDER UNCERTAINTY USING INTELLIGENT AGENT SIMULATION [Journal] // The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08). - 2008.

Patrick R. Philipoom Timothy D. Fry Order review/release in the absence of adherence to formal scheduling policies [Journal] // Journal of Operations Management 17. - 1999. - pp. 327-342.

Perona and Portioli The impact of parameter setting in load oriented manufacturing control [Journal] // Int. J. Production Economics 55. - 1998. - pp. 133-142.

Perona and Portioli An enhanced loading model for the probabilistic workload control under workload unbalancement [Journal]. - [s.l.] : Production Planning and Control, 1996. - 68-78 : Vol. 7.

Perona and Portioli The impact of parameter setting in load oriented manufacturing control [Journal] // Int. J. Production Economics. - 1998. - pp. 133-142.

Peter Henrich Martin Land, Gerard Gaalman Grouping machines for effective workload control [Journal] // Int. J. Production Economics 104. - 2006. - pp. 125–142.

Philipoom and Fry Capacity-based order review/release strategies to improve manufacturing performances. [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research,, 1992. - 2559-2572 : Vol. 30.

Philipoom and Malhotra Jensen An evaluation of capacity sensitive order review and release procedure in job shops [Journal]. - [s.l.] : Decision Sciences, 1993. - 1109-1133 : Vol. 24.

Philipoom, Russell R.S. and Fry A preliminary investigation of multi-attribute based sequencing rules for assembly shops [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 1991. - 739-753 : Vol. 29 (4).

Portioli and Tantardini Lean Production implementation: case studies in Italian non repetitive companies [Journal]. - Innsbruck : 15 working seminar on production economics, 2008. - 405-416.

Portioli Staudacher Alberto and Tantardini Marco Lean production implementatio: a survey in Italy [Conference] // International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. - Madrid : [s.n.], 2008. - pp. 52-60.

Potts C.N. [et al.] The two-stage assembly scheduling problem: Complexity and approximation [Journal] // Operations Research 43 (2). - 1995. - pp. 346-355.

Ruiz and Vázquez-Rodríguez The hybrid flow shop scheduling problem [Journal]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research, 2010. - 1-18 : Vol. 205.

Ruiz Rub and Vaquez-Rodriuez Josè Antonio Contents lists The hybrid flow shop scheduling problem [Journal] // European Journal of Operational Research 205. - 2010. - pp. 1-18.

Shaladdin Muda Linda Hendry Developing a new world class model for small and medium sized make-to-order companies [Journal] // Int. J. Production Economics 78. - 2002. - pp. 295-310.

Shimoyashiro, Isoda and Awane Input scheduling and load balance control for a job shop [Journal]. - [s.l.] : International journal of production research, 1984. - 597-605 : Vol. 22.

Slomp J., Bokhorst J.A.C. and Germs R. A lean production control system for high-variety/low-volume environments: a case study implementation [Article] // Production Planning & Control. - 2009.

Slomp Jannes, Bokhorst and Germs Remco A lean production control system for high-variety/low-volume environments: a case study implementation [Journal] // Production Planning & Control. - 2009.

Stevenson and Hendry Aggregate load-oriented workload control: A review and a re-classification of a key approach [Journal] // Int. J. Production Economics 104. - 2006. - pp. 676-693.

Stevenson Mark Practical implementation of production planning and control concepts in SMEs and MTOs: an introduction to the special issue [Journal] // Production Planning & Control. - 2009. - pp. 541-547.

Stevenson, Hendry and Kingsman A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry [Journal] // International Journal of Production Research. - 2005. - pp. 869-898.

Sun X Morizawa K, Nagasawa H Powerful heuristics to minimize makespan in fixed, 3-machine, assembly-type flowshop scheduling. [Journal] // Eur J Oper Res 146(3). - 2003. - pp. 498-513.

Sung and Juhn Makespan minimizationfora2-stageassemblyschedulingproblem [Journal]. - [s.l.] : Int. J. Production Economics, 2009. - 392-401 : Vol. 119.

Sung C.S and Kim H.A. A two-stage multiple-machine assembly scheduling problem for minimizing sum of completion times. [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Production Economics, 2008. - 1038–1048 : Vol. 113.

T.C.E. Cheng G. Wang Scheduling the fabrication and assembly of components in a two-machine flowshop [Journal] // IIE Transactions 31. - 1999. - pp. 135-143.

Tozkapan, O Kirca and C-S Chung A branch and bound algorithm to minimize the total weighted flowtime for the two-stage assembly scheduling problem [Journal] // Comput Oper Res 30(2). - 2003. - pp. 309-320.

Womack and Jones Lean Thinking [Journal]. - New York : Rawson Associates, 1996.

Yokoyama Masao Hybrid flow-shop scheduling with assembly operations [Journal] // Int. J. Production Economics 73. - 2001. - pp. 103-116.

Zapfel and Missbauer New concept for production planning and control [Journal]. - [s.l.] : European journal of operational research, 1993. - 297-320 : Vol. 67.

Ringraziamenti

Ringraziamo il prof. Alberto Portioli Staudacher per averci dato l'opportunità di misurarci con le tematiche che abbiamo affrontato in questi mesi e per esser stato più vicino al nostro lavoro di quanto ci fossimo inizialmente resi conto; grazie anche per averci dato, in alcuni momenti di maggiore fatica, lo spunto per ricominciare a lavorare con caparbietà ed ottimismo.

Ringraziamo l'ing. Marco Tantardini per il supporto e per il costante aiuto che ci ha fornito con grande pazienza; per le sue preziose osservazioni che hanno contribuito in maniera significativa alla buona riuscita di questo lavoro e per la caparbietà con cui non ha mai smesso di fornirci importanti spunti di riflessione. Grazie anche per gli schietti richiami che ha saputo darci, grazie ai quali abbiamo potuto lavorare sempre con il massimo del rigore.

Un grazie enorme alle nostre famiglie, a Patrizio e Nicoletta e ad Emanuele e Michela, che ci hanno permesso con i loro sacrifici di raggiungere questo importante traguardo. Ci auguriamo di saper essere all'altezza del dono che abbiamo ricevuto e ci impegneremo a far fruttare al meglio le risorse che avete investito in noi. Grazie anche per aver creduto in noi e per averci sempre incoraggiati ad inseguire le nostre aspirazioni ed a realizzare i nostri sogni.

Un grazie particolare a Francesca per avere sopportato con pazienza Luca per tutto questo tempo.

Grazie ai nostri amici, che nei tempi lasciati liberi dallo studio hanno fatto della nostra vita un dono gioioso. A ciascuno di loro, agli amici più fedeli, va il nostro ringraziamento più sincero per esserci stati vicini senza appesantirci, nei momenti allegri come in quelli meno felici; grazie per non averci mai fatto mancare una parola di incoraggiamento o un suggerimento prezioso.

Vogliamo infine qui ricordare, con un affettuoso saluto, Ida che è da poco mancata all'affetto di Luca e dei suoi cari. Perché in questo giorno lei possa guardare dall'alto suo nipote raggiungere questo importante passaggio della sua vita.