



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA GESTIONALE ED ESTIMO
INDIRIZZO: INGEGNERIA GESTIONALE
XXIII CICLO

**VALUTAZIONE DEI PARAMETRI E DELLE LOGICHE DI
FUNZIONAMENTO DEL WORKLOAD CONTROL (WLC) TRAMITE
SIMULAZIONE DI UN SISTEMA PRODUTTIVO COMPLESSO**

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Giuseppe Stellin

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Cipriano Forza

Supervisore: Ch.mo Prof. Roberto Panizzolo

Dottorando: Ing. Davide Martinazzo

*Ai miei genitori
e ad Angela*

Introduzione	1
1.1 Originalità rispetto ai lavori precedenti.....	6
1.2 Overview della tesi.....	8
Capitolo 1 - Inquadramento dell'ambito di ricerca.....	11
1.3 Production Planning and Control System (PPC): una introduzione	11
1.4 Production Systems: generalità.....	12
1.5 Il Job Shop.....	20
1.6 Gestione dell'ordine nel sistema PPC	25
1.7 Differenze tra job shop reali e modelli simulativi.....	28
1.8 Workload Control - generalità	31
Capitolo 2 - Analisi della letteratura sulle tecniche di Order Review and Release	35
2.1 Studi teorici e descrittivi	36
2.2 Studi simulativi	45
2.2.1 Meccanismi di dispatching.....	50
2.2.1.1 Alcune considerazioni generali	57
2.2.2 Meccanismi di rilascio degli ordini.....	58
2.2.3 Misure di prestazione	63
2.2.4 Setting della data di consegna.....	64
2.2.5 Risultati	66
Capitolo 3 - Workload Control (WLC).....	75
3.1 Definizioni generali.....	82
3.1.1 Le componenti dei lead times	82
3.2 Stima della data di consegna e di rilascio	86
3.3 Aspetti legati al load bounding e al load accounting	88
3.3.1 Il metodo per il Workload accounting	89
3.4 - Contabilizzazione del carico.....	90
3.4.1 Controllo del carico.....	97
3.5 Limitazione e valutazione degli ordini nel portafoglio	97

3.6 LOOR – Load Oriented Order Release	98
3.6.1 - Load Conversion Method	103
3.7 Aspetti chiave degli approcci WLC e considerazioni generali	106
3.7.1 Limite del carico e dimensione degli ordini	107
3.7.2 Peculiarità dell'approccio probabilistico.....	109
3.7.2.1 Migliorie introdotte al metodo LOOR.....	111
Capitolo 4 - Il modello di simulazione.....	113
4.1 Domande di ricerca	113
4.2 Metodologia di ricerca: sviluppo ed utilizzo di modelli quantitativi	114
4.3 Simulazione ad eventi discreti.....	116
4.4 Modello di simulazione	118
4.4.1 La struttura produttiva simulata	118
4.4.1.1 Ordini cliente e codici	118
4.4.1.2 Centri di lavoro e risorse	120
4.4.1.3 Cicli, tempi di lavorazione e di set-up.....	120
4.4.2 Assunzioni al modello	120
4.4.2.1 Definizione della data di consegna.....	121
4.4.2.2 Distinte base e logica di rilascio dei codici intermedi e dei materiali ...	121
4.5 Piano sperimentale	122
4.5.1 Periodo di rilascio, time limit e limiti di carico.....	124
4.5.2 Workload accounting	124
4.5.3 Lot splitting	124
4.5.4 Criteri di valutazione per il rilascio degli ordini	124
4.5.4.1 Workload Upper Load Limit (WUL)	125
4.5.4.2 Equazione di bilanciamento - Workload Balancing 1 (WLB1)	125
4.5.4.3 Workload Balancing 2 (WLB2)	127
4.5.4.4 Indice di bilanciamento - Workload balancing 3 (WLB3).....	128
4.5.4.5 Riepilogo dei metodi per il rilascio proposti	129

4.5.5 Regole di prioritizzazione degli ordini nel portafoglio ordini	129
4.5.6 Regole di dispatching	131
4.5.7 Modello concettuale	131
4.6 Dal piano sperimentale ai piani simulativi	132
4.7 Variabili dipendenti: risposte sperimentali	134
4.8 Simulazione	138
4.8.1 Validazione del modello simulativo	138
4.8.2 Periodo di simulazione e di inizializzazione	138
Capitolo 5 - Risultati	141
5.1 Overview dei risultati	141
5.1.1 Load accounting method	142
5.1.2 Periodo di pianificazione	143
5.1.3 Regole di ordinamento nel portafoglio ordini	143
5.1.4 Lot splitting	143
5.1.5 Regole di rilascio	144
5.1.6 Time limit	144
5.1.7 Limite di carico	144
5.1.8 Regole di dispatching	145
5.2 Interazioni tra i fattori	146
5.2.1 MT – Mean Tardiness	148
5.2.2 ML - Mean Lateness	152
5.2.3 TD –Tardiness Deviation	155
5.2.4 LD – Lateness Deviation	157
5.2.5 PTJ – Percentage of tardy job	160
5.2.6 MSU – Mean Shop Utilization	162
5.2.7 MSFT – Mean Shop Flow Time	165
5.2.8 MTFT – Mean Total Flow Time	170
5.2.9 MSHW – Mean Shop WIP	174

5.2.10 MSYW – Mean System WIP	178
5.2.11 Considerazioni sulle regole di rilascio	180
5.3 Comparazione con WLB2	181
Capitolo 6 - Conclusioni	183
6.1 Limiti della ricerca e sviluppi futuri.....	186
Appendice A	189
Esempio del metodo WLB2	189
Esempio di applicazione del BI.....	191
Appendice B.....	194
Piani simulativi.....	194
Appendice C – Tabelle del database aziendale	198
Ordini cliente.....	198
Struttura del sistema produttivo	217
Appendice D	218
Risultati sperimentali del piano 1	218
Risultati sperimentali del piano 2.....	222
Bibliografia	225

Introduzione

Negli ultimi anni il tema del controllo dell'input e del output nei sistemi produttivi, noto come *Input/Output Control* e dei meccanismi di rilascio degli ordini, ha ricevuto grande attenzione da parte della letteratura scientifica (Bergamaschi *et al.*, 1997; Kingsman, 2000, Oosterman *et al.*, 2000, Haskose *et al.*, 2002, 2004; Henrich *et al.*, 2004; Land 2006; Stevenson, 2006; Stevenson e Hendry, 2006, per citarne alcuni). Nel 2002 la rivista specialistica *Production Planning & Control* ha dedicato un numero speciale sul tema del controllo del carico nei sistemi job shop (*Workload control in job shops: an introduction to the special issue*). Recentemente, infatti, i meccanismi di rilascio degli ordini sono stati riconosciuti dai ricercatori come uno strumento di controllo operativo molto più efficace rispetto alle regole di dispatching, che tradizionalmente hanno rappresentato il focus principale della letteratura sul tema dello scheduling (Yucesan *et al.*, 2000).

L'elevata varietà nel mix e nella quantità dei prodotti finiti offerti ai clienti unita alla complessità delle distinte dei prodotti e dei cicli tecnologici rendono la pianificazione ed il controllo della produzione un'attività estremamente complicata nei contesti di tipo Job Shop. Newnam e Maffei (1999) definiscono la manufacturing task complexity come “*the extent to which parameters of a job shop make it difficult to plan, schedule and control the operation of the job shop*”. Tale complessità è imputabile alla variabilità della distribuzione dell'arrivo degli ordini, al numero di fasi e operazioni nel processo produttivo, alla variabilità del tempo di lavorazione e alla presenza di tempi di set-up che talvolta dipendono dalla sequenza di lavorazione.

Secondo alcuni autorevoli ricercatori, come ad esempio Hopp e Spearman (1996), Stevenson *et al.* (2005), la complessità intrinseca dei sistemi produttivi di tipo job shop preclude l'utilizzo di logiche di gestione di tipo *pull* e *CONWIP*¹ (Constant Work In Process) (Spearman *et al.*, 1990), facendo invece propendere per l'impiego dell'MRP (Material Requirements Planning). In modo particolare essi enfatizzano le criticità legate ai colli di bottiglia fluttuanti e ai cicli tecnologici complessi. Secondo Hopp e Spearman la maggior parte dei ricercatori e delle software house hanno dedicato grande attenzione soprattutto a due categorie di schedulazione che possono essere utilizzate in associazione all'MRP: l'*Optimization Based Scheduling* e la *Simulated Based Scheduling*.

¹ Il Constant Work In Process è una tecnica di controllo avanzamenti con logica ibrida push-pull, che limita il numero totale di parti all'interno del sistema nello stesso momento fissando un valore costante del Work In Process totale.

Nella schedulazione basata sull'ottimizzazione, la modalità di rilascio degli ordini così come definita dall'MRP, viene impiegata in algoritmi matematici al fine di ottenere una schedule pseudo-ottimale. Data la dimensione e la complessità dei problemi che caratterizzano la maggior parte dei contesti produttivi (problemi NP completi - problemi non deterministici a tempo polinomiale), la soluzione ottima non può tuttavia essere raggiunta in tempi ragionevoli; vengono quindi impiegate tecniche di soluzione approssimate. Benché tali tecniche siano sufficientemente efficienti e forniscano risultati soddisfacenti, molti software di schedulazione sono spesso venduti con modalità "black box". Di conseguenza per l'utilizzatore risulta alquanto difficile valutarne la bontà di approssimazione. Inoltre, e cosa più importante, la natura fortemente stocastica dei contesti *job shop* rende tali soluzioni obsolete ancor prima che gli ordini vengano rilasciati e lavorati in produzione. In fine, l'acquisto di hardware e software per l'implementazione di tecniche di ottimizzazione alla schedulazione può rappresentare un vincolo economico per un gran numero di piccole-medie aziende.

La seconda categoria di tecniche, ossia quella basata sulla simulazione, consente di evitare la formulazione di problemi NP-hard. Attraverso un software viene sviluppata una simulazione estremamente dettagliata e deterministica dell'intero sistema produttivo, che viene interfacciata con un sistema di rilevamento dello stato di avanzamento degli ordini posto sul campo. La schedulazione viene generata simulando il modello nel tempo e registrando gli arrivi e le partenze dei materiali nei vari centri di lavoro, variando di volta in volta le regole di dispatching. Il risultato è una pluralità di schedulazioni che vengono confrontate sulla base di diversi criteri al fine di determinare quello con le prestazioni superiori. Come riportato da Hopp e Spearman (2000) il principale vantaggio dell'approccio simulativo sta nella sua intuitività: sia i pianificatori che gli operatori possono facilmente comprenderlo. Tuttavia vi sono alcune criticità. Anzitutto, la modellazione simulativa richiede una grande mole di dati sia per la costruzione del modello che per il suo corretto mantenimento e la gestione. In secondo luogo, come per l'approccio basato sull'ottimizzazione, la simulazione spesso non tiene conto della componente stocastica, generando così uno scostamento notevole tra quanto previsto dal modello e quello che effettivamente si verifica in produzione. In realtà, oramai molti software offrono la possibilità di introdurre degli elementi di stocasticità attraverso l'impiego di particolari distribuzioni statistiche per alcuni parametri come ad esempio il tempo di lavorazione, la distribuzione dei *failure*, etc.

Un'alternativa allo scheduling comunemente utilizzata è il dispatching, ossia l'impiego di regole di priorità per l'avanzamento dei materiali nelle risorse per modificare opportunamente lo schedule. In questo caso la decisione riguardo quale ordine selezionare tra quelli disponibili in coda viene presa "localmente" presso ogni centro di lavoro. Poiché finora non vi è una comprensione chiara delle circostanze in cui una data dispatching rule funziona al meglio; tentare di identificarne una davvero efficace è complicato e può portare a risultati fuorvianti.

Spesso i ricercatori suddividono i sistemi di controllo della produzione in *Push* e *Pull* secondo il criterio utilizzato per il rilascio degli ordini (Hopp e Spearman, 2004; 2008). Nei sistemi di tipo *Push*, gli ordini di produzione sono pianificati: le lavorazioni di testa incominciano nella data di rilascio pianificata, calcolata sottraendo un appropriato valore del lead time alla data di consegna proposta al cliente. Nei sistemi *Pull* invece il rilascio di un ordine di produzione è legato al completamento di un altro ordine o in ogni caso tiene conto dello stato contingente del sistema produttivo, ed in particolare del livello di work-in-process. In altri termini i sistemi pull sono essenzialmente quelli in cui la produzione è basata sul consumo al processo precedente. In accordo con quanto sostenuto da Hopp e Spearman (2004, 2008), i principali vantaggi di un sistema pull sono: una riduzione del WIP e dei tempi di ciclo (dato che i sistemi pull limitano il WIP rendendo impossibile la sovra-produzione), un flusso di produzione più livellato ed un miglioramento della qualità. Benché non siano la stessa cosa (ma concetti tra loro collegati), il kanban è spesso collegato ai sistemi pull (difatti pull è il principio di schedulazione, mentre il kanban è uno dei meccanismi pull). L'implementazione del kanban non è agevole ed efficace e talvolta impossibile in contesti con produzione su ordine dove tipicamente è presente una varietà estremamente elevata di prodotti realizzati in bassi volumi.

Il concetto di Workload Control nasce negli anni 70 come conseguenza a prestazioni insoddisfacenti ottenute tramite i sistemi di pianificazione e controllo della capacità che utilizzavano sistemi di carico a capacità infinita basati su dei valori prestati o storici dei lead time. Il workload control invece considera i lead time come delle variabili governabili tramite il rilascio controllato degli ordini. L'insieme dei metodi per il rilascio controllato degli ordini, facenti parte del workload control, consente di applicare logiche *pull* nella gestione del rilascio degli ordini², e quindi di limitare il Work In Process (WIP) in ambienti

² Si fa distinzione tra sistemi Pull e Push in rilascio ed in movimentazione così come definito da Hopp e Spearman (1996). Molti autori hanno dimostrato che un sistema pull in rilascio e push in movimentazione è

to-order. I metodi di controllo del WIP applicati ai sistemi manifatturieri mediante rilascio controllato del carico sono noti anche come *Order Review and Release (ORR) techniques* (Cigolini e Portioli, 2002; Bergamaschi *et al.*, 1997; Wiesner, 1995).

In che contesto, in che condizioni e in che modo i sistemi *Pull* e *Push* siano più adatti è ancora oggetto di dibattito³. Il grande successo delle aziende giapponesi ed in particolar modo del Toyota Production System (TPS) negli anni '80 e nei primi anni '90, ha reso i sistemi pull molto popolari. Spearman e Zazanis (1992) sostengono che “*the effectiveness of pull systems does not result from pulling (everywhere) but from limiting WIP and WIP variability.*” Secondo Hall (1981) i sistemi pull sono adatti per ambienti manifatturieri ripetitivi, ma non funzionano efficacemente negli ambienti complessi to-order.

Il Workload Control (WLC) è un sistema di Pianificazione e Controllo della Produzione efficace in ambienti manifatturieri complessi operanti con logica make-to-order e caratterizzati come noto da un notevole mix produttivo, elevata variabilità dei cicli e dei tempi di lavorazione (Stevenson *et al.*, 2005). Secondo Moreira e Alves (2009) i sistemi produttivi di tipo job shop sono tra i più diffusi tra le aziende manifatturiere; il controllo dell'input e dell'output offerto dal WLC diventa quindi di cruciale importanza al fine di incrementare le prestazioni operative. Una delle funzioni chiave del WLC consiste nel rilascio controllato degli ordini con l'obiettivo di limitare e mantenere stabile il carico di lavoro (*workload*) di ogni centro, garantendo al contempo un adeguato bilanciamento delle risorse produttive, al fine assicurare tempi di attraversamento brevi e stabili e quindi di rispettare migliorare le prestazioni di consegna al cliente (Land e Gaalman, 2006). Nella fase di rilascio viene determinato quando ciascun ordine può essere introdotto in produzione. Piuttosto di finire in attesa in lunghe code e competere per la capacità delle risorse, gli ordini attendono di essere rilasciati nel “portafoglio ordini” fintantoché il valore del carico di lavoro dei centri interessati dal ciclo produttivo non raggiunge un valore tale da consentirne il rilascio (Wiendahl, 1995). Il portafoglio ordini presenta due peculiarità:

più robusto rispetto ad una soluzione pull-pull. Questo risulta sempre più evidente man mano che il contesto manifatturiero cresce di complessità.

³ Qui si fa riferimento alla distinzione tra sistemi *pull* e *push* in fase di rilascio e di movimentazione dei materiali secondo la definizione fornita da Hopp e Spearman. In particolare un sistema è pull in rilascio quando mantiene costante il WIP nel sistema produttivo. È pull in movimentazione quando il WIP è mantenuto costante tra risorse che compiono operazioni consecutive. Il JIT è un sistema pull in rilascio e movimentazione. Il DBR è pull tra il Drum e l'ingresso dei materiali (il WIP è limitato), mentre la modalità con cui il materiale viene movimentato è push. Un ulteriore esempio di sistema pull in rilascio è il Workload Control che si fonda sulla teoria del controllo degli input e degli output per cui il materiale è rilasciato solamente quando vi è effettivamente capacità disponibile. L'MRP è un sistema *push* sia in rilascio (non considera lo stato della fabbrica e si basa su lead time standard) che in movimentazione

(1) da una parte isola la fabbrica dalle continue fluttuazioni presente nel flusso degli ordini in arrivo e (2) dall'altra riduce il costo legato al mantenimento del work-in-process, la percentuale di scarti e il ricorso all'*expediting* degli ordini (Land e Gaalman, 1998; Thurer *et al.*, 2009). Una volta rilasciato, l'ordine permane nel reparto fintantoché tutte le operazioni previste dal ciclo tecnologico non sono completate. L'avanzamento degli ordini in produzione è controllato dalle regole di *dispatching* che vengono applicate ai materiali in coda nei centri di lavoro; il principio sottostante al WLC è proprio quello di controllare tali code.

Benché il WLC sia stato sviluppato a partire dai primi anni '80, fin ora sono state riportate solamente una manciata di casi applicativi di successo (e.g. Bechte, 1988 e 1994; Wiendahal, 1995; Stevenson *et al.*, 2007). Inoltre diverse ricerche empiriche hanno dimostrato che vi è una scarsa conoscenza del modello del WLC tra gli addetti ai lavori (Silva *et al.*, 2006; Stevenson 2006a). Negli ultimi anni i lavori scientifici hanno dato vita ad una proliferazione dei metodi e delle tecniche appartenenti al modello WLC. Tuttavia la maggior parte degli studi di natura simulativa ha testato tali metodi utilizzando modelli concettuali di sistemi produttivi estremamente semplificati (i cosiddetti *hypotetical models*). In particolare è fondamentale sottolineare che nessuno studio ha introdotto direttamente le distinte base ed i cicli tecnologici degli ordini, elementi che sono tuttavia di primaria importanza nella gestione dei sistemi job shop.

Questa tesi, attraverso un approccio simulativo, esamina i parametri costituenti il metodo WLC in un ambiente produttivo reale di tipo job shop. L'espressione *job shop Production* descrive un sistema manifatturiero che produce beni in piccoli lotti. Gli ordini di produzione in arrivo spesso differiscono nel numero di oggetti da produrre, nella caratteristiche del processo (ad esempio cicli tecnologici, tempi di lavorazione e di set up) e nell'urgenza. In particolare questo lavoro si propone di:

- approfondire le conoscenze teoriche di funzionamento di alcuni metodi e regole facenti parte del modello WLC in un sistema complesso reale, considerando integralmente la struttura di prodotto e dei cicli tecnologici e la distribuzione degli ordini cliente. In particolare:
 - complessità dei flussi di materiale;
 - complessità di prodotto: distinta base profonda;
 - complessità nella distribuzione di arrivi degli ordini (dimensione e frequenza).

- valutare l'effetto e l'interazione dei vari parametri di funzionamento e delle differenti logiche di WLC definiti all'interno del modello proposto su alcuni indicatori di prestazione operativi.
- Testare le prestazioni di un nuovo metodo di rilascio degli ordini facente parte della categoria del load balancing.

L'approccio simulativo consente in primo luogo di testare alcune logiche e in secondo luogo di variare tali logiche e i valori dei parametri di funzionamento del modello senza intervenire direttamente in azienda.

1.1 Originalità rispetto ai lavori precedenti

In letteratura esistono molteplici studi di natura simulativa sul tema del WLC che cercano di studiarne il comportamento al variare di alcuni fattori ambientali (quali variabilità della domanda, *machine reliability*, etc) e dei valori assunti dai principali parametri di funzionamento (ad esempio limiti di carico, periodo di pianificazione, metodo di rilascio, etc). Tuttavia la quasi totalità dei lavori impiega modelli simulativi estremamente semplificati che difficilmente possono rappresentare sistemi manifatturieri esistenti. La maggior parte dei lavori simulativi implementano la struttura teorica di *job shop* proposto da Ragatz e Mabert (1988), in cui sono presenti 6 centri di lavoro, i cicli di lavoro vengono generati in maniera random o semirandom e l'arrivo degli ordini segue una distribuzione esponenziale. La Tabella 1 riporta le caratteristiche del modello di *job shop* proposto da Ragatz e Mabert (1988). Come sottolineato da Wisner (1995) "*in the real world, it is doubtful that a pure job shop exists where a job can begin and end at any department. Indeed, there is usually a dominant product flow that characterize the manufacturing process*".

Tabella 1 – Caratteristiche del *hypothetical job shop* utilizzato da Ragatz e Mabert (1988).

Numero centri di lavoro	6
Macchine per centro di lavoro	1
Routings	Random, no loop
Operazioni per job	Uniforme[1,6]
Interarrival distribution	Esponenziale[media=1 h]
Distribuzione Service time	Esponenziale[media=1,5 h]

L'unicità ed il valore di questo lavoro deriva dalla completezza del modello adottato: come base di simulazione verrà utilizzato un modello che rappresenta molto da vicino un sistema manifatturiero esistente. Gli ordini cliente, il layout produttivo ossia le macchine e

i centri di lavoro, i cicli tecnologici, le distinte e i prodotti sono quelli estrapolati dal database di una media azienda locale operante con logica make-to-order (Tabella 2).

Tabella 2 - Caratteristiche del sistema produttivo simulato.

Numero centri di lavoro	19
Numero Macchine	55
Items	450 prodotti finiti, codici intermedi e materiali complessivamente 3351
BOMs	Da database (massimo 5 livelli)
Routings	Da distinta
Operazioni per job	Variabile da ciclo
Ordini	1247 ordini considerati, compresi in un periodo di 12 mesi, dal 1/1/2009 al 31/12/2009.
Failure distribution	Distribuzione esponenziale

Dall'analisi della letteratura effettuata non sono emersi lavori che affrontano il tema dell'applicabilità del modello WLC e dell'effetto dei parametri di funzionamento in presenza di distinte base di prodotto. Al contrario tutte le simulazioni prendono in esame strutture di prodotto mono livello. L'utilizzo di un database aziendale nella costruzione del modello introduce molteplici elementi di complessità nella simulazione:

- nei materiali (molti prodotti finiti, distinta base profonda);
- nella capacità produttiva (molti cicli tecnologici e pluralità di centri di lavoro, break downs);
- nella domanda (dimensioni e distribuzione degli ordini). Thurer (2009) sottolinea che la variazione degli ordini è un aspetto critico che è presente nei sistemi produttivi reali.

Un ulteriore elemento di valore è la notevole dimensione del piano sperimentale sviluppato, in termini di fattori e livelli considerati (Tabella 3). Gli 8 fattori presi in considerazione che presentano un minimo di 2 ed un massimo di 5 livelli, sono:

- A. periodo di rilascio degli ordini,
- B. time limit,
- C. regole di priorità del portafoglio ordini,
- D. metodo di workload accounting,
- E. limite di carico (workload limit),
- F. metodo di rilascio del carico,
- G. lot splitting,
- H. regole di dispatching.

Tabella 3 – Piano sperimentale.

Fattore	Descrizione	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
A	Release period in giorni	2	5	8		
B	Time limit in giorni	8	14	20		
C	Order pool sequence rules	Earliest Planned Release Date (Bechte 1988, Perona e Portioli, 1996)	Critical Ratio (Bobrowski,1989)			
D	Workload accounting	Arregato	Probabilistico			
E	Workload limit per workcentre	70	140	210	280	
F	Release WLC method	WUL (Wiendahl, 1995)	WLB1 (Cigolini, Portioli, 2002)	WLB2	WLB3 (Fernandes e Silva, 2008)	
G	Lot splitting	Si	No			
H	Dispatching rules	FIFO (First In First Out)	EDD (Earliest Due Date)	SPT (shorter processing time)	CR (critical ratio)	OPNDD (Operation Due Date)

Prima d’ora nessuno studio ha valutato contemporaneamente un numero così ampio di variabili di funzionamento del modello WLC. L’estensione del piano sperimentale consente invece di valutare gli effetti e le interazioni di molti dei parametri costituenti il modello WLC. La Tabella 4 riassume gli obiettivi della ricerca ed i contributi originali proposti.

Tabella 4 – Obiettivi e contributi originali del lavoro.

Obiettivi della tesi	Contributo originale
Testare le prestazioni di alcuni modelli di WLC proposti in letteratura su un sistema “reale”. (Assenza di studi simulativi basati su “ <i>real job shop</i> ”(Perona e Miragliotta, 2000; Stevenson, 2009).	<ul style="list-style-type: none"> - Ampiezza del set di parametri testati (analisi a 8 fattori). - Non tutti i parametri testati sono presenti in letteratura. - Sistema produttivo reale: <ul style="list-style-type: none"> o molti ordini diversi o distribuzione degli ordini “reale” o molti centri di lavoro o distinta base profonda
Stimare l’impatto dei diversi parametri operativi sulle prestazioni del sistema.	
Migliorare i metodi di rilascio degli ordini all’interno della struttura del WLC.	

1.2 Overview della tesi

Il primo capitolo presenta le caratteristiche generali dei sistemi di pianificazione e controllo della produzione, analizzando gli aspetti ambientali contingenti per la loro implementazione, con particolare riferimento alla struttura job shop. Nel secondo capitolo viene introdotta un’analisi della letteratura sulle tecniche di revisione e rilascio degli ordini, suddivisa in studi di carattere generale/descrittivo e studi di natura simulativa. Il terzo capitolo approfondisce la struttura del sistema WLC ed in particolar modo la

metodologia LUMS e LOOR, presentandone gli aspetti peculiari. Un'intera parte sarà dedicata ai metodi di contabilizzazione del carico e all'algoritmo di conversione del carico. Le domande di ricerca, la metodologia, il modello concettuale proposto e il processo sperimentale verranno presentati nel quarto capitolo. Nel quinto capitolo viene presentata l'analisi statistica dei risultati sperimentali. Nell'ultimo capitolo vengono delineate le conclusioni, i limiti principali dello studio e le indicazioni per gli sviluppi futuri della ricerca.

Capitolo 1 - Inquadramento dell'ambito di ricerca

Questo capitolo presenta le caratteristiche generali dei sistemi di pianificazione e controllo della produzione, analizzando gli aspetti ambientali contingenti per la loro implementazione, con particolare riferimento alla struttura di tipo job shop.

1.3 Production Planning and Control System (PPC): una introduzione

Nel contesto competitivo attuale, è sempre più importante perseguire la puntualità nelle consegne, la riduzione dei lead time e del work-in-process, garantendo al contempo di massimizzare l'utilizzo delle risorse. Sfortunatamente questi obiettivi sono contrastanti, come la nota legge di Little (1966) dimostra: è molto più facile completare un ordine nel tempo previsto se il livello di utilizzo delle risorse è ridotto. Peraltro possibile ridurre sia il numero di ordini consegnati in ritardo che il tempo di attesa dal cliente se viene mantenuta una grande quantità di prodotto finito a stock. Un efficiente sistema di pianificazione e controllo della produzione rappresenta uno strumento essenziale per ottenere un opportuno trade-off tra obiettivi contrastanti. Le funzioni tipiche di un sistema di Pianificazione e Controllo della Produzione (PCP) (Stevenson e Hendry, 2006; Zapfel e Missbauer, 1993) sono le seguenti:

- Gestione della domanda: determinare la richiesta di ogni prodotto finito sulla base degli ordini dei clienti o sulla previsione di vendita;
- Pianificazione dei fabbisogni di materiali tenendo in considerazione le politiche di riordino e i tempi di approvvigionamento delle materie prime e dei sottoassiemi;
- Gestione delle scorte;
- Scheduling e sequencing degli ordini;
- Pianificazione e bilanciamento delle capacità;
- Gestione del rilascio degli ordini;
- Monitoraggio delle prestazioni chiave e confronto con gli obiettivi prefissati.

Da oltre quarant'anni il mercato sta offrendo un gran numero di soluzioni software per la gestione e il controllo della produzione. I sistemi software PCP sono progettati in "unità" singole che vengono attivate secondo una sequenza ben determinata. La Tabella 5 riporta i risultati della ricerca di Zapfel e Missbauer, (1993) circa le motivazioni che spingono le aziende a implementare sistemi PCP.

Tabella 5 – Obiettivi perseguiti dalle aziende nell'implementazione di un sistema PPC (Zapfel e Missbauer, 1993).

Motivazioni che spingono all'adozione di un PPC system	Importanza media		
	Production to customer	Stock production	Combinazione di production to order e to stock
Migliore prestazioni sulla consegna	4,22	3,67	3,36
Riduzione throughput time	2,6	3	3,09
Maggiore utilizzo delle risorse	3,06	2,78	3,18
Minor work in process	2,24	3,56	3,64
Elevata flessibilità	2,94	3,33	2

Legenda: 5 importante, 1 non importante

1.4 Production Systems: generalità

Spesso i ricercatori suddividono i sistemi di controllo della produzione in *Push* e *Pull* system secondo la logica di rilascio degli ordini e dei materiali. In un *Push Production System* la produzione è autorizzata quando viene raggiunta la data di inizio pianificata dell'ordine, senza tenere in considerazione lo stato contingente del reparto produttivo. L'MRP (Manufacturing Resource Planning) è un esempio di sistema *push*. In un sistema *pull* invece, la produzione è autorizzata poiché vi è un consumo di materiali. Di conseguenza nei sistemi *pull*, l'autorizzazione dipende dallo stato del reparto. Questi ultimi consentono di controllare il tempo di attraversamento degli ordini mediante la limitazione del work-in-process presente nel sistema produttivo (Hopp e Spearman, 2004, 2008).

Secondo la definizione di Hopp e Spearman (2004) “*A pull production system is one that explicitly limits the amount of work in process that can be in the system. By default, this implies that a push production system is one that has no explicit limit on the amount of work in process that can be in the system. This is the definitions of purely push and purely pull system*”. Tuttavia “*in the real world there are no pure push or pure pull systems. The distinction, however, is that the WIP limit in practical pull systems is explicitly stated and is generally small. Any WIP limit in a practical push system is implicit, large, and usually comes into play too late*” (Hopp e Spearman, 2004)

Hopp e Spearman classificano i sistemi di gestione degli avanzamenti in *push* e *pull* nel modo seguente.

- L'MRP è un sistema *pull* poiché il rilascio avviene in accordo con il master production schedule (MPS) senza considerare il stato del sistema. Quindi non vi è un limite del WIP a priori.

- Il *Kanban* classico è un sistema pull. Il numero di cartellini stabilisce un limite prefissato per il WIP.
- Il *base-stock system* è un sistema push poiché non limita la quantità di WIP nel sistema.
- Il *CONWIP* è un sistema pull poiché limita il WIP utilizzando cartellini simili al kanban. Una differenza importante sta nel fatto che nel CONWIP i cartellini non sono specifici per ogni codice ma per ogni linea. Tuttavia seguendo una prospettiva di contrapposizione tra pull e push, i cartellini del CONWIP limitano il WIP analogamente ai cartellini Kanban
- Il sistema *POLKA* proposto da Suri (1998) è un sistema pull poiché come nel kanban e nel CONWIP il WIP è limitato da cartellini.
- L'MRP con il limite del WIP (come suggerito da Axsäter e Rosling 1994) è un sistema pull.

Bonney e Zongmao (1999) discriminano i sistemi push e pull secondo un criterio differente. Secondo gli autori la definizione di sistemi push e pull dipende dai flussi di informazioni utilizzati per il controllo. “A *pull system* is one in which the control information flow is in the opposite direction to the material flow (i.e. ROP, ROC, Kanban, base stock system). A *push system* is one in which the control information flow is in the same direction as the material flow (i.e. MRP, make to order)”.

Spearman e Zazanis (1992) evidenziano i seguenti punti chiave nella contrapposizione tra sistemi pull e push.

- I sistemi pull risultano meno congestionati.
- I sistemi pull presentano tempi di attraversamenti minori rispetto ai sistemi push.
- Affinché la loro implementazione sia efficace i sistemi pull richiedono un ambiente più stabile rispetto ai sistemi push. Per tale ragione in contesti fortemente instabili i sistemi push sono da preferire.
- I sistemi pull sono di più facile gestione e controllo rispetto ai sistemi push. Il controllo del WIP è modo più robusto per il controllo dei tempi di attraversamento.
- “*The benefits of pull environment owe more to the fact that WIP is bounded than to the practice of pulling everywhere*”.

Il lavoro di Stevenson *et al.* (2005) classifica l'MRP, il Kanban, e la DBR (Drum-Buffer-Rope) (Goldratt, 1992) come approcci classici per il controllo della produzione,

mentre il Workload Control (WLC), il CONWIP (Hopp e Spearman, 1997), il Paired cell Overlapping Loops of Cards and Authorization (POLCA) (Suri, 1998) e una variante di quest'ultimo noto come Generic POLCA system (Fernandes e Carmo-Silva, 2006) come sistemi emergenti.

Land (2009) ha sviluppato un sistema per la gestione del rilascio e degli avanzamenti degli ordini in produzione basato su cartellini noto come COBACABANA (COntrol of BALance by CArd-BAsed NAvigation) adatto alla dinamicità che contraddistingue il job shop. *“As also concluded by Stevenson et al. (2005), none of the currently available card-based systems will meet the dynamic requirements of job shop manufacturing. Cards-based systems for job shop control are lacking, while particularly this industry segment shows a need for simple control systems...It is based on the concept of workload control, which has already proven its value in job shops. Developments towards more robust norms now allow for transforming the WLC concept into a simple card-based system, with loops of cards accompanying orders from release until completion at critical work centers”* (Land, 2009).

In che contesto, in che condizioni e in che modo i sistemi *pull* e *push* siano più adatti è ancora oggetto di dibattito. Il grande successo delle aziende giapponesi ed in particolar modo del Toyota Production System (TPS) negli anni '80 e nei primi anni '90, ha reso i sistemi *pull* molto popolari. Tuttavia Spearman e Zazanis (1992) sostengono che *“the effectiveness of pull systems does not result from pulling (everywhere) but from limiting WIP and WIP variability.”* Secondo tali autori dunque l'aspetto chiave dei sistemi *pull* risiede nella limitazione del work in process. Il grado di efficacia di ogni approccio è certamente legato al contesto produttivo in cui viene applicato ed in particolar modo alla configurazione del sistema in termini di layout, di flusso di materiali, di livello di customizzazione del prodotto offerta al cliente, del tipo di strategia di risposta al mercato, dalla dimensione dell'azienda, del tipo di domanda, etc. Un sistema particolarmente adatto in un determinato contesto può essere completamente inadeguato per un altro ambiente produttivo (Stevenson, 2005). In altre parole affinché il sistema logistico-produttivo possa fornire buone prestazioni è necessario disporre di un sistema di pianificazione e controllo della produzione coerente con il contesto produttivo dell'azienda. Ad esempio secondo Jonsson e Mattsson (2003) *“the objectives of both re-order point and material requirements planning (MRP) methods are to plan when and how much to order of individual items”* Mentre il punto di riordino può essere implementato in assenza di

supporto informativo, l'MRP richiede un supporto computerizzato e la sua applicazione è più adatta nei prodotti con struttura complessa (distinte ampie e profonde), domanda dipendente e irregolare e lead time estesi. Simili differenze nel grado di applicabilità si possono identificare per altri metodi di pianificazione dei materiali, delle capacità (e.g. capacity bills vs capacity requirements planning) e *shop floor control* (e.g. input/output control vs finite/infinite capacity scheduling) (e.g. Fogerty *et al.*, 1991; Vollmann *et al.*, 1997).

Le cause di variabilità possono essere suddivise in due fattori. Ogni azienda è un insieme complesso di elementi/funzioni/risorse interdipendenti soggette ad un naturale grado di *variabilità interna* che include ad esempio il set-up, il downtime, le fluttuazioni nella produttività degli operatori, i difetti, le rilavorazioni, etc. La dipendenza tra le risorse ne amplifica l'effetto negativo (delle fluttuazioni) considerando via via gli stadi più a valle nel processo, precludendo la possibilità di ottenere l'output medio pianificato. Ogni azienda è altresì sottoposta a una *variabilità esterna* causa di turbolenze ambientali, prima tra le quali è da annoverare l'instabilità della domanda di mercato. La variabilità esterna è talvolta dovuta alla strategia di business seguita dall'azienda, come ad esempio il livello di varietà di prodotto offerta al cliente. L'effetto della variabilità (nella domanda o nella produzione) di un sistema produttivo può essere ridotto introducendo dei buffer. Ne esistono essenzialmente di tre tipi:

- scorte (i.e. safety stock);
- capacità (i.e. capacità produttiva in eccesso);
- tempo (i.e. lead time di sicurezza).

Secondo Nicholas (1997) vi sono cinque requisiti fondamentali per poter implementare un sistema pull:

- Produzione a flusso,
- Ampiezza del mix produttivo limitata,
- Tempi di set-up ridotti,
- Variabilità della domanda contenuta,
- Limitata variabilità di processo dovuta a guasti e problemi qualitativi.

Molti autori classificano le strutture produttive in base alla strategia di risposta al mercato, al volume, alla varietà e al grado di personalizzazione offerto nei prodotti. Il

lavoro di Amaro *et al.* (1999) presenta una nuova tassonomia per le aziende non-MTS (non make-to-stock) sulla base del livello di lavorazioni svolte successivamente alla ricezione di un ordine e del livello di customizzazione richiesto. La classificazione delle modalità di risposta alla domanda commerciale proposta da Wortmann si presenta efficacemente a rappresentare i possibili posizionamenti del punto di disaccoppiamento previsioni-ordini, lungo gli stadi logistico-produttivi della supply chain (Figura 1). Le aziende vengono distinte in:

- aziende con prodotti a catalogo su previsione, dette anche Make to Stock (MTS) o con produzione per magazzino: le fasi di progettazione, acquisti, fabbricazione e montaggio sono tutte eseguite su previsione;
- aziende con prodotti a catalogo assemblati su ordine, anche dette Assemble to Order (ATO): le fasi di progettazione, acquisti e fabbricazione sono eseguite su previsione mentre il montaggio su ordine;
- aziende con prodotti a catalogo costruiti su ordine, anche dette Make to Order (MTO): progettazione e acquisti sono svolte su previsione; mentre fabbricazione e montaggi su ordine del cliente;
- se anche gli acquisti sono eseguiti su ordine del cliente si parla di imprese Purchase to Order (PTO), cioè che acquistano su ordine;
- aziende con prodotti su commessa, anche dette Engineer to Order (ETO): le fasi di progettazione, acquisti, fabbricazione e montaggio sono svolte tutte su ordine del cliente.

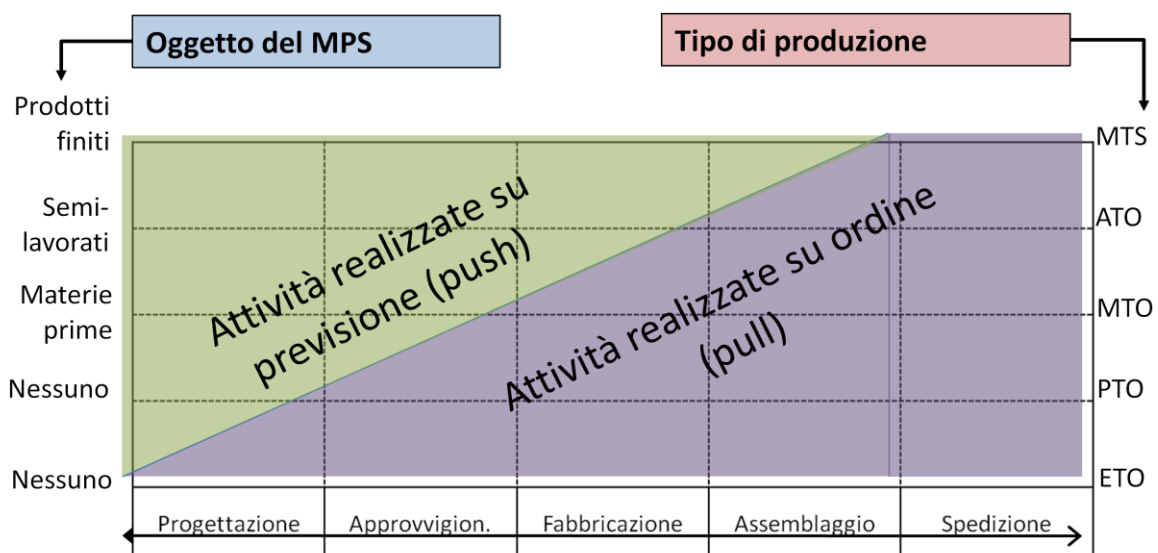


Figura 1 – Strategie di risposta al mercato.

Non è raro il caso in cui un'azienda operi con strategie miste. Chiaramente la varietà di prodotti ed il grado di customizzazione offerti tende ad aumentare andando da aziende MTS verso quelle di tipo ETO. *The inventory/order (I/O) interface* rappresenta il punto all'interno del processo nel quale si passa da una produzione to stock ad una su ordine. Tali interfacce sono presenti in tutti i sistemi e il loro posizionamento rappresenta una decisione gestionale. “*Locating the inventory/order interface at raw materials produces a conventional make-to-order system, while locating it at finished goods produces a classic make-to-stock system. Locating it at an intermediate point leads to an assemble-to-order system, which can be used if the firm wants to be able to quote customer lead times that are shorter than the overall manufacturing cycle time*” (Hopp e Spearman , 2004).

Diversi testi di Operations Management propongono degli schemi che mettono in relazione i sistemi di Pianificazione e Controllo della Produzione con la tipologia di prodotto e di processo caratterizzanti l'azienda (ad esempio Vollmann *et al.*, 1997; Silver *et al.*, 1998 in Figura 2).

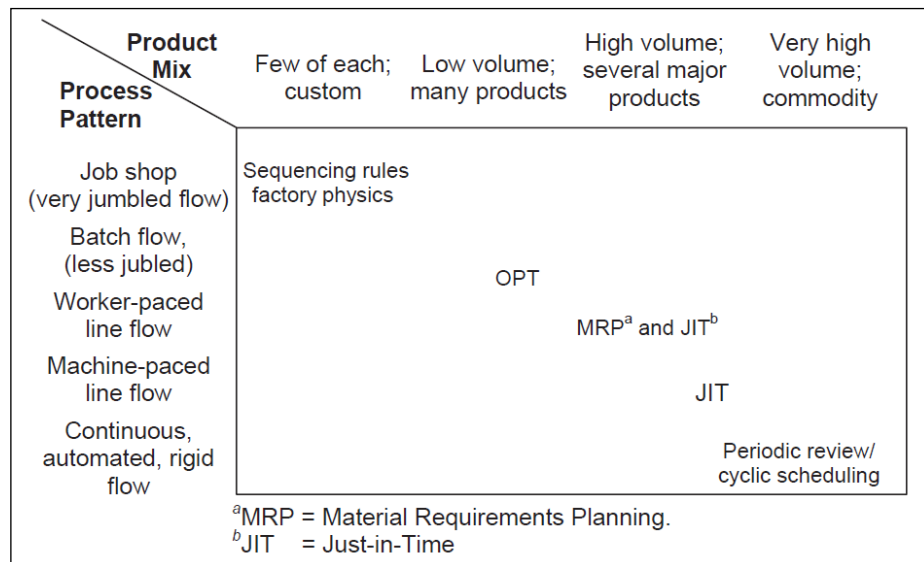


Figura 2 – Posizionamento dei sistemi PCP nella matrice prodotto-processo (Silver *et al.*, 1998)

Vollmann *et al.* (1997) hanno proposto un framework per valutare l'applicabilità dell'MRP e del JIT nelle differenti realtà produttive, suddividendo le aziende in due gruppi principali: “*Market Requirements*” e “*Manufacturing*” (Tabella 6).

Tabella 6 – Framework per valutare l'MRP e il JIT come metodi per il shop floor control (Vollmann *et al.*, 1997).

Strategic variables			Shop floor system approach	
			MRP-based	JIT-based
Market requirements	Product	Design	Custom	Standard
		Variety	Wide	Narrow
	Individual product		Low	High
	Accommodating demand changes	Total volume	Easy/incremental	Difficult/stepped
		Product mix	High	Low
	Delivery	Speed	Achieved by schedule change	Achieved through finished goods inventory
Schedule changes		More difficult	Less difficult	
Manufacturing	Process choice		Low-volume batch	High-volume batch/line
	Changeover cost		High	Low
	Organizational control		Centralized	Decentralized (shop-floor-based)
	Work in process		High	Low
	Source of cost reduction	Overheads	Low	High
		Inventory	Low	High

L'applicabilità dei diversi sistemi di pianificazione e controllo della produzione dipende anche in misura sostanziale dalla configurazione del job shop. In linea teorica si possono distinguere quattro configurazioni principali (Stevenson *et al.*, 2005):

- Pure Flow Shop (PFS);
- General Flow Shop (GFS);
- General Job Shop (GJS)
- Pure Job Shop (PJS).

La caratteristica che differenzia il *shop floor* dal *job shop* è la natura e la direzione del flusso di materiali. In un *pure flow shop* il materiale fluisce in un'unica direzione secondo una sequenza fissa. In un *general flow shop* vi è ancora una direzione preferenziale dei materiali, tuttavia è presente un certo grado di variabilità nei cicli di lavorazione e quindi di customizzazione dei prodotti finiti. In un *pure job shop* le sequenze di lavoro sono random: i job possono iniziare il ciclo di lavorazione e terminarlo in qualsiasi risorsa offrendo il massimo grado di personalizzazione al cliente. Il job shop è configurazione la più frequente nella maggior parte delle aziende make-to-order (Musa e Hendry, 2003), tuttavia è molto improbabile nella configurazione di tipo pure job shop. Nelle aziende difatti, esiste sempre, seppur di grado ridotto, una direzione dominante nel flusso di materiali (Oosteman *et al.*, 2000). Nella struttura di tipo *general job shop* il flusso è multi direzionale anche se presenta una direzione preferenziale. I job shop sono sistemi dinamici complessi, “for which future conditions cannot be anticipated by analysing only current performances” (Onur e Fabrycky 1987).

Mentre da un lato si osserva una certa convergenza sulla definizione della struttura di gestione più idonea per i contesti "a flusso", dall'altro la letteratura di riferimento esprime posizioni controverse circa le specificità che essa dovrebbe possedere per l'applicazione in ambienti job shop. Secondo Hall (1981) i sistemi pull sono indicati per ambienti manifatturieri ripetitivi, mentre spesso risultano inadeguati in ambienti complessi Make-to-Order che come fanno notare Cigolini e Portioli (2002) sono tipicamente le caratteristiche distintive delle piccole medie aziende che rappresentano, in molti Paesi, la spina dorsale del sistema manifatturiero. Ad esempio il Kanban è uno strumento inefficace e talvolta impossibile da implementare in contesti in cui la produzione è gestita su ordine e dove viene offerto una personalizzazione spinta dei prodotti, con volumi estremamente ridotti. Come indicato da Melnyk *et al.* (1991, 1992, 1994) *"the effectiveness of the planning procedures is deeply related to their ability in controlling the overall environmental variance mainly in the short and medium term, since capacity planning has been performed already"*. In particolar modo, una variazione eccessiva e non controllata del Work-in-Process può generare forti criticità e influire negativamente su molteplici indicatori di prestazione, come ad esempio il tempo di attraversamento medio degli ordini, l'utilizzo delle risorse e il ritardo nella consegna: *"WIP control has been shown to be one of the key issues for successful job shop management"* (Shimoyashiro *et al.*, 1984). Un approccio comunemente impiegato per il controllo del livello di work-in-process nei sistemi manifatturieri consiste in *"planning the workload that can be put into the system and when this decision is to take place"* (Cigolini *et al.*, 1998). Un punto sul quale la maggioranza dei ricercatori conviene è il seguente: *"the starting line for an effective workload control is in a good understanding of the relationship between WIP, mean lead time and throughput rate"* (Bergamaschi *et al.*, 1997). Tale relazione è stata definita teoricamente per la prima volta nel lavoro di Little (1961) e più recentemente esaminata attraverso un approccio simulativo da Shimoyashiro *et al.* (1984) e da Hopp e Spearman (2000). Secondo i risultati di questi studi, quando il WIP eccede un determinato livello, il throughput cessa di aumentare, mentre i lead time medi continuano a dilatarsi. Inoltre *"it gave a strong indication towards the existence of a critical level of WIP inventory or workload that should be kept in the system"* (Bergamaschi *et al.*, 1997). Questi risultati hanno spinto molti studiosi a ricercare una modalità efficace per la gestione integrata del WIP e dei lead time attraverso il controllo del carico di lavoro in ingresso in produzione. Secondo Bergamaschi *et al.*, (1997) *"The two basic mechanisms by which means*

researchers attempted to control the shop's workload were the limitations of load released to the shop and the balancing of workload among different workcentres of the shop.”

Il Workload Control rappresenta un sistema di pianificazione e controllo della produzione che consente di applicare logiche *pull* nella gestione del rilascio degli ordini⁴, e quindi di controllare adeguatamente il work-in-process in ambienti to-order complessi. I metodi di controllo del WIP applicati ai sistemi manifatturieri mediante rilascio controllato del carico sono noti anche come *Order Review and Release (ORR) techniques* (Cigolini e Portioli, 2002). Il lavoro di Hendry e Kingsman (1989) descrive il *Workload Control* come un sistema particolarmente adatto a contesti di tipo job shop operanti con logica to-order. Tuttavia, come accade per il Just-In-Time e per il Material Requirements Planning, anche le prestazioni del WLC dipendono fortemente dalle caratteristiche strutturali del contesto produttivo in cui viene implementato. Hendrich *et al.*, 2004 hanno proposto e testato un framework a supporto delle valutazioni preliminari sull'applicabilità o meno del metodo WLC in diversi contesti produttivi. In particolare gli autori sostengono che il WLC è efficace in presenza di:

- elevata variabilità nella distribuzione dell'arrivo degli ordini (timing e dimensioni);
- elevata variabilità dei cicli di lavoro (sequenza e lunghezza).

1.5 Il Job Shop

I ricercatori hanno coniato termini specifici per indicare le differenti disposizioni di macchinari nel sistema produttivo e le tipologie di flusso di materiali attraverso la fabbrica. Nella struttura nota come *Flow Shop* le macchine sono disposte in serie. L'ordine inizia ad essere lavorato dalla prima macchina a monte, procede attraverso diverse stazioni intermedie e termina le lavorazioni in un centro di lavoro finale. La disposizione in serie implica una struttura lineare del reparto. In un *Pure Flow Shop* i job sono processati nei vari centri di lavoro seguendo sempre lo stesso ordine. La struttura nota come *General Flow Shop* è invece leggermente differente, poiché un job può “saltare” qualche macchina. Ad esempio, mentre alcuni job possono procedere da sinistra verso destra, alcuni altri possono essere lavorati con una sequenza leggermente differente.

⁴Si fa distinzione tra sistemi Pull e Push in rilascio ed in movimentazione così come definito da Hopp e Spearman (1996). Molti autori hanno dimostrato che un sistema pull in rilascio e push in movimentazione è più robusto rispetto ad una soluzione pull-pull.

L'espressione *Job Shop Production* descrive un sistema manifatturiero che produce beni in piccoli lotti. Gli ordini di produzione in arrivo spesso differiscono nel numero di oggetti da produrre, nelle caratteristiche del processo (ad esempio cicli tecnologici, tempi di lavorazione e di set up) e nell'urgenza richiesta. Generalmente le macchine sono di tipo "universale" (le cosiddette "*general purpose machines*"; cioè macchine utilizzate per ottenere molti differenti risultati di lavorazione tramite l'uso di vari tipi di attrezzaggi e varie forme di "governo" dei parametri della lavorazione stessa come ad esempio avanzamenti, profondità di passata ecc.) e sono raggruppate per funzione tecnologica svolta e impiegate nella produzione di una vasta gamma di prodotti finiti.

Il job shop è uno dei processi produttivi più comuni, riscontrabile in molte aziende manifatturiere (Cigolini e Portioli, 2002; Stevenson *et al.*, 2005; Moreira e Alves, 2009). Tipico esempio di job shop è l'officina meccanica dotata di macchine utensili di vario tipo (torni, fresatrici, trapani, ecc) per la produzione di particolari meccanici realizzati a partire da grezzi di fusione o da materiali siderurgici indefiniti (barre, profilati, lamiere ecc.). In questo tipo di sistema produttivo ogni ordine di lavorazione (che può riguardare un singolo pezzo oppure un lotto costituito da un certo numero di pezzi) richiede l'esecuzione di un certo tipo di operazioni da eseguire secondo un ordine (più o meno) prestabilito; il "ciclo di lavorazione" è un documento di lavoro che accompagna il pezzo o il lotto e precisa appunto la sequenza delle operazioni da eseguire. Data la struttura random dei cicli di lavoro un ordine può attraversare uno, molti o tutti i centri di lavoro (Figura 3).

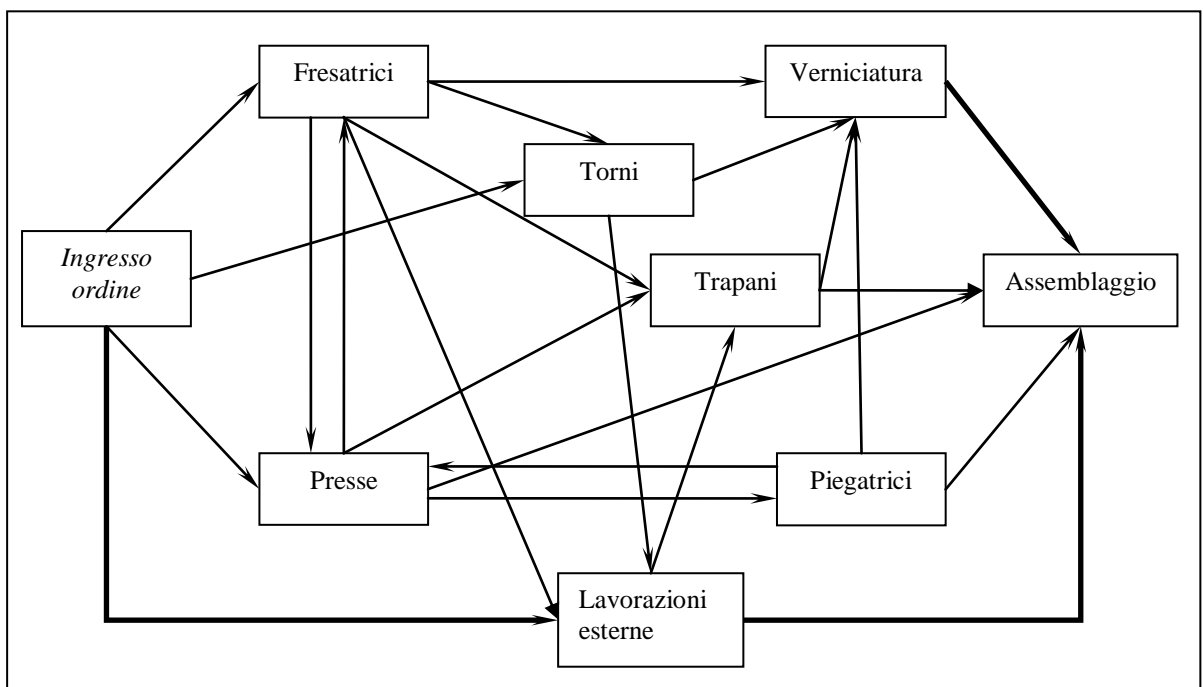


Figura 3 - Esempio schematico di ciclo in un sistema produttivo job shop

La complessità intrinseca al job shop ha un profondo impatto sulla gestione del reparto e rende molto difficile prevedere l'utilizzo delle macchine così come l'insorgenza di colli di bottiglia. Come risultato, la quantità di work-in-process in un sistema job shop è tipicamente elevata, così come il tempo di attraversamento degli ordini. Questi aspetti evidenziano l'opportunità di introdurre un sistema per il controllo dell'introduzione del carico di lavoro presente in produzione al fine di stimare, tra le altre cose, in modo il più accurato possibile le date di consegna degli ordini.

La struttura *job shop* non presenta le restrizioni nel flusso di materiali vista nel *flow shop*. Qui infatti gli ordini possono essere processati nei centri di lavoro in qualsiasi ordine. Il modello di job shop tipico utilizzato dai ricercatori prevede m macchine e n ordini da processare. Ogni job richiede m operazioni, una per ciascuna macchina, previste in uno specifico ordine che può tuttavia essere differente per ciascun job. In realtà le strutture produttive sono molto più complesse: i job possono non richiedere l'utilizzo di tutte le m macchine presenti ed inoltre possono impegnare determinate risorse più volte (flusso rientrante) (Oosterman *et al.*, 2000). In un job shop il flusso di materiale non è unidirezionale. Un centro di lavoro potrebbe svolgere le operazioni di testa per un dato ordine e quelle intermedie o finali per un altro. La Figura 4 illustra il flusso di materiali in un centro i .

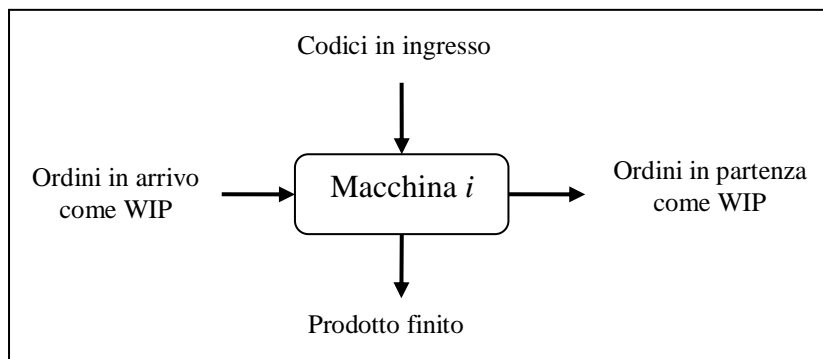


Figura 4 - Una macchina in un Job Shop

Un ulteriore elemento di complessità nel Job Shop è la presenza delle cosiddette macchine parallele (*parallel machines*), in sostanza coppie o multipli di macchine che svolgono la stessa operazione: un ordine in ingresso può essere schedato indifferentemente per ciascuna di queste risorse. Questo elemento se da una parte introduce flessibilità al sistema, dall'altra complica la schedulazione.

Riassumendo alcune tra le peculiarità di un sistema produttivo di tipo job shop sono:

- Gli ordini differiscono nel numero delle operazioni;
- il tempo di lavorazione degli ordini nei centri di lavoro è molto variabile: possono esservi degli ordini con tempi di lavorazione ridotti ed altri con tempi molto elevati;
- il numero di ordini che arriva in un dato intervallo di tempo può essere molto variabile: molti ordini possono pervenire in un intervallo molto ristretto, mentre può succedere che per un periodo relativamente lungo non vi siano ordini;
- Ogni ordine di lavoro possiede una data di consegna prevista.

Il controllo della produzione è generalmente un'attività molto complessa in sistemi produttivi come quello appena descritto. Alcuni autori distinguono tra: l'approccio centralizzato e approccio gerarchico. Nell'approccio centralizzato "*management norms are directly converted into detailed decision concerning the quantity and timing of operations. In this way a detailed production schedule is determined*". Per ogni operazione di ogni ordine vengono specificati la macchina, l'operatore, le attrezzature e l'istante di inizio. È chiaro che di fronte a *disruption* o problemi di qualsiasi tipo sono necessarie continue e frequenti ri-schedulazioni. Nella maggior parte dei casi è difficile determinare con grande accuratezza uno schedule attendibile; ciò è dovuto alla natura stocastica dell'ambiente produttivo e alla mancanza di adeguate infrastrutture di comunicazione. Ad esempio:

- gli ordini arrivano in maniera dinamica, quindi non è noto l'istante dell'arrivo;
- molti processi non possono essere completamente sotto controllo. Quindi problemi di guasti e di qualità sono elementi di incertezza che possono richiedere l'impiego di orario straordinario, riparazioni, etc;
- guasti e downtime delle macchine;
- Assenteismo degli operatori.

L'approccio gerarchico scinde il problema del controllo in un numero di sottoproblemi di livello differente (Meal, 1984; Bertrand e Wortmann, 1981) "*The approach is directed at the design of self contained task and the creation of slack, which is necessary to make the task sufficiently self-contained. At the different levels in the organization there are different sets of decision competences*".

Le ricerche sul tema del controllo della produzione nei sistemi job shop assumono prospettive differenti. Nella *schedulazione statica* si presuppone che sia disponibile un dato set di job; viene quindi generato uno schedule che ottimizza un opportuno indicatore di prestazioni. Ne consegue un problema NP-hard⁵, che richiede per la sua risoluzione un tempo di calcolo estremamente elevato in presenza di problemi di dimensioni ridotte. La seconda prospettiva assume una situazione dinamica più realistica, dove i job sopraggiungono continuamente. In tal caso, schedulare con estrema precisione l'istante di inizio e di fine per ogni operazione di ogni ordine diventa poco realistico. I nuovi arrivi combinati con la variabilità intrinseca al job shop creano instabilità nello schedule e accrescono la necessità di introdurre un efficiente sistema di feedback che dal reparto fornisca costantemente aggiornamenti sullo stato di avanzamento degli ordini. Gran parte delle ricerche sui *job shop dinamici* si è focalizzata sulle regole di priorità, scartando la schedulazione, specificando quali sono i criteri di sequencing da adottare per ogni risorsa. E' pressoché inevitabile che degli ordini attendano che una risorsa si liberi. Le code di ordini agiscono da buffer e contribuiscono a garantire un adeguato utilizzo. Proprio un controllo efficace delle code è uno degli elementi chiave sottostanti il Workload Control (Hendry e Kingsman, 1989; Henrich *et al.*, 2003a).

Il tema del controllo dell'*input* e del *output* nei sistemi produttivi e dei meccanismi di rilascio degli ordini, negli ultimi anni, ha ricevuto grande attenzione da parte della letteratura scientifica (Kingsman, 2000; Oosterman *et al.* 2000; Haskose *et al.*, 2002, 2004; Henrich *et al.*, 2004; Land, 2006; Stevenson, 2006; Stevenson e Hendry, 2006, per citarne alcuni). Recentemente, infatti, i meccanismi di rilascio degli ordini sono stati riconosciuti dai ricercatori come uno strumento di controllo operativo molto più efficace rispetto alle regole di dispatching (Yucesan *et al.*, 2000). Il workload control invece considera i lead time come delle variabili governabili tramite il rilascio controllato degli ordini. E' frequente osservare che le schedulazioni ottenute in estremo dettaglio possono diventare obsolete in poche ore a causa della natura dinamica dell'ambiente manifatturiero (rotture delle macchine, assenteismo, difetti, etc). Inoltre i profili di carico che risultano

⁵ I problemi matematici possono essere suddivisi in due classi a seconda della loro complessità (Hopp e Spearman, 2000). I problemi di classe P (*Class P problems*) sono problemi che possono essere risolti utilizzando degli algoritmi il cui tempo di calcolo aumenta in ragione di una funzione polinomiale della dimensione del problema. Nei problemi NP-hard (*NP-hard problems*) invece non sono noti algoritmi polinomiali per la loro risoluzione, ed il tempo di risoluzione cresce esponenzialmente con le dimensioni del problema (molto più rapidamente della funzione polinomiale). Benché non sia stato definitivamente provato che non esistono algoritmi polinomiali adatti alla risoluzione di problemi NP-hard, molti eminenti matematici hanno tentato la loro individuazione, ma hanno fallito. Al momento l'evidenza suggerisce dunque che nessuno ancora è stato capace di provare se problemi NP-hard sono risolvibili in tempo polinomiale.

dall'infinita capacity loading sono spesso inaccurati poiché sono inaccurati i valori stimati per i lead time (Becthe, 1980). L'imprecisione nella stima dei lead time è la conseguenza di due questioni correlate. In primo luogo la distribuzione dei tempi di lavorazione delle risorse spesso presenta un elevato grado di variabilità (Missbauer, 2002). In secondo luogo, l'impiego di lead time ottenuti da dati storici definisce il livello di WIP dei centri di lavoro, che a sua volta definisce il valore dei lead time; può instaurarsi quindi un circolo vizioso, teorizzato da Ploss, che porta il pianificatore rilasciare gli ordini via via sempre con maggiore anticipo per far fronte ad un incremento dei lead time medi, che è dovuto ad un aumento del WIP.

1.6 Gestione dell'ordine nel sistema PPC

Spesso in letteratura le espressioni “*Order Review and Release*” e “*Workload Control*” sono utilizzate indistintamente. La maggior parte della letteratura di origine europea ha utilizzato l'espressione Workload Control (WLC), mentre in quella statunitense è più frequente l'impiego di Order Review and Release (ORR). Ciò nonostante il Workload Control rappresenta uno specifico sottoinsieme delle regole di revisione e di rilascio degli ordini, sviluppate negli stessi anni, ma in modo indipendente dalle università di Lancaster e di Hannover.

All'interno del sistema di controllo della produzione, l'ORR funge da interfaccia tra il sistema di pianificazione e la produzione. In altre parole l'ORR gestisce la transizione degli ordini di produzione dal sistema di pianificazione alla fase esecutiva determinando:

- quale ordine può essere rilasciato in produzione;
- in quale istante il rilascio deve verificarsi.

Negli studi presenti in letteratura sono state proposte e valutate molteplici tecniche di ORR. E' riconosciuto all'unanimità che non esiste “*the one best way*” nella gestione del rilascio degli ordini, poiché le prestazioni del sistema non dipendono solamente dal metodo impiegato, ma anche da variabili legate al struttura contingente del sistema produttivo. Il lavoro di Bergamaschi *et al.* (1997) descrive il ruolo dell'ORR all'interno di un framework generale sui sistemi di controllo della produzione come riportato in Figura 5.

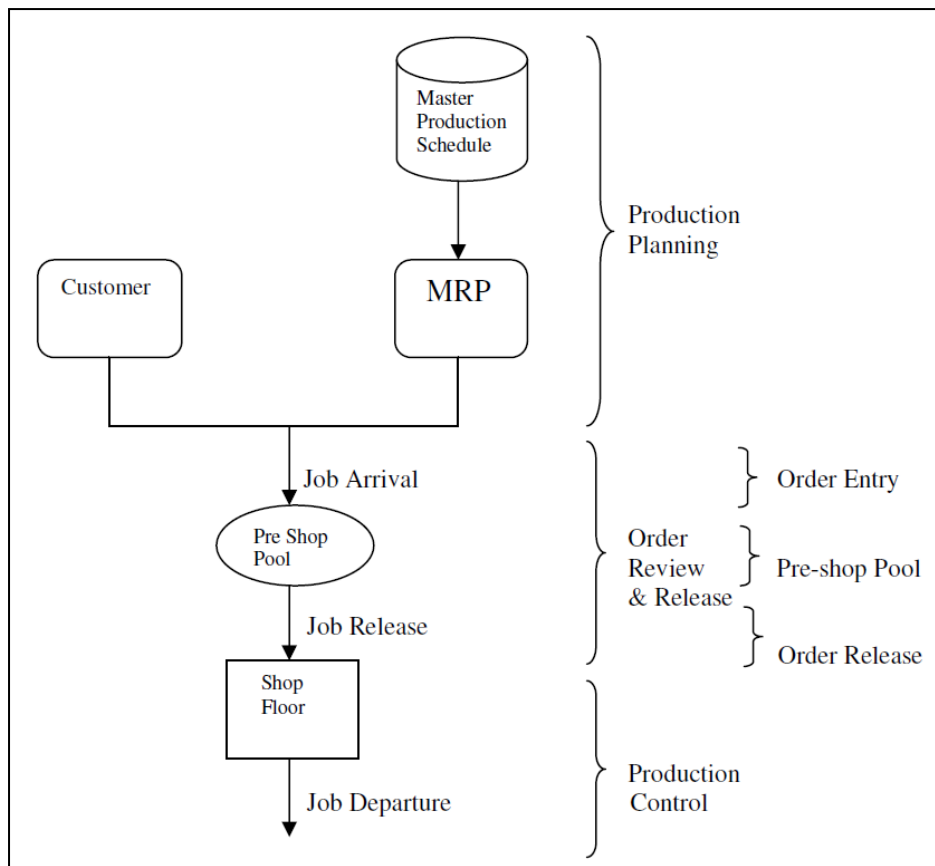


Figura 5 - -ORR all'interno del framework del shop floor control system (Bergamaschi, 1997).

Come illustrato dalla Figura 5, gli ordini di produzione, che possono essere generati sia dal sistema di pianificazione o direttamente da ordini cliente, pervengono continuamente al sistema PCP; tuttavia il loro arrivo non ne implica il rilascio immediato in reparto. Al contrario gli ordini vengono inseriti in un *backlog file*, noto come *pre shop pool* o *portafoglio ordini*, il quale ha la funzione di disaccoppiare il sistema di pianificazione e la produzione (Melnik e Ragatz, 1988), al fine di assicurare che non venga rilasciata una quantità eccessiva di ordini, evitando così di congestionare il reparto. In tal senso Zapfel e Missbauer (1993) considerano le ORR come “*the link between production planning and production control*”, mentre secondo Maihotra *et al.* (1994) “*the link between manufacturing strategy and day-by-day management*”.

Quando viene attivata la fase di rilascio, tutti gli ordini presenti nel portafoglio vengono valutati e solamente una parte di essi viene rilasciata. Lo scopo sostanziale è quello di garantire il controllo del livello WIP, mantenendo al contempo un adeguato utilizzo delle risorse e buone prestazioni relativamente alla data di consegna degli ordini. Un sistema di ORR contribuisce a generare code stabili e quindi lead time fissi, attraverso il controllo del

flusso di materiale e del carico di lavoro; rilasciando solamente il materiale che deve effettivamente essere lavorato, il reparto processa quegli ordini che possono essere completati in tempo. Il lavoro di Bergamaschi *et al.* (1997) indica che un sistema di ORR nella forma più generale consiste delle seguenti fasi:

- Order entry;
- Pre-shop pool o order pool;
- Order release;

Di seguito verranno descritte le varie fasi facendo riferimento a questa classificazione.

Order entry

La fase di inserimento dell'ordine (*order entry*) rappresenta l'interfaccia tra l'ORR e il sistema di pianificazione o direttamente con il cliente. In questa fase l'ordine viene preparato ed inserito nel cosiddetto *pre-shop pool*; se necessario sono svolte attività di engineering e si procede alla verificata della disponibilità di macchinari e materiali. In particolare viene:

- definito e confermato il ciclo di lavoro;
- verificata la disponibilità di macchinari, attrezzature e risorse;
- generata una lista di picking di tutti materiali necessari e verificata la loro disponibilità;
- assegnata la data di consegna all'ordine se questa è stabilita internamente al sistema di pianificazione e controllo della produzione.

Una volta che tutti i materiali, le risorse, le attrezzature e le informazioni per processare l'ordine sono disponibili, il job può essere valutato per il rilasciato.

Pre-shop pool

La componente del ORR nota come *pre-shop pool* funge da “deposito” (tipicamente un database) dove sostano tutti quegli ordini di produzione processati dalla fase di *order entry* ma non ancora rilasciati. Consiste sia di materiali richiesti dall'ordine, che semplicemente di *paperwork* ad esso associato. Nessun ordine di produzione processato dalla fase di *order entry* può raggiungere la produzione senza transitare per il *pre-shop pool* (Hendry e Wong, 1994). Gli ordini provenienti dalla fase di *order entry* sono disposti in sequenza secondo la loro priorità. Alcune tra le regole di priorità più utilizzate in questa fase sono:

- Earliest Due Date (EDD) (Ragatz e Mabert, 1988);
- Earliest release date (ERD) (Bechte, 1988; Portioli, 1991; Perona e Portioli 1996);
- Critical ratio (CR) (Bobrowski, 1989);
- Capacity slack based rule (Philipoom *et al.*, 1993).

Gli unici esempi di utilizzo della regola First Come First Served (FCFS) sono i lavori di Baker (1974, 1984).

Order Release phase

Il metodo o il criterio utilizzato per determinare quale ordine rilasciare dal pre-shop pool (come ad esempio l'istante e la condizione che da avvio al rilascio), noto come *triggering mechanism* o *input control mechanism*, è la chiave per un utilizzo efficace dell'ORR. Le informazioni necessarie per stabilire quale ordine rilasciare ogni qualvolta viene esaminato il pool includono:

- lo stato corrente del portafoglio ordini, ossia in numero ed il tipo di ordini in coda;
- lo stato corrente del reparto produttivo, ossia quali ordini sono stati rilasciati in produzione e presso che risorsa si trovano in coda e la capacità del sistema;
- le prestazioni pianificate per il sistema in termini di lead time di produzione e di date di consegna.

Analizzando congiuntamente le caratteristiche degli ordini contenuti nel pre-shop pool, il livello di carico del sistema produttivo e la sua distribuzione tra le risorse, la procedura di rilascio determina se e in che istante il rilascio dell'ordine può avvenire. Molte ricerche dimostrano che all'aumentare dell'efficacia dei meccanismi di rilascio, si riduce l'impatto delle regole di dispatching sulle prestazioni del sistema (i.e. Land e Gaalman, 1998, Bechte, 1988). Altri lavori tuttavia hanno dimostrato che esiste un'interazione significativa tra metodi di rilascio e regole di dispatching (Gentile e Rogers, 2009; Soepenber *et al.*, 2010; Moreira e Alves, 2009).

1.7 Differenze tra job shop reali e modelli simulativi

Questa tesi vuole valutare l'effetto della variazione di alcuni parametri di funzionamento del workload control all'interno di ambienti complessi di tipo job shop. Come verrà presentato in dettaglio in seguito, il modello simulativo è stato costruito sulla base di un database aziendale, riproponendo fedelmente la struttura produttiva in termini di risorse, flussi di materiali, prodotti e di ordini. La maggior parte degli studi simulativi sul

WLC si servono di strutture di job shop ipotetiche (*hypothetical job shop*), ossia configurazioni estremamente semplificate e schematiche che si discostano quindi fortemente da quelle reali. Il modello più adottato dai ricercatori è quello proposto da Ragatz e Mabert (1988). A tal proposito, un recente lavoro di Perona e Miragliotta, inserito nel tema del WLC, indaga se i ricercatori utilizzano o meno modelli aventi caratteristiche simili a quelle dei sistemi manifatturieri reali. In altre parole gli autori si pongono la seguente domanda: “*Do simulated shops’ features rather match real ones’, or not?*“. La Tabella 7 riassume i principali risultati ottenuti. La colonna di sinistra riporta le caratteristiche del “modello medio” utilizzato nei lavori simulativi, la colonna di destra riporta invece le peculiarità dei sistemi produttivi reali, emerse tramite interviste sottoposte ad Operations manager. In particolare le dimensioni considerate nello studio sono la caratterizzazione (a) dei centri, (b) del reparto in generale e (c) degli ordini di produzione.

Tabella 7 – Una comparazione tra modelli di ricerca e job shop reali.

Caratteristiche modelli di ricerca	Caratteristiche sistemi produttivi reali
<p><i>Caratteristiche delle risorse</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Poche macchine (≤ 10) - Assenza di centri di lavoro - Solo una tipologia di macchina - Tempo di set-up indipendente dalla sequenza - Tempo di set up trascurato - No lot splitting 	<p><i>Caratteristiche delle risorse</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Molte macchine (≥ 13) - Macchine raggruppate in centri - Tipologie di macchine differenti - Nel 57% dei casi il set up è dipendente dalla sequenza - Nel 72% dei casi il tempo di set up non è trascurabile - Il lot splitting è utilizzato dal 90% delle aziende.
<p><i>Caratteristiche del reparto</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Nel 77,5% dei casi configurazione job shop puro - No cicli alternativi - Assenza di macchine critiche - Forza lavoro sempre disponibile - Il livello degli operatori non è considerato 	<p><i>Caratteristiche del reparto</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - 69% dei casi flow dominant shop - Cicli alternativi nel 90% delle aziende - Macchine critiche nel 76,6% dei casi - Forza lavoro come collo di bottiglia nel 93% dei casi - Differenti livelli di capacità degli operatori nel 100% delle aziende
<p><i>Caratteristiche degli ordini</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Distribuzione dell’arrivo degli ordini costante - No order priority - Data di consegna fissa - La data di consegna è specificata in giorni o sottounità 	<p><i>Caratteristiche degli ordini</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fluttuazione della domanda nel 90% delle aziende - Priorità nell’ordine del 83,4% delle aziende - La data di consegna è sia fissa che negoziabile - Nel 51,8% dei casi la data di consegna in una specifica settimana

Dai risultati emerge che la corrispondenza tra i modelli teorici medi utilizzati dai ricercatori e i sistemi produttivi reali è limitata solamente ad alcune caratteristiche. In particolare le differenze fondamentali possono essere riassunte come segue.

- (1) I reparti reali presentano una complessità maggiore rispetto ai modelli teorici impiegati. Difatti nella realtà le risorse sono spesso, se non sempre, raggruppate in centri di lavoro e di sovente si ricorre al *lot splitting*. Tali aspetti non sono considerati nei modelli di WLC proposti in letteratura. Inoltre, la maggior parte dei sistemi reali fornisce la possibilità di lavorare taluni o tutti i codici seguendo dei cicli alternativi. Anche questo aspetto sembra essere stato dimenticato dai ricercatori.
- (2) I sistemi produttivi reali sono tipicamente molto più complessi e più estesi rispetto ai modelli di ricerca. Tale considerazione fonda sui seguenti risultati. Mentre nelle simulazioni viene utilizzata una sola tipologia di macchina, nei sistemi produttivi reali ne esistono di differenti (i.e. *batch machine*, *parallel machine*, *serial flow machine*). Una scelta fatta all'unanimità dai ricercatori è quella di utilizzare *single-constrained shop*, in cui il collo di bottiglia è rappresentato dalla capacità delle macchine. Tuttavia nella realtà spesso accade che il vincolo sia rappresentato dalla manodopera: la differenza nella qualifica e negli skills spesso preclude una completa intercambiabilità e flessibilità degli operatori. Nelle ricerche scientifiche spesso l'arrivo degli ordini è modellato secondo una distribuzione esponenziale. Questo approccio risulta inappropriato a modellizzare la distribuzione della domanda di sistemi produttivi reali, poiché gran parte delle aziende si trova a fronteggiare fluttuazioni stagionali nella domanda (sia nel mix che nel volume).
- (3) In fine, vi è un limitato numero di casi in cui i modelli utilizzati dai ricercatori sono per certi versi più complessi di quelli reali. Infatti, mentre i tipicamente le strutture di job shop impiegati negli studi sul WLC si possono classificare come *random* o *semi-random routing pure job-shop*, nella realtà, la maggior parte dei sistemi produttivi è simile ad un *flow dominant shop*, in cui anche se il ciclo tecnologico di un codice può differire dagli altri, vi è una direzione preferenziale del flusso dei materiali. Inoltre, spesso viene ipotizzato che la totalità delle macchine sono ugualmente critiche, poiché nel tempo tutte possono potenzialmente diventare dei colli di bottiglia. Al contrario, l'evidenza dimostra che nella maggior parte dei casi i colli di bottiglia sono statici e costituiti da una o poche risorse. Un'altra differenza riguarda la modalità con cui viene stabilita la data di consegna. L'approccio tipico dei ricercatori è quello di definirla in maniera estremamente precisa (in termini ore o sottomultipli di questi (i.e. minuti, secondi, etc) e di considerare in ritardo tutti quegli ordini consegnati a magazzino una volta che questa viene superata. Al

contrario, nei sistemi reali viene data più flessibilità nella definizione della data di consegna che normalmente è specificata in unità di giorni o addirittura di settimane.

1.8 Workload Control - generalità

I sistemi produttivi con struttura job shop sono in grado di realizzare un'ampia varietà di prodotti, in un range che va da prodotti standard ad altri estremamente customizzati. In tali sistemi la distribuzione dell'arrivo degli ordini nel tempo rappresenta un processo stocastico. Ogni ordine cliente può difatti essere costituito da un numero ed una varietà differente di codici che presentano dei cicli tecnologici e dei tempi di lavorazione difformi. Come asserito da Kingsman (2000), Nicholas (1997) e Stevenson *et al.* (2005) la natura dinamica e fortemente stocastica che contraddistingue tali contesti produttivi fa sì che strategie di gestione della produzione e di avanzamento dei materiali come il Kanban, il CONWIP o TOC risultino inappropriate ed inefficaci. Difatti il job shop, non essendo un sistema produttivo in cui le attività ed i cicli tecnologici sono altamente ripetitivi, non garantisce una disposizione semplice e lineare di risorse dedicate nel layout (i.e. linee, celle e group technology layout). Nei grossi reparti di tipo job shop il tempo di permanenza degli ordini in coda nei centri di lavoro può eccedere il 90 % del tempo totale di attraversamento (Kingsman, 2000). Il reparto può dunque essere rappresentato come un network di risorse ciascuna con un set di ordini in coda in attesa di essere processati; al crescere delle code aumenta anche la congestione del sistema.

Secondo Stevenson *et al.* (2005) e Moreira e Alves (2009) il Workload Control (WLC) è il sistema di Pianificazione e Controllo della Produzione più appropriato in ambienti manifatturieri complessi operanti con logica to-order e caratterizzati come noto da un notevole mix produttivo, elevata variabilità dei cicli e dei tempi di lavorazione. Il WLC ha l'obiettivo di mantenere il carico di lavoro (*Workload*) di ogni centro stabile a un determinato livello, garantendo al contempo un adeguato bilanciamento delle risorse produttive, al fine assicurare che i tempi di attraversamento siano brevi e soprattutto stabili. In altre parole, lo scopo è quello di ottenere una fabbrica "snella": piuttosto che finire in lunghe code e competere per la capacità delle risorse, gli ordini attendono di essere rilasciati nel "portafoglio ordini" fintantoché il valore del carico di lavoro delle risorse interessate dal ciclo produttivo non raggiunge un valore tale da consentirne il rilascio (Breithaupt *et al.*, 2002). Il framework generale del WLC presenta una struttura gerarchica a tre livelli di controllo legati alle fasi di avanzamento dell'ordine. Queste sono:

- Ingresso (Entry);
- Rilascio (Release);
- Dispatching.

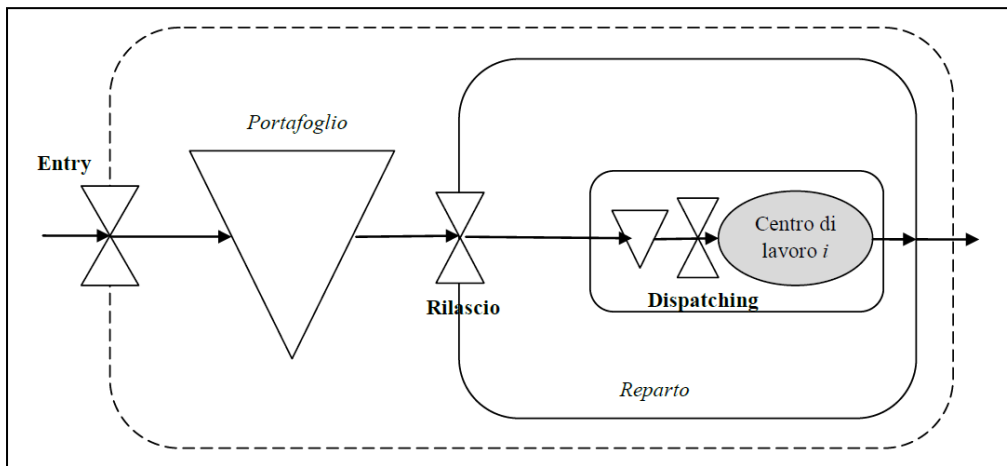


Figura 6 - Step principali nel flusso di un ordine.

Il controllo del carico nella fase di inserimento dell'ordine (*Order Entry Level*) si esplica attraverso la decisione di accettare o meno l'ordine; l'accettazione genera un certo carico di lavoro per il sistema produttivo. Una volta che l'ordine è stato accettato viene inserito nel portafoglio ordini dove attende per il rilascio; viene quindi definita la data di consegna al cliente e di conseguenza lo slack disponibile per la produzione. Quest'ultimo è fondamentale per la pianificazione della capacità dei periodi futuri poiché consente di verificare la congruenza tra la richiesta di capacità produttiva e quella disponibile. Impedire il rilascio immediato di alcuni job ha molteplici vantaggi, primo fra tutti la riduzione e il controllo del work-in-process. Il sistema produttivo risulta inoltre meno congestionato e più trasparente; è quindi più agevole identificare le cause dei problemi ed introdurre le opportune azioni correttive. La letteratura sul JIT e sulle filosofie di gestione di origine orientale, descrive ampiamente i benefici ottenibili da un sistema produttivo snello. In secondo luogo il tempo trascorso dagli ordini nel portafoglio prima di essere rilasciati consente di posticipare alcune decisioni operative; questo comporta una riduzione degli sprechi imputabili ad ordini cancellati all'ultimo momento e agevola la politica di gestione "al più tardi" delle materie prime e dei codici di acquisto.

Il controllo del carico in produzione avviene invece nella fase di rilascio (*order release*), che rappresenta il cuore del metodo WLC. L'intervallo di tempo che intercorre tra l'ingresso ed il rilascio consente di svolgere alcune attività di preparazione come ad esempio la verifica della disponibilità dei materiali. Fintantoché non viene rilasciato, un ordine consta solamente di documenti in formato cartaceo o elettronico, senza alcun

materiale ad esso legato. Nell'eventualità fosse necessario apportare delle modifiche all'ordine, queste possono essere introdotte evitando sprechi di materiale e soprattutto senza intervenire direttamente in produzione. Una volta rilasciato l'ordine rimarrà in reparto fino al completamento dell'operazione finale prevista dal ciclo tecnologico. Il rilascio rappresenta quindi l'ultimo istante in cui è possibile intervenire per bilanciare opportunamente la capacità richiesta con quella disponibile. Come nel livello precedente, il controllo dell'output si ottiene attraverso la variazione della capacità produttiva (nel breve periodo), nel caso questo fosse necessario (Land e Gaalman, 1996).

Il terzo livello del WLC, il dispatching, viene attivato una volta che l'ordine è stato rilasciato nel reparto produttivo. La decisione conclusiva su quale ordine selezionare tra quelli disponibili in coda nelle risorse viene presa "localmente" presso ogni centro di lavoro. Le regole di priorità nell'avanzamento degli ordini, note come *dispatching rules*, consentono di correggere eventuali deviazioni create tra la situazione pianificata e quella corrente, imputabili ad eventi imprevisti come rotture dei macchinari, materiali mancanti, assenteismo degli operatori, etc. Alcuni lavori hanno dimostrato che le regole di dispatching hanno un effetto trascurabile sulle prestazioni del sistema se il livello di work in process del reparto è stabile e limitato (Land e Gaalman, 1996). Tuttavia altri ricercatori hanno evidenziato il contrario. Questo aspetto verrà approfondito nel capitolo 5 relativo ai risultati sperimentali.

Capitolo 2 - Analisi della letteratura sulle tecniche di Order Review and Release

Da una prospettiva di ricerca, la scarsa attenzione ai meccanismi di “revisione e rilascio degli ordini”, note come Order Review and Release (ORR), trasferisce l’attenzione dei ricercatori sulla fase di dispatching, amplificando quindi le criticità legate alla scelta delle regole di priorità. I numerosi lavori presenti in letteratura riportano risultati contrastanti sul valore dell’ORR. Relativamente all’enorme varietà negli approcci e modelli proposti, molti studi concludono che l’adozione di procedure di revisione e rilascio degli ordini genera effetti positivi in produzione, come ad esempio la riduzione del work-in-process, della congestione del reparto e dei tempi di attraversamento degli ordini. Questa visione positiva non è tuttavia supportata dalla totalità dei ricercatori. Autorevoli studiosi come Bertrand (1983a, 1983b) e Baker (1984) evidenziano che l’impiego di alcune tecniche di ORR può generare lunghe attese degli ordini nel portafoglio, generando in tal modo un incremento del lead time totale. Tale discordanza nei risultati è nota in letteratura come “*research paradox*” (Melnyk, Ragatz e Fredenhall, 1991; Sabuncuoglu e Karapınar, 1999). Talvolta vi è inoltre discordanza tra i risultati ottenuti attraverso l’implementazione sul campo di metodi di controllo del carico ed alcuni studi teorici. Questo fatto è noto come “*WLC paradox*” (Stevenson *et al.*, 2005; Sabuncuoglu e Karapınar, 1999): *Theoretical research on the impact of workload control on shop performance reports very different results from those reported from practical implementations of workload control in real life. In fact, implementation studies report reductions in work order throughput time which are far beyond the improvements that can be obtained from theoretical models, even if we only consider the shop throughput time and neglect the effect of the backlog in front of the shop*” (Bertrand e Van Ooijen, 2002). Secondo Bertrand e Van Ooijen (2002) tale la spiegazione potrebbe risiedere nel fatto che gli studi simulativi non tengono conto della riduzione del livello qualitativo, ad esempio nelle lavorazioni, e dell’efficienza che si riscontra invece quando i sistemi manifatturieri raggiungono un livello di carico di lavoro prossimo a quello di saturazione.

La letteratura sul tema delle ORR può essere classificata fondamentalmente in due sezioni principali:

- Studi teorici e descrittivi;
- Studi simulativi

2.1 Studi teorici e descrittivi

Uno dei primi autori che realizzò l'importanza del rilascio controllato degli ordini prendendo in considerazione il carico di lavoro del sistema produttivo fu Wight nel 1970: *“Input/output control is the only way to control backlogs and thus to control the lead time”*, che *“Input/output control is a far cry from the classical approaches to production and inventory control.”* e *“Some companies have applied input/output control and the results have been dramatic”*. Secondo Wight, il flusso di lavoro, sia internamente che esternamente al reparto produttivo, deve essere controllato in modo tale da garantire in ogni centro di lavoro code limitate e soprattutto stabili; se il livello di WIP rimane costante anche i lead time rimarranno costanti. Secondo Wight il controllo del carico di lavoro deve essere impiegato solamente nella fase di rilascio degli ordini.

A differenza di Wight, Kenet (1988) ritiene che il rilascio controllato degli ordini non abbia alcun effetto sulla riduzione del WIP e dei tempi di attraversamento. Egli sostiene infatti, che ordini presenti in coda non influenzino il tempo medio di attraversamento se sia la distribuzione con cui questi pervengono all'azienda che i tempi di lavorazione rimangono costanti. Inoltre secondo l'autore, all'interno di sistemi produttivi complessi, ossia costituiti da diversi centri di lavoro, il rilascio controllato degli ordini può addirittura incrementare il livello di inutilizzo delle risorse, il valore del tempo di attraversamento e i ritardi di consegna.

Ploss (1988) presenta gli effetti positivi legati ad un controllo efficace dei tempi di attraversamento. Tra i requisiti indispensabili per una effettiva gestione dei lead time Ploss riporta quanto segue: *“Flow of work must be smooth and steady since in essence the objective is to keep materials and activities moving steadily and speedily from start to end. This starts with smoothing the input”*.

Secondo Nicholson e Pullen (1971) è possibile sostituire regole di priorità semplici come il FCFS - First Come First Served - a regole molto sofisticate attraverso un attento controllo in fase di rilascio degli ordini, senza tuttavia osservare deterioramenti apprezzabili nelle prestazioni operative.

Bertrand e Wortmann (1981) descrivono l'implementazione di alcuni meccanismi di rilascio controllato del carico in un'azienda che produce circuiti integrati. Il miglioramento delle prestazioni documentato è notevole: il tempo di attraversamento medio dei lotti e il valore della sua deviazione standard sono stati ridotti rispettivamente del 70 e 60 %.

Fly e Smith (1987) nel loro lavoro descrivono l'implementazione di un metodo per il controllo dell'input e dell'output in un'azienda metalmeccanica: il WIP è stato ridotto del 40%, il livello di servizio fornito al cliente è cresciuto dal 70% al 90% e il tempo di consegna medio è passato da 120 a 60 giorni.

Bechte (1982) descrive l'implementazione del metodo noto come Load Oriented Order Release (LOOR) in un sistema manifatturiero e ne riporta i principali risultati. Lo studio di natura simulativa è stato modellato utilizzando i dati caratteristici di un'azienda quali i file degli ordini, dei cicli di lavorazione e i dati sulla capacità produttiva delle risorse. Imponendo un determinato limite di carico di lavoro nelle risorse, Bechte ha osservato una diminuzione del WIP del 60%, senza peraltro registrare effetti negativi evidenti sul livello di utilizzo delle risorse. Inoltre, Bechte ha evidenziato sia una notevole riduzione del lead time degli ordini e che della sua variabilità. Lo stesso autore in un lavoro successivo (Bechte, 1988) riporta un esempio pratico di implementazione del metodo LOOR. Anche in questo caso i miglioramenti riportati sono notevoli: i lead time e le scorte sono stati ridotti del 30% e il ritardo nelle consegne è passato da tre settimane a soli tre giorni.

Wiendahl *et al.* (1992) descrivono due casi di implementazione del LOOR, in cui oltre al controllo dell'input in fase di rilascio vengono controllati anche gli output attraverso la possibilità di variare opportunamente la capacità produttiva. In entrambi i casi sia il WIP che i lead time sono stati ridotti considerevolmente (dal 25% al 58%). La minore variabilità del lead time ha consentito di ridurre il ritardo medio di consegna dell'81%.

Bergamaschi *et al.* (1997) nel loro noto lavoro presentano un framework di carattere generale per la classificazione delle metodologie di rilascio degli ordini. Partendo dall'analisi della letteratura, gli autori definiscono otto dimensioni che descrivono le caratteristiche e le logiche principali delle procedure di rilascio degli ordini:

1. Order release mechanism;
2. Timing convention;
3. Workload measure;
4. Aggregation of workload measure;
5. Workload accounting over time;
6. Workload control;
7. Capacity planning;
8. Schedule visibility;

Di seguito le otto dimensioni introdotte da Bergamaschi *et al.* verranno presentate in dettaglio.

Meccanismi di rilascio degli ordini

I meccanismi di rilascio degli ordini possono essere classificati in due gruppi: *load limited* e *time phased*. Nel meccanismo *load limited* “*orders are released to the shop based upon their distinctive features and the existing workload in the shop*”. L’approccio *time phased* invece “*is centred on computing a release time for each order and then letting orders enter the shop when that predetermined time is reached, regardless of the shop load at that time*” (Bergamaschi *et al.*, 1997). L’approccio *time phased* è quindi fortemente legato alle informazioni relative agli ordini contenuti nel portafoglio, come ad esempio la data di consegna, il contenuto di lavoro e il ciclo tecnologico.

Timing convention.

Il *timing convention* determina l’istante in cui può avvenire il rilascio dell’ordine. Questo può essere classificato come continuo o discreto. Con un *timing* continuo “*a release may occur at any time during the system's operation*. Al contrario in presenza di un *timing* discreto: “*an order release procedure may occur only at periodic intervals (e.g. the beginning of each shift, day or week)*” (Bergamaschi *et al.*, 1997). La tipologia di *time convention* adottata ha pesanti ripercussioni sulla complessità di gestione della fase di rilascio (in termini di potenza di calcolo, tempo e numero di verifiche da svolgere). Mentre ben pochi autori si rifanno al *timing convention* continuo (i.e. Ragatz e Mabert, 1988; Melnyk e Ragatz, 1989; Glassey e Resende, 1988), la maggior parte degli addetti ai lavori e dei ricercatori hanno utilizzato il *timing* discreto data la sua maggiore semplicità.

Workload measure

Per eseguire una valutazione del carico in fase di rilascio è indispensabile definire e misurare il carico di lavoro presente in produzione. Questo può essere valutato fondamentalmente seguendo due criteri: a) come numero di ordini presenti in reparto o b) in termini di quantità di lavoro (espressa in ore o in percentuale rispetto la capacità disponibile in un dato periodo). Tuttavia come riportato da Bergamaschi *et al.* (1997) il secondo approccio è preferibile al primo, infatti “*in a typical job shop environment, high processing time variability, wide product mix and small lot sizes usually do not practically allow the workload to be merely measured in terms of the number of jobs in the shop floor,*

since it could lead to very rough measurement. For this reason order release procedures are generally based upon work quantity measures”.

Aggregazione della misura del carico

Il carico di lavoro può essere aggregato a livello di reparto produttivo da un estremo (ciò non da indicazioni circa il modo in cui il carico è distribuito tra le risorse) o all'estremo opposto a livello di singolo centro di lavoro. Quest'ultimo approccio è il più utilizzato dai ricercatori poiché consente un controllo più efficace del carico, benché per contro sia indispensabile disporre di un sistema di raccolta dati che informi sullo stato corrente dell'avanzamento dei materiali in produzione. Secondo Bergamaschi *et al.* (1997) infatti: *“in a job shop environment a workload control methodology seems to be fully effective only if the workload distribution among workcentres is considered”*. Un terzo approccio alternativo consiste nel calcolare e controllare il carico di lavoro solamente in alcune risorse critiche, i cosiddetti colli di bottiglia. Aggregando il carico a livello globale è banale determinare la quantità di lavoro che interesserà il reparto. Viceversa, se il valore del carico è riferito singolarmente ad ogni risorsa, la quantità di lavoro attesa ad ogni macchina nel periodo successivo consiste di tre contributi (Bechte, 1988):

1. La quantità di lavoro già presente in coda nella risorsa in esame (carico diretto o *load on hand*);
2. Il carico di lavoro che nel futuro interesserà la risorsa, imputabile a ordini già rilasciati e che attualmente sono in lavorazione presso centri a monte (*load in transit*);
3. Carico di lavoro imputabile a ordini presenti nell'order pool e che saranno rilasciati.

Partendo dai tre contributi sopra riportati: *“Computing the workload at the gateway workcentres of the shop, namely workcentres that perform the first operation on released orders, is easy, since there is not load in transit for those workcentres. On the contrary, it is rather hard to account the load in transit at a generic workcentre, since this requires careful estimates of the time when the load now located at upstream workcentres or still in the pre shop pool will affect downstream workcentres”*. In altri termini nei sistemi job shop è alquanto complesso calcolare il valore puntuale del carico nelle risorse in funzione del tempo.

Workload accounting over time

Vi sono fondamentalmente tre metodi per la “contabilizzazione” nel tempo del carico di lavoro:

- I. A-temporale o aggregato;
- II. Time bucketing;
- III. Probabilistico;

Nell’approccio atemporale (atemporal), la quantità di lavoro valutata a livello di ogni singola risorsa viene determinata sommando il tempo di lavorazione di tutti gli ordini in produzione che prevedono l’utilizzo di tale macchina nel loro ciclo tecnologico senza distinguere i tre contributi di carico precedentemente riportati, ossia carico diretto, in transito e da rilasciare).

Nell’approccio *time bucketing* il profilo di carico nel tempo viene calcolato per ogni risorsa. L’orizzonte temporale è suddiviso in periodi omogenei (ad esempio turni, giorni, etc) e il carico in una data risorsa, imputabile ad un ordine specifico, viene sommato nel time bucket a seconda del periodo nel quale l’operazione corrispondente è stata schedulata. Quindi *“the time bucketing approach considers the load on hand only, since it tries to allocate both load in transit and released load to the appropriate time period when it will turn itself into load on hand”* (Bergamaschi *et al.*, 1997).

In fine l’approccio *probabilistico (probabilistic approach)* distingue il carico rilasciato ed il carico in transito dal *load on hand*. Il contributo imputabile al carico rilasciato e quello in transito viene moltiplicando per la probabilità che ogni ordine ha di raggiungere il centro di lavoro considerato nel periodo di riferimento. L’approccio probabilistico può essere definito come *“a special case of the probabilistic one, in which the length of the planning period is infinitive, so that the probability that a generic job could reach downstream workcentres along its routeing equals one”*. I tre approcci per la contabilizzazione del carico qui accennati verranno presentati in maniera più approfondita nel capitolo 3.

Workload control

Al fine di limitare il carico di lavoro rilasciato possono essere impiegati approcci differenti. Un primo criterio consiste nel consentire il rilascio di un ordine solamente se questo non eccede un determinato limite superiore di carico imposto (*upper workload*

bound). In pratica il limite viene impostato dal management secondo la misura di aggregazione del carico scelta (ossia quarta dimensione nella classificazione di Bergamaschi *et al.*, 1997). Tale approccio “*controls the level of WIP inventory and therefore the statistical distribution of mean lead times results in a reduced mean with a smaller coefficient of variation*”. Un limite inferiore del carico (*lower workload bound*) può essere introdotto in aggiunta al limite superiore, definendo così un intervallo di operatività. In questo caso il rilascio avviene solamente se il livello del carico di lavoro è compreso in tale intervallo. E' evidente il limite inferiore ha lo scopo di garantire un'opportuna quantità minima di lavoro per ogni risorsa, che funge da buffer.

Un approccio alternativo a quanto appena visto è noto in letteratura come *workload balancing*. Al fine di massimizzare il bilanciamento globale delle risorse del reparto vengono rilassati i vincoli che limitano il carico (i.e. limite superiore). In questo caso il controllo del carico è realizzato attraverso “*an explicit workload balancing approach rather than through a direct bounding*”. Questo approccio verrà approfondito ampiamente nel proseguo di questa tesi.

Capacity planning

Considerando le ricerche specialistiche sul tema, si possono identificare fondamentalmente due approcci di *capacity planning*: attivo e passivo. La pianificazione della capacità è attiva quando “*the model adjusts the machine capacity during the system's operation*” (Onur e Fabrycky, 1987; Hendry e Kingsman, 1991), attraverso l'introduzione di orario straordinario e/o la riallocazione delle risorse. Al contrario si parla di pianificazione della capacità passiva quando “*capacity is assumed as given and outside the control of the ORR strategy*”. Riguardo le due possibili alternative di pianificazione della capacità introdotte, è interessante notare come talvolta la decisione non è completamente sotto il controllo degli Operations Manager. Spesso accade che i sistemi manifatturieri non sono sufficientemente flessibili per consentire una repentina variazione del tempo ciclo delle risorse; nel breve periodo inoltre potrebbe risultare estremamente difficoltoso la pianificazione di turni straordinari a causa di vincoli di natura sindacale.

Schedule visibility

L'ultima dimensione di classificazione presentata nel lavoro di Bergamaschi *et al.* (1997) è la *schedule visibility*. Secondo la definizione introdotta degli autori questa può essere *limited* or *extended*. Se la visibilità di schedulazione è limitata, il rilascio degli

ordini, selezionati dal portafoglio, è rivolto al controllo del carico in produzione nel periodo di pianificazione più prossimo. In tal caso la visibilità è limitata poiché *“jobs are selected from the pree shop pool in order to achieve good shop performance for the present or the entering planning period, without setting reference to the forthcoming periods or the planning horizon as a whole”*. In altre parole il rilascio degli ordini è volto ad ottenere buone prestazioni operative nel periodo di pianificazione presente o nel successivo. Quindi, *“with a limited schedule visibility, workload is actually smoothed over time, but only in order to optimise the next period, regardless how following periods could be affected”*.

Viceversa, il rilascio degli ordini può essere orientato ad un'ottimizzazione più globale delle prestazioni del sistema lungo un orizzonte temporale più esteso rispetto al singolo periodo. Per ottenere ciò è indispensabile selezionare gli ordini dal portafoglio in modo tale da bilanciare il profilo di carico sia tra i centri di lavoro che in funzione nel tempo. In questo caso la visibilità è detta estesa poiché *“a look-ahead module allows us to tolerate poor present shop performances on behalf of a global advantage that will be achieved through a more effective management in future periods”*.

La Tabella 8 riassume il framework proposto da Bergamashi *et al.*, (1997), riassumendo le 8 dimensioni appena definite.

Tabella 8 – Le dimensioni di classificazione delle ORR – Bergamaschi *et al.* (1997).

Dimensione	Opzioni
Order release mechanism	- Load limited - Time passed
Timing convention	- Continuo - Discreto
Workload measure	- Number of job - Work quantity
Aggregation of workload measure	- Total shop load - Bottleneck load - Load by each workcentre
Workload accounting over time	- Atemporal - Time bucketing - Probabilistic
Workload control	- Upper bound only - Lower bound only - Lower and Upper Bound - Workload balancing
Capacity planning	- Active - Passive
Schedule visibility	- Limited - Extended

Oosterman *et al.* (2000) indagano l'efficacia di alcuni metodi di workload control, in particolare quello aggregato (sviluppato a Lancaster) e quello diretto (sviluppato a Hannover), in funzione del tipo di struttura produttiva in cui questi vengono implementati. Essi concludono che il metodo che utilizza la misura del carico diretto come criterio per il rilascio riporta prestazioni superiori in sistemi produttivi con una struttura del flusso di materiali simile ad un pure job shop, mentre in presenza di un flusso di materiali con direzione preferenziale il metodo aggregato si è dimostrato essere più efficace. Gli autori inoltre propongono e testano un terzo approccio noto come *Adjusted Aggregate Load* che consiste in una variante di quello aggregato.

Sempre con riferimento al modello di WLC sviluppato ad Hannover e Lancaster, il lavoro di Breithaupt *et al.* (2002) riporta gli aspetti positivi e le criticità riscontrati da un'attenta analisi della letteratura. Focalizzandosi successivamente sul metodo LOOR ne propongono alcune modifiche ed estensioni. In particolare i ricercatori descrivono una versione leggermente modificata dell'algoritmo di conversione dei carichi proposto originariamente da Becthe (1988) ed identificano le curve logistiche operative (*Operative Logistic Curves*) come uno strumento appropriato per determinare il corretto limite di carico.

Henrich *et al.* (2004) indagano quali sono gli elementi di criticità nell'implementazione del WLC nelle aziende operanti con logica to-order. Dall'analisi effettuata i ricercatori ricavano un framework di carattere generale di grande utilità nel valutare l'applicabilità del WLC in una data realtà produttiva. Tra le variabili prese in esame vi sono le caratteristiche degli ordini quali dimensione e distribuzione, la tipologia di data di consegna, il tipo di lavorazioni (i.e. durata delle lavorazioni, variabilità del processing time) e le caratteristiche dei cicli produttivi come ad esempio la profondità distinte, la variabilità e flessibilità dei cicli, etc. Secondo gli autori, il *best fit* con il metodo WLC si ottiene in sistemi manifatturieri che presentano:

- alta intensità e variabilità nell'arrivo degli ordini,
- tempi di lavorazione variabili,
- tempi di set-up ridotti,
- variabilità dei cicli elevata,
- estensione dei cicli ridotta,
- flessibilità elevata dei cicli

Stevenson (2006), attraverso l'applicazione di una procedura suddivisa in due fasi, cerca di estendere il campo di applicabilità del WLC nei sistemi job shop. Nella prima fase viene sviluppato un sistema software di supporto alle decisioni (*Decision Support System*) che include diverse funzionalità come ad esempio la gestione della *strike rate*⁶, un'interfaccia *user friendly* che facilita il processo di apprendimento degli addetti ai lavori e la possibilità di considerare sia il carico diretto che indiretto in fase di rilascio dell'ordine. Nella seconda fase del processo Stevenson introduce altre variabili come ad esempio la flessibilità produttiva dell'azienda, intesa come grado d'intercambiabilità delle macchine e la possibilità di svolgere lavoro straordinario.

Il lavoro di Stevenson e Hendry (2006), partendo dagli ultimi sviluppi teorici apportati al metodo LUMS, fornisce una riclassificazione del metodo aggregato secondo gli otto criteri introdotti nello studio di Bergamaschi *et al.* (1997).

Hendry *et al.* (2008) esaminano le criticità incontrate nell'implementazione del WLC attraverso l'analisi di due casi studio: un'azienda operante nel settore dei capital goods e una nel settore dei componenti meccanici, entrambe presenti nel settore B2B. Gli autori discutono sulle modalità di gestione e sulle le problematiche legate all'implementazione del WLC, identificando 17 fattori critici, che comprendono elementi legati al mercato, ai clienti e al metodo WLC stesso, aspetti del processo manifatturiero, il flusso di informazioni ed il livello di integrazione aziendale. Per ogni elemento di criticità gli autori suggeriscono delle opportune azioni correttive.

Il lavoro di Stevenson *et al.* (2009) descrive l'implementazione di uno strumento interattivo per l'applicazione del WLC e per il training degli operatori sviluppato all'interno di un più ampio sistema di supporto alle decisioni in una piccola azienda manifatturiera operante con logica to-order. Lo strumento consente di simulare in anticipo il comportamento del sistema nelle fasi di inserimento e di rilascio degli ordini e di effettuare un'analisi *what-if* di eventuali modifiche nei valori dei parametri (ad esempio due date setting, order acceptance/rejection, order release decision, capacity management).

Soepenbergh *et al.* (2010) attraverso uno studio esplorativo indagano l'implementazione del WLC in sistemi altamente complessi. L'analisi mostra che le prestazioni di delivery reliability sono migliori quando gli ordini che sono prossimi alla fase di completamento

⁶La *strike rate*, detta anche *bid rate* è la percentuale, calcolata su base storica, degli ordini cliente pervenuti in fase di contrattazione e che poi vengono effettivamente confermati.

vengono accelerati. In altri termini ciò equivale ad utilizzare il CR (Critical Ratio) come regola di dispatching.

2.2 Studi simulativi

Si è proceduto alla costruzione del framework di classificazione della letteratura utilizzando come dimensione le seguenti variabili (Tabella 9):

- Caratteristiche del sistema produttivo modellato;
- Meccanismo di rilascio testato;
- Meccanismo di dispatching testato;
- Misure di prestazione analizzate;
- Tipologia di analisi statistica impiegata.

Gli studi simulativi costituiscono la maggior parte della letteratura sul tema delle ORR e del WLC. Tipicamente i ricercatori testano le prestazioni ottenute dall'implementazione di combinazioni di metodi di rilascio, regole di dispatching, politiche per definire la data di consegna e il livello di utilizzo medio delle risorse. La Tabella 9 classifica le ricerche di carattere simulativo specificando il tipo di shop modellato (reale o ipotetico), il tipo di ciclo tecnologico (random o lineare), il numero di macchine e centri di lavoro considerate, i meccanismi di rilascio e di dispatching testati, gli indicatori di prestazione valutati e il tipo di analisi svolta. Nell'ultima colonna, relativa al tipo di analisi eseguita, il simbolo ND indica che nel lavoro in questione non è stata specificato lo strumento statistico impiegato. Come è evidente dalla Tabella 9 la maggior parte degli studi testa modelli ipotetici (*hypotetical models*) di job shop (Wisner, 1995). Inoltre la gran parte delle simulazioni è caratterizzata da cicli di lavoro generati in maniera random o semi-random (Wisner, 1995). La Tabella 10 riporta la legenda dei simboli relativamente alle regole di dispatching, di rilascio e agli indicatori di prestazione contenuti in Tabella 9.

Le ricerche simulative valutano diversi approcci di rilascio degli ordini. La maggior parte di questi lavori implementa metodi di limitazione del carico del tipo workload bounding e compara i risultati con metodologie di rilascio immediato valutando parametri di vari tipo, *cost-based* e *no-cost based*.

Tabella 9 – Framework di classificazione della letteratura.

Studio	Caratteristiche shop			Meccanismo di rilascio testato	Meccanismo di dispatching testato	Misure di prestazioni	Tipologia analisi statistica
	Ipotetico/reale	Routing: random/linea	Workcent re e macchine				
Adam & Surkis (1977)	Ipotetico	Random	6,6	FFL, BFL, BIL, IMM		NJC, MJT, PJT, MJE, PJE	Nessuna
Browne & Davies (1984)	Reale	Random	80	RAN, BIL	FCFS, SLK	TCD, PJE	Nessuna
Shimoyashiro (1984)	Reale	Random	33,80	IMM, MXL, FFL,	LOPN, LPN, BLWC, SPT, SRPT, LPT, HONF, BMCW	MFT, MMU, MJL	Nessuna
Ragatz & Mabert (1984)	Ipotetico	Random	5,5	IMM,BFL	FCFS, S/OPN,	JLC	ANOVA
Ragatz & Mabert (1988)	Ipotetico	Random	5,5	IMM, BIL, FLL, BFL	FCFS	JLC, MAD, MQT, MWP, MXP	ANOVA
Melnyk & Ragatz (1989)	Ipotetico	Linea	6,6	IMM, AGGWNQ, WCEDD	FCFS, SPT, EDD, CR	MJT, PJT, MWP, MQT, MBT, MQL	ANOVA
Bobrowski (1989)	Ipotetico	Random	15	IMM, FFL	FCFS, SPT, EDD, S/OPN	TCD, MJL, PJT, MQT, MBT,	ANOVA
Scudder & Hoffman (1989)	Ipotetico	Random	15	IMM, BIL	CR	FGC, FGL, MJT, WPC	Nessuna
Melnyk et al. (1991)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, MXL, FFL	CR, PRF/OPT, VLADRAT, OPCRAT	MJT, PJT, MWP, WPV, MFT, VFT	ANOVA
Philipoom & Fry (1992)	Ipotetico	Linea e Random	5,12	MXL (2 variants: Shop Load il Path Load)	FCFS, SPT, MINSLK	MFT, PJT	ANOVA
Ahmed & Fisher (1992)	Ipotetico	Random	5,5	IMM, BIL, MIL, FFL	EDD	JLC, WPC, FGC	ANOVA
Zapfel & Missbauer (1993)	Ipotetico	Random	5,5	LOOR	FCFS, SPT, EDD, CR	MMU, MFT, MWP, PJE, PJL, MJT	ND
Philipoom et al. (1993)	Ipotetico	Random	15,15	IMM, MIL, PBB	FCFS	TCD, MMU	ND
Melnyk et al. (1994)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, MXL	SPT, CR	MJT,PJT, MFT, VFT, MWP,WPV.	Regressione multipla
Hendry & Wong (1994)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, AGGWNQ, WCEDD, JSSWC	FCFS, SPT, MINSLK, S/OPN, CR	MJT, PJT, MWP, MQT, MQL, MOT	ANOVA
Malhotra et al. (1994)	Ipotetico	Random	15,15	IMM, MIL PBB	FRFS		ND
Fredendall & Melnyk (1995)	Ipotetico	Random	6,12	IMM, CMS	EDD, TWOQ, RR, PREE, FP	TCD, MWP, PJT, MQT, MFT	Regressione
Kim & Bobrowski (1995)	Ipotetico	Random	9,9	IMM, MXL, BIL, FFL	FCFS, MODD		ND
Park & Salegna (1995)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, MXL	JCR, SIMSET, CR, SPT	MFT, MQT, VFT, MJT, MLD, MJL, PJT	ANOVA
Watson et al. (1995)	Ipotetico	Random	4,4	BACKSIM, PMRP	FRFS, SPT, MOD		ND
Perona e Portioli (1996)	Ipotetico	Random	11,11	LOOR, LOOR modificato	FCFS	MJL, MJT, MFT, MWP	ANOVA
Tsai et al. (1997)	Ipotetico	Random	5,5	IMM, MXL variants	FCFS	MFT, MJL, MJT, MLD, PJT	ANOVA
Perona e Portioli (1998)	Ipotetico	Random	11,11	MXL, LOOR	FCFS, EDD, TSPT	MJL, MJT, MFT, MWP	ANOVA
Cigolini et al.	Ipotetico	Random	11,11	MXL, MNL	FCFS	MMU, MFT,	ANOVA

(1998)				WB, MXLMNL), *		MJT, MJL, PJT	
Hendry et al. (1998)	Reale	Linea	15	WLC-L, No Control	FCFS	MFT, VFT, MWP, MOS, MQT, MOY, MMU	ANOVA
Land & Gaalman (1998)	Ipotetico	Random	6,6	WLC-L, LOOR, IMM, SLAR, WCEDD	SPT	MFT, MJT, PJT, MWP	ANOVA
Philipoom & Fry (1999)	Ipotetico	Random	8,24	MXL (2 variants)	FCFS, SPT, S/OPN, PST	MFT, MJT, MXT, PJT, MWP	Regressione
Newman & Maffei (1999)	Ipotetico	Random	8,8	IMM, MXL	EDD	MFT, MJL, MJT, PJT	ANOVA
Sabuncuoglu & Karapinar (1999)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, IM, PBB, FFL, MXL (3 varianti), INF (2 varianti)	FCFS, SPT	MFT, MPT, MPS, MQT	Regressione
Oosterman et al. (2000)	Ipotetico	Random	6,6	WLC-L, LOOR	SPT, MOD	MFT	ND
Cigolini & Portioli (2002)	Ipotetico	Random	11,11	MXL,WB, MXLMNL	FCFS	MMU, MFT, MTS, MJT, MJL, PJT	ANOVA
Kingsman & Hendry (2002)	Reale	Linea	15	WLC-L, No Control	FCFS	MFT, MWP, MQT, MMU	Regressione
Enns & Prongue Costa (2002)	Ipotetico	Random	6	MXL (2 Varianti)	SPT	MWP, MJS, MTS, MFT	ND
Bertrand & Van Ooijen (2002)	Ipotetico	Random	10,10	WLC-E	FCFS, BP	MFT	ANOVA
Missbauer (2002)	Ipotetico	Random	15	LOOR	FCFS		ANOVA
Nandi e Rogers (2003)	Ipotetico	Random	4,10	MXL	FCFS	MXL	ANOVA
Moreira &Alves (2006)	Ipotetico	Random	6,6	IMM, PIOC, MIL, BIL	FCFS	MJT, PJT, MQT, FGI, MMU	ANOVA
Land (2006)	Ipotetico	Random	6,6	LOOR, WLC-L	FCFS, EDD	MFT MTS, MWP, WPV, PJT, MLV	ND
Henrich et al (2007)	Ipotetico	Random	6,6	Corrected aggregate loads (Oostermann) (MXL)	FCFS	MTS	ND
Fernandes e Silva (2008)	Ipotetico	Random	6,6	MXL, WB	FCFS	MMU	ANOVA
Kirchhof et al. (2008)	Reale	Random	14	Aggregate workload (LUMS)	FCFS	MMU, MFT, MTS	ND
Thurer et al. (2009)	Ipotetico	Random	6,6	WLC-L, LOOR	FCFS	MTS, MFT	ANOVA
Fredendall et al. (2010)	Ipotetico	Linea	13	-	FCFS	MWP, PJT, MTS, MFT, VFT	ANOVA
Fernandes e Silva (2010)	Ipotetico	Random	6,6	MXL, LOOR	FCFS	MFT, MTS	ND

Tabella 10 – legenda

Legenda	
<p style="text-align: center;">Meccanismi di dispatching</p> <ul style="list-style-type: none"> - Shortest processing time (SPT) - Truncated Shortest processing time (TSPT) - Shortest Remaining Processing Time (SRPT) - First Come First Served (FCFS) - Last In First Out (LIFO) - Earliest Due-Date (EDD) - Operation Due Date (OPNDD) - Shortest processing time con expediting (SPTEX). - Critical Ratio (CR) - Smallest Critical Ratio (JCR) - Slack per remaining operation (S/OPN) oppure Minimum slack per operation (MSOP) - MODD - Minimum slack (MinSLK) - Similar Setup (SIMSET) - Maximum Setup Time. (MAXSET) - Least Work Remaining (LWR) - Lowest operation number first (LOPN) - Lowest part number first (LPN) - Batch with least amount of work completed first (BLWC) - Bottleneck priority (BP) - Longest processing time first (LPT) - Highest operation number first (HONF) - Batch with most completed work first (BMCW) - Two Queue (TWOQ) - Planned start time (PST) - Operation Critical Ratio (OPCRAT) 	<p style="text-align: center;">Misure di prestazione</p> <ul style="list-style-type: none"> - CCR: Ratio of carrying cost in queue to carrying cost on machine - FGC: Finished goods carrying cost - FGI: Finished goods inventory level - HWP: Hours work performed on jobs in shop - JLC: Job lateness cost - JTC: Job tardiness cost - MAD: Mean absolute deviation from due date - MBT Mean backlog time - MFT: Mean flow time - MJE: Mean job earliness - MJL: Mean job lateness - MJS: meand job in the system - MJT: Mean job tardiness - MLU: Mean labour utilization - MLV: Mean lateness variance - MMU: Mean machine utilization - MOS: mean order size - MOT: Mean overtime required - MPT: mean pool time - MQB: Machine queue balance index - MQL: Mean queue length - MQT: Mean queue time - MTS: Mean time in the system - MUD: Maximum machine utilization difference - MWB: Machine workload balance index - MWI: Mean worker immobility - MWP: Mean work in process - MXP: Maximum work in process - MXT: maximum tardiness - NJC: Number of jobs completed - NPV: Net present value - PJE: Percentage of jobs completed early - PJT: Percentage of jobs completed tardy - PR: percentage released - TCD: Total cost per day (or per planning period) - VFT: Variance of flow time (or standard deviation of flow time) - WBI: Workload balance index (a measure of shop utilization variance) - WPC: Work in process carrying cost - WPV: Work in process variance
<p style="text-align: center;">Meccanismo di Rilascio</p> <ul style="list-style-type: none"> - BIL: Backward Infinite Loading (BIL) - MIL: Modified infinite loading - MXL: Maximum load - MNL: Minimum load. - MXLMNL - FFL :Forward finite loading. - BFL: Backward finite loading . - PBB: Path based bottleneck. - AGGWNQ: Aggregate work-load trigger, work-in-next queue - WCEDD: Work-load trigger, earliest due-date - MNJ: Maximum number of jobs - WLC-L: Workload control – Lancaster - LOOR: Load-oriented order release - SLAR: Superfluous Load Avoidance Release 	

La maggior parte delle ricerche qui considerate hanno dimostrato l'estrema efficacia in termini di riduzione di costo e di incremento delle prestazioni operative dell'utilizzo del rilascio controllato degli ordini in produzione. Vi sono tuttavia alcuni punti di discordanza. Alcuni lavori infatti hanno identificato delle condizioni in cui è preferibile il rilascio immediato, anziché quello controllato. Nelle ricerche di carattere simulativo i ricercatori hanno testato svariate regole di dispatching. Anche in questo caso non vi è unanimità nei risultati: la valutazione della loro efficacia e del ranking relativo alle prestazioni ottenute varia significativamente tra i risultati sperimentali. Infine, una terza area di discordanza nei risultati riguarda l'effetto dell'interazione tra le variabili sperimentali quali metodo di rilascio, data di consegna, utilizzo medio del reparto, regola di dispatching, etc. Secondo Gentile e Rogers (2009) queste incongruenze “*may be attributed to simulation modeling differences, shop environment differences, interaction among experimental variables, or interpretation of experimental results*”.

Come già specificato in precedenza, la maggior parte degli studi di natura simulativa considerati modella il sistema produttivo utilizzando dei lay-out ipotetici ed estremamente semplificati (*hypotetical layout*), cicli di lavoro generati in maniera random o semi-random e strutture produttive costituite da un numero limitato di centri di lavoro (ad esempio il modello proposto da Ragatz e Mabert, 1988). Solamente due degli studi qui considerati forniscono esempi di modelli di simulazione costruiti su layout reali (Browne e Davies, 1984; Shimoyashiro *et al.*, 1984). Trentanove lavori impiegano *random routings*, quattro *line routings*, mentre solamente uno implementa una combinazione di *line* e *random routings*. La complessità insita nella modellazione di sistemi produttivi estesi e completi si palesa se si considera che ben 25 ricerche utilizzano modelli di strutture produttive costituiti da numero pari o inferiore a 6 centri di lavoro e che solamente 3 lavori ne impiegano più di 20. Inoltre nessuno studio affronta il tema del rilascio degli ordini in presenza di distinte base profonde e cicli tecnologici articolati comparabili a quanto è presente nei sistemi manifatturieri; aspetto che verrà affrontato ampiamente in questo lavoro di tesi.

La struttura di job shop più utilizzata nelle ricerche simulate sull'ORR è quella proposta da Ragatz e Mabert (1988). Il loro modello di job shop si basa sulle seguenti caratteristiche ed assunzioni:

- i job arrivano secondo la distribuzione di Poisson;
- il tempo di lavorazione segue una distribuzione esponenziale;

- i tempi di set-up non dipendono dalla sequenza di lavorazione e sono inclusi nel tempo di lavorazione;
- il sistema produttivo è costituito da 5 centri di lavoro e ogni centro di lavoro è costituito da una sola macchina;
- i job hanno un ciclo random.

Come ribadito più volte fino a questo punto, i sistemi produttivi reali sono ambienti di natura stocastica. Benché il modello proposto da Ragatz e Mabert (1988) contenga variabili aleatorie, alcune delle assunzioni fatte semplificano fortemente il modello facendolo discostare profondamente dai sistemi manifatturieri reali (ad esempio la distribuzione esponenziale del tempo di lavorazione, i set up non dipendenti dalle sequenze di lavorazione, il numero ridotto di macchine, l'assenza di distinte base).

2.2.1 Meccanismi di dispatching

L'insieme delle tecniche che vanno sotto il nome di regole di priorità (*Dispatching Rules*) vengono utilizzate allo scopo di scegliere tra i job in coda nel reparto produttivo, in attesa di essere lavorati da una macchina (o gruppo omogeneo di macchine), quello da processare non appena questa è libera.

Il dispatching è stato uno dei primi temi a suscitare grande interesse nella letteratura sull'Operations Management (tra cui Conway, 1965; Bulkin *et al.*, 1966; Moodie e Roberts, 1968; Panwalkar e Iskander, 1977; Graves, 1981; Ramasesh, 1990). Negli ultimi decenni un nutrito numero di ricerche si è focalizzata sulle prestazioni delle diverse regole di priorità. Tali studi, spesso di natura simulativa hanno come obiettivo quello di desumere i vantaggi e gli svantaggi attribuibili alle varie regole di dispatching rispetto certi indicatori di prestazioni operative, quali ad esempio il tempo di attraversamento, l'utilizzo delle risorse e misure legate alla data di consegna degli ordini. Una review esaustiva della letteratura su questo tema va oltre gli obiettivi di questa tesi. I lavori di Panwalkar e Iskander (1977), Blackstone *et al.* (1982) e Ramasesh (1990) forniscono lo stato dell'arte sul tema del dispatching.

Il *Dispatching* differisce dal *Sequencing o Scheduling*. La complessità di quest'ultimo, consistente nell'allocazione a priori (cioè a livello di pianificazione) dei job alle macchine e nel loro "sequenziamento" su ciascuna di esse, deriva infatti dalla vastità e dalla varietà dei dati di cui bisogna tenere conto nella realtà operativa di un job shop. Tali valori inoltre variano nel tempo e presentano notevoli margini di aleatorietà. La maggior parte delle

tecniche formulate, quindi, si basa necessariamente su ipotesi estremamente semplicistiche rispetto alla realtà produttiva. La tecnica delle regole di priorità supera queste difficoltà e diventando applicabile a qualsiasi struttura produttiva di tipo job shop. Essa è caratterizzata da inequivocabile semplicità operativa, derivante dalla possibilità di non dover effettuare una programmazione esecutiva e a priori di ogni macchina anche quando si presentano imprevisti. Il dispatching, cioè la scelta di un job tra quelli in attesa utilizzando una determinata regola di priorità senza ordinare i rimanenti job, differisce dall'attività di sequencing consistente nel "sequenziamento" a priori di tutti i job che devono essere lavorati da ogni macchina. La maggiore semplicità operativa del dispatching deriva dal fatto che l'intera struttura produttiva viene isolata in macchine indipendenti, per le quali le sequenze di lavorazione vengono create via via, ogni volta che la macchina si libera, abbandonando quindi qualsiasi pretesa di definire a priori, cioè a livello di pianificazione, il sequenziamento ottimale. *"The priority dispatching approach differs from the static scheduling approach, which centrally schedules the operations for all workstations, determining exact start and completion times before hand". "The dispatching decision finally fulfils the capacity requirement of one operation of a job. But, the influence of dispatching goes further. Selecting one job means that fulfilling the requirement of other waiting jobs is postponed"* (Land, 2004). Per una review sul tema del *job shop scheduling* rimandiamo il lettore a Blazewicz *et al.* (1996) e Jain e Meeran (1999).

Esistono svariati tipi di regole di priorità. Silver *et al.* (1998) classificano le regole di dispatching in regole locali, globali, statiche e dinamiche. Le regole locali a differenza di quelle globali non richiedono la conoscenza dello stato dell'intero sistema, ma solamente di una data macchina. Le regole statiche stabiliscono delle priorità che non variano nel tempo, come ad esempio la Early Due Date (EDD). Viceversa, le regole dinamiche generano priorità che possono variare nel tempo, come ad esempio il Minimum Slack Time (MST). Le regole di dispatching possono essere inoltre classificate nel seguente modo:

1. Regole che prendono in considerazione il tempo di lavorazione o il tempo di set-up;
2. Regole che operano sulla base della data di consegna;
3. Regole che considerano sia il tempo di lavorazione sia la data di consegna;
4. Regole che considerano la situazione dei job (non tengono conto nè della data di consegna nè del tempo di lavorazione).

1) Regole che considerano il tempo di lavorazione o il tempo di set-up

Shortest Processing Time (SPT). Fra gli n job in coda alla macchina j , si assegna la priorità massima al job i^* che presenta il tempo di lavorazione più breve sulla tale macchina:

$$i^* | d_{i^*j} = \min_i \{d_{ij}\}$$

La regola SPT funziona molto bene quando si vuole minimizzare (Silver, 1998):

- Total flow time
- Mean flow time
- Mean waiting time
- Mean lateness
- Total lateness

TSPT (Truncated Shortest Processing Time). La regola SPT penalizza job con tempi di lavorazione particolarmente elevate sulla macchina j , soprattutto nel caso sopraggiungano job “urgenti” con data di consegna molto prossima. Per evitare che job caratterizzati da lavorazioni lunghe e complesse siano penalizzati dalla regola SPT permanendo per troppo tempo in coda, si introduce la regola TSPT. Questa è una variante del SPT che assegna la priorità agli ordini secondo la regola SPT eccetto che per quegli ordini che hanno già atteso in coda per un certo tempo prefissato. Quando è trascorso il *truncated time*, il job viene rilasciato.

Longest processing time first (LPT). Si dà privilegio al job che ha il tempo di lavorazione più lungo sulla macchina. Viene data priorità, tra gli n job in coda alla macchina j , il job i^* avente il massimo tempo di lavorazione su tale macchina:

$$i^* | d_{i^*j} = \max_i \{d_{ij}\}$$

In questo caso diametralmente opposto al caso SPT, i job di durata breve sulla macchina sono penalizzati.

SIMilar SETup (SIMSET) o Minimum Setup Time (MSUT). Considera solamente il tempo di set up dell'ordine, selezionando quello che presenta il tempo di set up minore. Viene data priorità, fra gli n job in coda alla macchina j , il job i^* che induce il minimo

tempo di set up su tale macchina, tenendo conto del job w attualmente in corso di lavorazione su j :

$$i^* | S_{wi^*j} = \min_i \{S_{wij}\}$$

Job of Smallest Critical Ratio (JCR o CR). Viene selezionato il job in coda della macchina che è identico a quello appena terminato. Se non ci sono job identici al precedente, viene scelto quello con il minor Critical Ratio.

Shortest Remaining Processing Time (SRPT) o Least Work Remaining (LWR). Assegna la massima priorità al job i^* in coda alla macchina j per il quale il tempo residuo di lavorazione sulle macchine da visitare è minimo.

$$i^* | \sum_j d_{i^*j} = \min_i \{d_{ij}\}$$

L'applicazione della regola LWR consente di ottenere buoni risultati in termini di riduzione del numero medio di job in coda alle macchine.

Batch with Least amount of Work Completed first (BLWC) o Most Work Remaining (MWR). Dualmente rispetto alla regola Least Work Remaining, la regola MWR assegna massima priorità al job i^* in coda nella macchina j , per il quale il tempo residuo di lavorazione sulle macchina ancora da visitare è Massimo.

$$i^* | \sum_j d_{i^*j} = \max_i \{d_{ij}\}$$

2) Regole che operano sulla base della data di consegna

Earliest Due Date (EDD). Viene data la priorità al job i^* avente la data di consegna (DD) più vicina:

$$i^* | DD_{i^*} = \min_i \{DD_i\}$$

All'evidente obiettivo di massimizzare il rispetto delle date di consegna da parte dei job in corso di lavorazione nel sistema, si contrappone la non considerazione di fattori tecnologici relativi ai job ed alle macchine. Ad esempio, la scelta del job i secondo la regola EDD può generare un elevato tempo di set-up sulla macchina j .

Operation Due Date (OPNDD). Attribuisce la priorità massima al job con la OPNDD più prossima. La OPNDD si ottiene dividendo l'intervallo tra la data di ingresso nel sistema del job e la sua data di consegna per tanti intervalli uguali (k) quante sono le operazioni: il limite temporale destro ("Operation Due Date") di ciascuno dei k intervalli rappresenta la data di completamento della relativa operazione.

Modified Operation Due Date (MODD). Viene data priorità all'ordine con il valore più piccolo della Operation Due Date modificata.

$$i^* | MODD_i = \text{Max}_i (ODD, \text{Current Time} + OPT)$$

dove ODD è la due date della prossima operazione e OPT è il tempo di lavorazione dell'operazione corrente.

3) Regole che considerano sia il tempo di lavorazione sia la data di consegna

Minimum Slack Time (MinSLK). In ogni istante t di rilevazione dell'entità della coda a monte della macchina j , viene data la priorità al job i^* con minimo valore di *slack* dato dalla differenza fra i seguenti parametri: data di consegna del job, istante attuale di rilevazione, tempo di lavorazione residuo sulle macchine che il job i deve ancora visitare.

$$\text{Slack}(i, t) = Z_i - t - \sum_{j=R(i)} d_{ij}$$

$$i^* | SLACK(i^*; t) = \min_i \{SLACK(i; t)\}$$

Slack per Remaining Operation (S/OPN) o Minimum Slack per Operation (MSOP). Analogamente alla regola MinSlack anche la regola S/OPN ha come obiettivo la massimizzazione del rispetto delle date di consegna dei job. Viene data la priorità al job con il minimo valore del rapporto slack/numero di operazioni rimanenti:

$$SLACK_OP(i, t) = \frac{\text{Slack}(i, t)}{\sum_j x_{ij}}$$

La regola S/OPT da priorità sulla macchina j al job i^* che all'istante di rilevazione t presenta il tempo di slack per operazione minore:

$$i^* | SLACK_OP(i^*; t) = \min_i \{SLACK_OP(i; t)\}$$

Critical Ratio (CR). Tale regola è presente in letteratura in varie forme. Privilegia il job avente il minimo valore del rapporto:

$$\text{Critical Ratio} = \frac{|DD_i - \text{Today}|}{\sum_j OP_{ij}}$$

Dove OP_{ij} è il tempo di lavorazione del job i sulla macchina j .

$$i^* | CR_i = \min_i \{CR_i\}$$

Shortest Processing Time con expediting (SPTEX). I job vengono suddivisi in due classi di priorità: la prima che contiene tutti i job che possono essere soggetti a un anticipo della data di consegna o che hanno un valore della differenza tra data di consegna e istante attuale uguale o minore di zero e la seconda è invece composta da tutti gli altri job. Vengono dapprima caricati i job della prima classe con la regola SPT e solo quando questi sono terminati si passa a quelli presenti nella seconda classe.

Work in Next Queue (WINQ). Viene data la priorità al job i^* che ha la lavorazione successiva sulla macchina j con la coda più breve in termini di carico di lavoro.

4) Regole che considerano la situazione dei job

First Come First Served (FCFS) o First In First Out (FIFO). È la regola più semplice: viene data priorità al job i^* entrato per primo in coda. Gli ordini vengono processati nello stesso ordine in cui sono rilasciati. Molte ricerche dimostrano che la regola FIFO opera in modo simile alla selezione random degli ordini rispetto il tempo di attraversamento medio e il mean lateness, benché produca una minore deviazione standard delle prestazioni rispetto la selezione casuale. In generale la regola FIFO genera risultati peggiori delle regole legate al tempo di lavorazione e alla data di consegna in termini di media e varianza della maggior parte delle misure di prestazione (Blackstone, 1982).

Last In First Out (LIFO). Viene data priorità al job i^* entrato per ultimo in coda nella macchina j .

Lowest Operation Number first (LOPN) o Fewerst Remaining Operations (FROP). Assegna la massima priorità al job avente il minor numero di lavorazioni mancanti (z), nell'istante t di valutazione:

$$i^* | \sum_j z_{i^*j} = \min_i \left\{ \sum_j z_{ij} \right\}$$

Tale regola è concettualmente analoga alla regola LWR, sebbene la valutazione sia fatta misurando il numero di operazioni mancanti anziché le relative durate. Un job avente una sola lavorazione rimanente sulla macchina j di durata elevata, risulta facilitato dalla regola FRO e penalizzato dalle regole SPT e LWR. Viceversa un job che presenta un numero elevato di operazioni residue brevi su molte macchine è privilegiato dalle regole SPT e LWR, mentre è penalizzato da FROP nonostante il job possa essere prossimo all'uscita del sistema dato il tempo totale di lavorazione residuo molto contenuto

Highest Operation Number First (HONF) o Most Remaining Operations (MROP).

Viene data priorità al job avente il maggior numero lavorazioni (z) ancora da eseguire.

$$i^* | \sum_j z_{i^*j} = \max_i \left\{ \sum_j z_{ij} \right\}$$

Tale regola è concettualmente analoga alla regola MWR sebbene la valutazione sia fatta misurando il numero di operazioni mancanti anziché le relative durate. La regola HONF tende ad accelerare la schedulazione sulle macchine di quei job che presumibilmente permarranno ancora a lungo nel sistema produttivo.

Altre regole di dispatching

- Bottleneck Priority (BP). Tutti i job in coda che non hanno ancora attraversato la risorsa collo di bottiglia hanno la priorità sugli altri job.
- Two Queue (TWOQ). I job con la priorità più elevata sono rilasciati per primi secondo la EDD. Successivamente vengono considerate i job con priorità normale ordinate sempre secondo la EDD.
- Preemption (PREE). Sequenzia i job secondo la EDD, a meno di criticità.
- Planned start time (PST). I job vengono ordinate secondo il loro planned start time.
- Ratio of value added so far to a job to the total value it will have upon completion (VLADRAT).
- Operation Critical Ratio (OPCRAT). Rapporto tra tempo rimanente fino alla operation due date diviso per il total operation processing time.

2.2.1.1 Alcune considerazioni generali

Basandosi sui risultati degli studi simulativi presenti in letteratura, si possono trarre alcune considerazioni di carattere generale circa le prestazioni di alcune regole di dispatching. Anzitutto ogni regola di dispatching massimizza determinati indicatori di prestazioni. Ad esempio la regola SPT minimizza il flow time medio e la percentuale dei job completati in ritardo, mentre la regola EDD minimizza il tardiness massimo. In secondo luogo le prestazioni ottenute sono legate alle caratteristiche del sistema produttivo. Ad esempio: *“the mean tardiness performance of various rules is a function of job and shop characteristics, and cannot be optimized by any particular rule”*. In altri termini, nessuna regola di priorità presa singolarmente *“is capable of performing equally well across all the common performance measures, especially when two important measures, mean tardiness and mean flow time, are jointly considered”* (Blackstone *et al.*, 1982; Ramasesh, 1990). La Tabella 11 classifica alcune regole di dispatching secondo la prestazione operativa influenzata maggiormente.

Tabella 11 – Una classificazione delle regole di dispatching (Land, 2002)

Preservare il flusso	Incrementare il throughput	Ridurre la variabilità del lateness
FCFS	SPT, LOR, LWR Workload balance WINQ	Due date and slack: EDD, ODD, S/OPN, CR

Alcuni studi hanno dimostrato che la regola Shortest Processing Time (SPT) minimizza il throughput time medio degli ordini e che la sua efficacia aumenta in presenza di un tempo di lavorazione molto variabile e di code estese. Oltre all’effetto locale (in ogni singola risorsa) un vantaggio ulteriore deriva dal fatto che il job che presenta il tempo di lavorazione minore è disponibile nel più breve tempo possibile per essere processato dalla risorsa successiva. In tal modo viene ridotto il tasso di inutilizzo medio delle risorse e di conseguenza vi è un incremento del throughput. Anche la regola Least Operations Remaining (LOR) presenta un effetto significativo sul throughput time. In modo del tutto analogo alla regola SPT, infatti viene data priorità a quei job che possono essere completati nel più breve tempo possibile. Per contro una criticità accomuna tutte le regole analoghe alla SPT: i job che presentano tempi di lavorazione molto lunghi possono accumulare grandi ritardi. La regola SPT-truncated è stata sviluppata al fine di mitigare tale problematica (e.g Conway *et al.* 1967; Bertrand e Wortmann 1981; Fry *et al.* 1988). La regola Work-In-Next-Queue (WINQ) influenza il throughput in maniera differente. Poiché viene data priorità al job che richiede la lavorazione successiva sulla macchina con la coda

più breve, l'obiettivo è quello di bilanciare i carichi di lavoro delle risorse, al fine di incrementare il throughput medio complessivo del reparto. Molti studi hanno evidenziato che la regola WINQ ha un effetto più limitato rispetto alla SPT sul tempo di attraversamento medio. E' importante sottolineare che affinché la WINQ possa essere impiegata, è necessario disporre di informazioni attendibili ed aggiornate sullo stato di avanzamento degli ordini e di un sistema informatico che aggiorni automaticamente le priorità. La complessità di gestione ne preclude quindi l'utilizzo nella gran parte delle situazioni reali.

Dare maggiore priorità ai job che presentano lo scostamento più ampio tra la data di fine lavorazione e quella di consegna prevista consente di ridurre il tardiness medio degli ordini. A tal proposito i ricercatori hanno proposto svariate regole di dispatching aventi un diverso grado di complessità. La regola più semplice è certamente la Earliest Due Date (EDD): per determinare la priorità di un job viene utilizzata solamente la data di consegna definita e quindi la priorità del job non varia in funzione del tempo. Altre regole fanno invece uso del cosiddetto *slack time*, ottenuto come differenza tra la data di consegna prevista e il tempo di lavorazione rimanente. Una regola leggermente più complessa è lo Slack Per Remaining Operation (S/OPN), dove lo slack time viene diviso per il numero di operazioni rimanenti. In questo caso la priorità degli ordini varia dinamicamente nel tempo.

2.2.2 Meccanismi di rilascio degli ordini

I meccanismi di rilascio degli ordini rappresentano il cuore delle tecniche ORR e possono essere classificati in due categorie in principali: *finite loading* (gli ordini sono rilasciati quando il carico del reparto o delle macchine è inferiore a un determinato livello stabilito) o *infinite loading* (gli ordini sono rilasciati in un determinato istante senza tener conto del carico del reparto o delle macchine) (Wisner, 1995).

Come metro per il confronto delle prestazioni delle diverse tecniche di rilascio i ricercatori hanno spesso utilizzato il rilascio immediato (Immediate Release – IMM o IMR). L'IMM è classificato tra gli approcci *naive* poiché gli ordini sono rilasciati non appena disponibili senza tenere in considerazione lo stato del reparto produttivo. In alcuni studi, l'IMM ha ottenuto prestazioni superiori in termini di lead time e questo fatto ha contribuito ad alimentare il dibattito sul *research paradox*. L'IR (Interval Release) è una variante "periodica" dell'IMM: gli ordini vengono raccolti nel portafoglio ordini e quindi rilasciati periodicamente.

Le ricerche sui metodi di rilascio includono:

- Backward Infinite Loading (BIL)
- Modified Infinite Loading (MIL).
- Maximum Load (MXL)
- Minimum Load (MNL).
- Maximum-Minimum Load (MXLMNL)
- Forward Finite Loading (FFL).
- Backward Finite Loading (BFL).
- Path Based Bottleneck (PBB).
- Constant Work in Process (CONWIP).
- Starvation Avoidance (SA).
- Aggregate Work-load trigger, Work-in-next Queue (AGGWNQ).
- Work-load trigger, Earliest Due-Date (WCEDD).
- Maximum Number of Jobs (MNJ).
- Workload Control – Lancaster (WLC-L).
- Workload Control – IFA (WLC-I).
- Load-Oriented Order Release (LOOR).

Questi criteri di rilascio verranno presentati di seguito.

Backward Infinite Loading (BIL)

BIL è un approccio di tipo *finite loading* che rilascia gli ordini in produzione un certo periodo in anticipo rispetto la data di consegna, introducendo dei multipli del tempo di lavorazione. BIL determina la data di rilascio dell'ordine come segue:

$$RD_i = DD_i - kP_i$$

Dove:

- RD_i = release date per il job i ;
- DD_i = due date per il job i ;
- P_i = tempo di lavorazione atteso (o numero di operazioni) dell'ordine i ;
- Q = workload corrente (o numero di job) nel ciclo del job;
- K_1 = costante (process time constant);

Modified infinite loading (MIL)

É sempre un approccio di tipo time phased. Come nel caso del BIL, anche il MIL ignora la capacità produttiva del reparto anche se questa volta viene tenuto conto del carico di lavoro. La data di rilascio dell'ordine è calcolata all'indietro partendo dalla data di consegna, utilizzando fattori che tengono conto delle operazioni dell'ordine e del numero di ordini in coda lungo il ciclo di lavorazione del job. MIL determina la data di rilascio nel modo seguente:

$$RD_i = DD_i - k_1 P_i + k_2 Q_i$$

Dove:

- RD_i = release date per il job i ,
- DD_i = due date per il job i ,
- P_i = tempo di lavorazione atteso (o numero di operazioni) dell'ordine i ,
- Q = workload corrente (o numero di job) nel ciclo del job,
- k_1, k_2 = fattori (process time e queue time constant)

Maximum load (MXL)

Il meccanismo di rilascio MXL è un approccio *load limited* che rilascia gli ordini in produzione sulla base del loro ordine di arrivo (First come First Served) nel portofoglio ordini, fintantoché il carico del reparto non raggiunge un limite massimo prefissato. Tale metodo controlla direttamente il livello di WIP. Esiste un gran numero di varianti del MXL. Il carico massimo può essere stabilito per l'intero reparto o solamente per quei centri presenti nel ciclo dell'ordine o solamente per una risorsa collo di bottiglia.

Minimum Load (MNL)

In maniera del tutto simile al MXL può essere definito un livello minimo di carico dei centri per il quale gli ordini sono rilasciati secondo le loro priorità, senza curarsi dello stato di congestione del reparto, al fine di garantire un carico di lavoro quantomeno pari al limite fissato. Le metodologie MXL e MNL sono state combinate per ottenere un nuovo metodo, noto come MXLMNL, che vincola il carico in un range definito da un valore superiore ed inferiore.

Forward Finite Loading (FFL)

Il Forward Finite Loading è un meccanismo di rilascio che limita il carico di lavoro, secondo il quale ogni operazione dell'ordine viene imputata utilizzando la seguente espressione:

$$\text{Flow time} = k * \text{processing time}$$

L'equazione del flow time determina in che istante ciascun ordine richiede la capacità produttiva in ogni macchina secondo il relativo ciclo tecnologico. FFL assegna i jobs alle macchine considerando la capacità non ancora utilizzata. Se la capacità disponibile della risorsa è sufficiente per processare l'intero ordine allora l'operazione viene assegnata alla macchina in quel periodo e la capacità viene ridotta di conseguenza. Se la capacità non è disponibile in quel periodo, allora il job viene caricato nel periodo successivo in cui vi è sufficiente capacità. Il caricamento continua fintantoché l'ultima operazione dell'ordine non è assegnata. L'ordine viene rilasciato quando il *load period* relativo all'ultima operazione giace nello stesso periodo o in periodo successivi a quello contenente la data di consegna. Se invece l'ultima operazione di un job viene imputata ad un periodo antecedente al periodo contenente la data di consegna, questo viene reinserito nel portafoglio ordini.

Backward Finite Loading (BFL).

È un metodo di rilascio che limita il carico di lavoro. L'orizzonte di pianificazione è suddiviso sottointervalli detti *time buckets*. Vengono calcolati i profili di carico disponibile per ogni risorsa del reparto per ciascun time bucket dell'orizzonte di pianificazione. Partendo dalla data di consegna, andando a ritroso, il BFL cerca una congruenza tra ogni operazione e la capacità disponibile per ogni macchina prevista nel ciclo. Se la capacità disponibile non è sufficiente in un dato time bucket, le operazioni vengono spostate in un time bucket precedente. Una volta che un'operazione è stata caricata, quelle che la precedono (relativamente al ciclo tecnologico) vengono caricate analogamente. L'istante nel quale è caricata la prima operazione prevista dal ciclo determina la data di rilascio dell'ordine. Se il meccanismo determina una data di rilascio contenuta in un time bucket precedente alla data corrente, allora l'ordine viene rilasciato immediatamente e le operazioni vengono caricate in avanti.

Aggregate Work-load trigger, Work-in-next Queue (ACGWNQ)

La regola ACGWNQ ha l'obiettivo di assicurare che carico di lavoro presente nel reparto sia ad un determinato livello; il rilascio avviene quando il carico totale scende sotto una determinata soglia. Viene identificato il centro di lavoro con la coda più breve e rilasciato l'ordine che prevede la prima operazione in tale risorsa. Se più ordini prevedono delle lavorazioni su tale macchina, viene selezionato quello con il tempo di lavorazione minore. ACGWNQ combina quindi un meccanismo di trigger con la regola di selezione degli ordini WINQ.

Work-load trigger, Earliest Due-Date (WCEDD)

Allo stesso modo, anche il meccanismo WCEDD combina una regola di trigger e una di selezione. Il rilascio avviene non appena il carico di lavoro di una risorsa scende sotto un determinato valore. Tra gli ordini contenuti nel portafoglio viene rilasciato quello che prevede la prima operazione sulla risorsa considerata e che presenta la EDD più prossima.

Load Oriented Order Release (LOOR)

Il metodo di rilascio controllato del carico sviluppato ad Hannover noto come LOOR (Load Oriented Order Release) (Bechte, 1982), stima il carico diretto che è previsto in arrivo ad un centro di lavoro attraverso un algoritmo noto come *Load Conversion*. Il carico di lavoro così stimato viene vincolato imponendo un limite di carico superiore, in modo del tutto analogo all' metodo MXL. Il LOOR verrà approfondito ampiamente nel proseguo di questo lavoro di tesi.

Work Load Control (WLC- L)

A differenza di quanto appena visto per il LOOR, il modello di WLC sviluppato a Lancaster e noto come *aggregate workload* evita la stima del carico diretto in input. Il carico diretto ed indiretto di ogni centro di lavoro vengono sommati ed il valore risultante viene confrontato con un limite definito. Sono state proposte diverse varianti del modello originario proposto da Lancaster. Per ridurre il ricorso a feedback continui sullo stato di avanzamento degli ordini, è stato proposto di sommare al carico diretto e quello indiretto anche il lavoro già completato. Tale approccio è noto come *extended aggregate workload*.

Superfluous Load Avoidance Release (SLAR)

Il meccanismo SLAR prevede il rilascio di un ordine al verificarsi di una delle seguenti condizioni.

- Se il carico di un centro di lavoro è nullo, allora viene rilasciato il job con la planned start date più prossima e la prima operazione prevista dal ciclo sulla risorsa inutilizzata.
- Se tutti i job in coda in una risorsa non sono urgenti, allora viene rilasciato un ordine urgente che prevede la prima operazione su quel centro di lavoro.

Se nessuna delle due condizioni si verifica gli ordini non vengono rilasciati

Work Balancing (WLB)

Il meccanismo Work Balancing consente il rilascio di un ordine in produzione nel caso in cui ad un lieve sottocarico o sovraccarico di una o più risorse, corrisponda un maggiore bilanciamento globale del reparto.

2.2.3 Misure di prestazione

Le misure di prestazione impiegate nelle ricerche sull'ORR possono essere classificate in due categorie principali: *cost based* e *non cost based*. In particolare dai lavori presenti in letteratura emergono 15 differenti misure *cost based*. Tra le più comuni rientrano misure legate al costo del work in progress, al costo di mantenimento scorte e ai costi legati al ritardo di consegna. Inoltre si possono identificare oltre 40 misure *non cost based*, tra le quali le più utilizzate sono:

- tardiness medio,
- deviazione del tardiness,
- percentuale dei job in ritardo,
- lateness medio,
- deviazione del lateness,
- tempo di coda medio,
- utilizzo medio delle risorse,
- flow time medio,
- work in process.

Dall'analisi della letteratura sugli studi di carattere simulativo all'interno dell'ORR svolta, si evince che non vi è accordo sull'appropriatezza dell'utilizzo delle metriche di prestazione in relazione al contesto di implementazione, siano esse *cost* che *non-cost based*. Inoltre la mancanza di corrispondenza tra le misure di prestazione impiegate nei diversi lavori, impedisce in molti casi il confronto di risultati di studi differenti.

2.2.4 Setting della data di consegna

Il processo di quotazione della data di consegna (Due Date) consiste nella determinazione e proposta al cliente di una data di consegna quanto più affidabile possibile sulla base della disponibilità delle risorse produttive. È quindi uno strumento che consente di prendere decisioni in un contesto di incertezza e dinamicità sia all'interno che all'esterno del sistema produttivo. Tipicamente la scelta della data di consegna e dell'accettazione o meno dell'ordine sono attività concomitanti in quanto in questa fase spesso è prevista un'attività di negoziazione con il cliente. Nei lavori di carattere specialistico i ricercatori hanno proposto diversi metodi per la stima della data di consegna. Tra i vari contributi si possono citare quelli di Seidmann e Smith (1981), Panwalkar *et al.* (1982), Bertrand (1983a, 1983b), Baker (1984), Ragatz e Mabert (1984), Bobrowski e Park (1989), Vig e Dooley (1991), Ahmed e Fisher (1992), Tsai *et al.* (1997) e Sabuncuoglu e Karapinar (2000).

È possibile adottare un approccio di tipo *analitico*, nel qual caso il valore stabilito per la data di consegna risulta ottimale, o in alternativa un approccio di tipo *empirico* dove la due date assume un valore genericamente adeguato, ma non necessariamente ottimale. Inoltre si definiscono euristiche *esogene* quei metodi che attribuiscono il valore della data di consegna sulla base di informazioni statiche o stocastiche che non considerano elementi potenzialmente disponibili all'interno di un sistema di programmazione della produzione, quali ad esempio il numero degli ordini già acquisiti e rilasciati, lo stato corrente delle risorse, il tempo di lavorazione, etc. Al contrario, le tecniche di assegnazione euristica puntano a definire il tempo di attraversamento di ogni job basandosi sull'uso delle informazioni disponibili all'interno del sistema stesso (Tabella 12). Verranno di seguito presentati solamente alcuni metodi disponibili in letteratura poiché una trattazione completa va oltre lo scopo di questa tesi.

Tabella 12 – Metodi per determinare la data di consegna (Blackstone et al., 1982).

Esogeno	Endogeno
CON (costante). La data di consegna è determinata utilizzando un intervallo di tempo costante.	TWK (total work content). La data di consegna è determinata in base al contenuto totale di lavoro.
RAN (random). La data di consegna è determinata in maniera random.	NOP (number of operations). La data di consegna è determinata in base al numero di operazioni.
	SLK (slack). La data di consegna è determinata in base al contenuto totale di lavoro

Un metodo estremamente semplice e comunemente adottato dai ricercatori consiste nello stabilire la data di consegna “esternamente” al processo di pianificazione e quindi di assumerla come assegnata. In alcuni autori hanno fissato la data di consegna utilizzando dei lead time standard, ottenuti tramite simulazione. Tra le ricerche che utilizzano tali metodi riportiamo Philipoom e Fry (1992), Bobrowski (1989), Roderick *et al.* (1992), Bragg *et al.* (1999) e Watson *et al.* (1995).

Il metodo CON e RAN (Tabella 12) (definiti metodi *naive*) assegnano la data di consegna esternamente al sistema di schedulazione. L’approccio euristico, che cerca di stimare il flow time, maggiormente utilizzato dai ricercatori è noto come *Total Work Content* (TWK). Questo è stato impiegato ad esempio in Melnyk *et al.* (1989), Philipoom e Fry (1994), Hendry e Wong (1994), Malhotra *et al.* (1994), Newman e Maffei (1999), Cigolini e Portioli (2002), e Moreira e Alves (2006). La data di consegna del job *i* viene stimata moltiplicando il tempo di lavorazione per una costante intera K:

$$DD_i = Arrival\ time_i + (K_{TWK} * TWK_i)$$

Dove K è una costante e TWK_{*i*} è il tempo di lavorazione totale dell’ordine *i*.

La *due date tightness* è impostata variando il valore della costante K: date di consegna più “ampie” si ottengono per valori di K maggiori. In quasi tutte le ricerche vengono impiegate delle simulazioni preliminari per calcolare il valore della costante K.

Fredendall e Melnyk (1995) e Ragatz e Mabert (1988) hanno adottato una variante del TWK, nota come NOP, sostituendo il numero totale di operazioni (*n*) al tempo totale di lavorazione:

$$DD_i = Arrival\ time_i + (K_{NOP} * n)$$

Un altro metodo che cerca di stimare il tempo di attraversamento, simile a quelli appena presentati è noto come SLK (slack):

$$DD_i = Arrival\ time_i + (K + TWK_i)$$

Ashour e Vaswani (1972) hanno combinato i metodi TWK e NOP al fine di migliorarne le prestazioni:

$$DD_i = Arrival\ time_i + K_{TKW} * TWK_i + K_{NOP} * n$$

Le ricerche di Ahmed e Fisher (1992) e Tsai *et al.* (1995) sono senza dubbio le più ampie sul tema dell'ORR con un focus particolare sul tema della determinazione della data di consegna. Secondo Ahmed and Fisher vi è interazione tra le procedure di assegnazione della data di consegna, di rilascio e di dispatching.

Un metodo che va oltre il TKW in quanto include, non solo il contenuto totale di lavoro, ma anche il tempo di attraversamento e le code attese, consiste nell'utilizzo di lead time che si aggiornano dinamicamente tenendo conto della struttura della distinta base, dello stato contingente del sistema (carico, code, etc) e della quantità degli ordini pervenuti. Allo stato attuale un numero estremamente limitato di lavori ha impiegato tale metodo. Tale approccio è alla base del metodo per il calcolo della data di consegna implementato nel modello di simulazione presentato in questa tesi.

2.2.5 Risultati

Lo studio di Adam e Surkins (1977) esamina tre meccanismi di rilascio degli ordini in un contesto job shop: capacità finita, capacità infinita e il dynamic forward loading. I risultati sperimentali indicano che il meccanismo dinamico consente di ottenere il valore del lateness minore e il maggior numero di job completati in tempo. Per contro, tale meccanismo ha riportato le prestazioni peggiori in termini di earliness. Il meccanismo di carico a capacità infinita evidenzia il valore minore dell'earliness.

Lo studio di Shimoyashiro *et al.* (1984) esamina l'impatto del load balancing e del load limiting attraverso la simulazione di un sistema manifatturiero. Gli autori hanno testato i seguenti meccanismi di rilascio: IMM, MXL e tre varianti del CAP (*load balance and the amount of work released to the Shop*). I risultati indicano che il CAP riduce significativamente il lateness, il flow time medio e incrementa le misure degli indici legati al tasso di utilizzo delle risorse. Shimoyashiro *et al.* (1984) concludono che i risultati sperimentali sono indipendenti dalle regole di dispatching impiegate.

Alcuni studi evidenziano come in contesti particolari, oltre al controllo dell'input e dell'output, è conveniente ridurre il grado di inutilizzo dei centri di lavoro. Glassey e Resende (1988) introducono un metodo di ORR con l'obiettivo di evitare che le risorse vincolanti, ossia i colli di bottiglia, rimangano inutilizzate, assicurando la presenza di un'opportuna quantità di lavoro in coda. In particolare un dato set di ordini viene selezionato e rilasciato dal portafoglio ogni qualvolta il contenuto di lavoro di una risorsa collo di bottiglia scende al disotto di un determinato livello. Un approccio simile è stato testato da Melnyk e Ragatz (1989) all'interno dei modelli noti come WCEDD and AGGWNQ.

Ragatz e Mabert (1988) hanno studiato l'interazione esistente tra il dispatching e il rilascio dell'ordine, testando cinque meccanismi di rilascio e quattro regole di dispatching. Tra le variabili considerate gli autori hanno introdotto il tasso di utilizzo delle macchine e la due date tightness. La funzione obiettivo è il costo totale per periodo che consiste nella somma del costo dovuto allo stock e di quello imputabile a ritardi di consegna. Dai risultati sperimentali emerge quanto segue. Le prestazioni delle regole di dispatching considerate nello studio non dipendono dal metodo con cui viene stabilita la data di consegna (due date tightness) e dal meccanismo di rilascio utilizzato. In particolare il Critical Ratio è la regola che ottiene i migliori risultati, seguito nell'ordine dall'Earliest Due Date (EDD), dal First Come First Served (FCFS), e infine dallo Shortest processing time (SPT). In riferimento all'indicatore di costo totale considerato nel lavoro, il metodo di rilascio ha dimostrato un effetto minore rispetto alle regole di dispatching. Inoltre il rilascio controllato dell'ordine consente di ottenere dei costi totali pari o inferiori al rilascio non controllato (*immediate release*). Relativamente alle misure di prestazione non legate al costo, tutti i meccanismi di rilascio controllato hanno ottenuto una riduzione del lead time e del livello di WIP. L'analisi di sensitività condotta da Ragatz e Mabert ha evidenziato alcuni risultati inattesi. Al diminuire dell'utilizzo medio delle risorse, l'incremento delle prestazioni derivante dall'applicazione di meccanismi di rilascio controllato diventa più marcato. Ciò suggerisce che "*capacity is critical to the load limited release methodologies*". Nelle condizioni sperimentali testate, le prestazioni dei meccanismi di rilascio sono influenzate dalla regola di dispatching impiegata: "*both the dispatching rule and the due-dates assignment rule deeply affect ORR performances*".

Melnyk e Ragatz (1989) testano tre metodi di rilascio in combinazione con quattro regole di dispatching (FCFS, SPT, EDD, S/OPN) e quattro livelli relativi alla *due date*

tightness. I risultati sperimentali evidenziano che i meccanismi di rilascio noti come WCEDD e AGGWNQ riportano prestazioni di delivery molto scarse se confrontati con l'IMM (o NORR - No Order Review/Release). Secondo gli autori l'applicazione del rilascio controllato potrebbe essere insufficiente a ridurre il tempo di attraversamento totale degli ordini; difatti il tempo atteso in coda può spostarsi dal reparto produttivo al portafoglio ordini, mantenendo invariate le prestazioni globali: “ *The simulation results show that while queue times on the shop floor are reduced by ORR, this reduction is more than offset by the time in the order release pool (a pre-shop queue), So the introduction of ORR in the study has not reduced total queue time, but rather it has shifted the queue time from the shop to the order release pool, so that external performances are not effected*”. Secondo gli autori, tuttavia, il rilascio controllato comporta comunque dei vantaggi. Il fatto che la coda trasla dal reparto al portafoglio ordini aggiunge estrema flessibilità al sistema (il portafoglio non è altro che un elenco di codici in formato elettronico o cartaceo).

Gli studi di Park (1987) e Bobrowsky e Park (1989) considerano l'impatto del rilascio controllato sulle prestazioni operative di un sistema produttivo che presenta due colli di bottiglia. Gli autori valutano gli effetti di diversi meccanismi di controllo del carico (IMM, BIL, FFL) simulando un job shop composto da cinque centri di lavoro con due macchine identiche ciascuno. La misura di prestazione esaminata è il costo totale giornaliero ottenuto dalla somma dei costi di mantenimento delle scorte, dei costi di penalità dovuti al lateness e dei costi di trasferimento del personale. I risultati evidenziano che il rilascio controllato consente di ottenere prestazioni superiori rispetto quello non controllato in corrispondenza di tutte le regole di dispatching utilizzate. Inoltre i risultati dimostrano che le prestazioni del sistema sono più sensibili alla scelta del meccanismo di rilascio rispetto che alla regola di dispatching.

Hendry e Kingsman (1991) impiegano un modello simulativo composto di tre macchine per valutare l'efficacia di un metodo di rilascio degli ordini (BLF – Backward Finite Loading) sulla riduzione del tempo di attraversamento. Il metodo proposto controlla il carico di lavoro ed i lead time, rilasciando gli ordini secondo la *latest due date*. Il controllo dell'output è ottenuto attraverso la variazione della capacità produttiva disponibile e la riallocazione delle risorse. Secondo gli autori “*The latter option (output control) will be appropriate if there is an imbalance of workload across the shop floor. Hence it may be preferable to balance the existing workload rather than releasing other jobs or as well as releasing jobs. Overtime could be assigned in order to release a job and it may be*

decreased if the load is smaller than expected to provide more work during normal working hours". Secondo Hendry e Kingsman il rilascio controllato degli ordini riduce il livello di congestione del sistema produttivo ed il work in process.

Lygayart *et al.* (1992) esaminano l'effetto del rilascio controllato del carico simulando un sistema composto da una sola risorsa. Secondo gli autori è possibile ottenere un miglioramento sostanziale delle prestazioni rispetto a quanto ottenuto da Baker (1984) se nel meccanismo di rilascio viene inclusa la valutazione di quale ordine rilasciare oltre a determinare l'istante del rilascio. Inoltre i risultati evidenziano che le prestazioni del metodo di rilascio dipendono fortemente sia dalla regola impiegata per la definizione della data di consegna che da quella di dispatching. In particolare le prestazioni migliori si ottengono in presenza della STP.

Il modello proposto da Philipoom e Fry (1992) prevede che gli ordini cliente non vengano sempre accettati. Gli autori hanno integrato la fase di ingresso dell'ordine con una procedura euristica finalizzata a rifiutare gli ordini che provocherebbero il sovraccarico del sistema produttivo. Essi implementano due varianti del MXL (Maximum Load) ossia il Shop Load order e il Path Load Order. Nel caso di sistemi pesantemente congestionati, l'accettare tutti gli ordini in arrivo, porta a una riduzione consistente degli indici di prestazioni legati alla puntualità di consegna. A differenza di altre metodologie di ORR, che determinano in che caso e in quale istante rilasciare un ordine, il meccanismo proposto definisce anche se accettare o rifiutare un ordine. Mediante il meccanismo Shop Load, l'ordine è accettato se la somma del carico totale del reparto e di quello imputabile all'ordine in ingresso è inferiore a un determinato valore limite. In caso contrario l'ordine viene rifiutato. Con il meccanismo Path Load invece gli ordini sono accettati se il carico di lavoro di ogni risorsa prevista dal ciclo tecnologico non eccede un limite prefissato che è definito per ogni macchina. In caso contrario l'ordine viene rifiutato. I risultati indicano che, nelle condizioni sperimentali testate, rifiutare una percentuale limitata di ordini in ingresso induce un miglioramento significativo del tempo di attraversamento, del ritardo medio e del grado di utilizzo delle risorse. Gli autori concludono inoltre che il metodo Path based è più efficiente rispetto al Shop Load.

Lo studio di Park e Salegna (1995) esamina due meccanismi di rilascio (IMM e MXL), quattro meccanismi di livellamento del carico (load smoothing mechanism – NOSMOOTH, CEILING, FLOOR e BOTH), tre regole di dispatching (FCFS, FPT, MOD) e due meccanismi di feedback (NoFeedback (NOFB) e Feedback (FB)). Il modello di

simulazione consiste in un job shop costituito da sei centri di lavoro, ciascuno contenente una sola risorsa. Tra le variabili sperimentali esaminate, il meccanismo di feedback è quello che impatta maggiore sulle prestazioni del sistema: *“the feedback system between the planning phase and shop floor to maintain the minimum shop load becomes much more important than simply controlling job release time”*. Il metodo atto al livellamento del carico denominato FLOOR (che tira gli ordini in avanti per portare il carico del reparto ad un valore minimo imposto) ha dimostrato prestazioni migliori rispetto agli altri meccanismi di smoothing in termini di tempo di attraversamento e di tardiness. Inoltre i meccanismi di smoothing che spingono indietro gli ordini affinché non venga superato il limite di carico massimo non hanno evidenziato prestazioni superiori rispetto a quelli no-smoothing. Secondo gli autori: *“results showed that employment of load smoothinh is important, and pulling jobs forward in a valley period is better than pushing back job in a peak period. Controlling the release of jobs to the shop floor in the order review/release phase, given the amount of jobs to be processes during the planning period, is not effective”*. In relazione ai meccanismi di rilascio considerati, l’IMM è risultato nel complesso migliore di MXL in corrispondenza di tutti i meccanismi di load smoothing e delle regole di dispatching impiegate. Inoltre, come nel caso di Melnyk e Ragatz (1989), la regola di dispatching SPT ha riportato il tempo di attraversamento minore.

Tsai *et al.* (1997) hanno esaminato l’interazione tra meccanismi di rilascio (IMM e due varianti del MXL), regole per la determinazione della data di consegna e regole di dispatching. I risultati evidenziano che l’integrazione delle regole di rilascio e delle regole per la stima della data di consegna consente di incrementare sensibilmente le prestazioni legate alla due date e al tempo di attraversamento.

Perona e Portioli (1998) analizzano l’impatto di alcuni parametri di funzionamento del metodo LOMC (Load Oriented Manufacturing Control) proposto da Bechte (1988). Le variabili sperimentali analizzate sono il *planning period* (periodo di pianificazione) e il *checking period* (intervallo di tempo valutazioni successive per il rilascio degli ordini). Lo studio dimostra che entrambi i fattori hanno un impatto significativo sulle prestazioni del sistema.

Cigolini *et al.* (1998) esaminano l’impatto e la robustezza di alcuni dei metodi di contabilizzazione del carico di lavoro inseriti in un sistema produttivo dinamico e variabile. I fattori sperimentali comprendono la disponibilità delle macchine, la variabilità del tempo di lavorazione e il tasso di bilanciamento del mix produttivo. Nello studio

vengono testati tre meccanismi di rilascio che si differenziano solamente per il *timing convention* utilizzato, in particolare l'approccio atemporale, quello probabilistico e quello aggregato. I risultati sperimentali evidenziano che le prestazioni delle ORR testate dipendono fortemente della variabilità caratterizzante il sistema produttivo. Gli autori riportano le seguenti osservazioni: *“First, the time bucketing approach seems suitable to those contexts where perturbations are very low, while the probabilistic techniques appear to match the characteristics of job shop environments with a higher uncertainty degree”*. Ciò può essere attribuito al fatto che le informazioni sullo stato attuale di carico del reparto sono utilizzate nel processo di rilascio dell'ordine, consentendo un adattamento rapido in contesti dinamici caratterizzati da elevata incertezza. *“Second, the robustness of ORR techniques facing the environmental conditions plays a major role in determining the performances in a dynamically changing shop floor and should be considered as key features of ORR techniques. Finally, the overall performance comparison among the considered ORR techniques has shown a significant edge of the probabilistic approach, while the time bucketing one is the worst for all the performance indexes considered. The performances of the atemporal approach are not as good as those yielded by the probabilistic approach, but they can be considered as interesting, given the simple way of workload accounting over time.* Gli autori concludono l'approccio *time bucketing* è più efficace in contesti stabili, mentre quello probabilistico è più indicato in sistemi produttivi caratterizzati da un maggiore grado di incertezza.

Land e Gaalman (1998) hanno proposto un metodo di rilascio, noto come SLAR (superfluous load avoidance release), che non dipende dai valori imposti per il limite di carico. Secondo gli autori i carichi non devono essere vincolati da regole e valori estremamente rigidi. Inoltre il rilascio di un job che può evitare l'inutilizzo di un centro di lavoro non deve essere vincolato dai limiti di carico imposti per centri posti a valle. Il metodo SLAR ha riportato le prestazioni migliori in termini di lead time e data di consegna, indipendentemente dal livello di carico del sistema.

Sabuncuoglu e Karapinar (1999) hanno testato nove differenti meccanismi di rilascio congiuntamente a due regole di dispatching, due livelli di carico e due metodi per determinare la data di consegna. In particolare gli autori hanno esaminato tre versioni del metodo MXL (*continuos aggregate loading, periodic aggregate loading e work centre information based loading*). L'obiettivo primario dello studio è quello di *“demonstrate that potential benefits of ORR can be achieved in research environments if congestion s*

properly modeled". I risultati sperimentali hanno dimostrato che i metodi di rilascio continuo, se comparati con quelli periodici, ottengono prestazioni superiori in termini di tempo di attraversamento e di tardiness.

Lo studio di Oosteman *et al.* (2000) testa differenti meccanismi di rilascio degli ordini (WLC-L, LOOR) in funzione della tipologia del flusso di materiali e dei cicli di lavoro. Come per il lavoro di Cigolini *et al.* (1998), anche in questo caso i metodi testati differiscono nella modalità con cui vengono stimati i carichi di lavoro (*workload accounting method*). I risultati evidenziano che le prestazioni dei metodi di rilascio, in termini di tempi di attraversamento, sono fortemente influenzate dalla tipologia del flusso di materiali e quindi della struttura del sistema produttivo. L'approccio aggregato risulta più indicato quando il flusso di materiali del sistema produttivo presenta una direzione preferenziale. Al contrario, in una configurazione simile ad un *pure job shop* quello probabilistico è più opportuno. Secondo gli autori "*The approach that performs best in the theoretical pure job shop, shows the worst performance when the shop is characterized by a more dominant flow. Obviously, the aggregate workload and the shop load do not appropriately indicate the future flow of work to a station in the case of job shops*". Tali risultati possono fornire una chiave di lettura sul fatto che in diversi studi simulativi i metodi di rilascio hanno ottenuto prestazioni scadenti. Secondo gli autori infatti "*these studies often apply release methods that strongly aggregate workloads in a pure job shop model*".

Lo studio di Cigolino e Portioli (2002) analizza le prestazioni di tre differenti meccanismi di rilascio degli ordini (MXL o Upper Bound Only, MXLMNL o Upper and Lower Bound, WB - Workload Balancing) al fine di (1) valutare se il meccanismo di limitazione del carico utilizzato ha un effetto significativo sulle prestazioni, (2) esaminare le prestazioni dei diversi metodi al variare del *mix imbalance* e (3) di valutarne la robustezza in funzione di fattori ambientali quali la variabilità del tempo di lavorazione e del downtime. L'analisi dei risultati evidenzia che MXL è il meccanismo che fornisce, globalmente le prestazioni migliori, seguito subito da BW. MXLMNL ha riportato i risultati peggiori. In riferimento al metodo di contabilizzazione dei carichi (*workload accounting method*) gli autori riportano che "*by analyzing the results yielded by the different workload accounting over time policies (i.e. Probabilistic, Atemporal and Time Bucketing) coupled with the alternative workload control methods, it should first be pointed out that there is no workload control method performing better than the others under all tested conditions. Results show that the behavior of these methods (workload*

limit) does not depend very much on the workload accounting over time approach adopted.” Il BW è risultato il più robusto in presenza di elevata variabilità dei fattori ambientali. Cigolini e Portioli concludono che il MXLMN non introduce alcun vantaggio rispetto agli altri meccanismi testati: “the ‘upper and lower bound’ presents no advantages over ‘upper bound only’, while the ‘workload balancing’ method appears not far behind the ‘upper bound only’ method and, for a few performance indexes, it is even better. This workload method shows some potential and it is, to a certain extent, more robust.”

Enns e Prongue-Costa (2002) hanno confrontato due metodi di rilascio degli ordini, il primo basato sul carico aggregato del reparto e l’altro basato sullo stato delle risorse colli di bottiglia. In quest’ultimo il carico viene rilasciato quando il livello di WIP della risorsa vincolante scende sotto un determinato livello. Le variabili sperimentali includono la configurazione del reparto, il grado di bilanciamento dei carichi, le regole di dispatching e la tipologia di flusso di materiali. I risultati sperimentali evidenziano che il meccanismo aggregato fornisce prestazioni migliori in presenza di un carico bilanciato delle risorse e con una direzione preferenziale del flusso dei materiali. I risultati evidenziano che le regole di dispatching acquistano maggiore importanza all’aumentare della casualità della direzione del flusso dei materiali.

Rosario Moreira e Alves (2006) hanno analizzato le fasi di accettazione/rifiuto dell’ordine, di definizione della data di consegna, di rilascio e di dispatching. L’obiettivo del modello di rilascio da loro proposto è quello di gestire contemporaneamente il rilascio degli ordini e il controllo dell’output attraverso l’adattamento della capacità. Il piano sperimentale proposto include due metodi di accettazione/rifiuto dell’ordine, quattro meccanismi di rilascio e due regole di dispatching. I risultati evidenziano l’esistenza di interazioni tra le quattro variabili sperimentali. Le prestazioni migliori sono relative all’applicazione della EDD come regola di dispatching, MIL come meccanismo di rilascio e AFW come meccanismo di accettazione/rifiuto dell’ordine.

Thurer *et al.* (2009), attraverso la simulazione di un job shop costituito da sei centri di lavoro (Melnyk e Ragatz, 1989), hanno misurato l’effetto delle dimensioni e delle priorità degli ordini⁷ sulle prestazioni del sistema, utilizzando i principali meccanismi di contabilizzazione del carico, ossia quello aggregato (i.e. Bertrand e Wortmann, 1981;

⁷Gli autori considerano un sistema produttivo in cui la dimensione degli ordini è un fattore fortemente variabile. Gli ordini che richiedono un tempo di produzione superiore a 3 unità di tempo (time unit) sono considerati *large order*.

Hendry e Kingsmann, 1991; Kingsman, 2000), probabilistico (i.e. Bechte 1988, 1994; Wiendahl, 1995) e il Time Bucketing (i.e. Bobrowski, 1989). In tutte le prove simulate è stato impostato il First-Come-First-Served come regola di dispatching. Lo studio evidenzia che, in fase di rilascio, le prestazioni maggiori si ottengono quando la priorità degli ordini viene assegnata sulla base dell'estensione del loro ciclo produttivo⁸. Applicando tale meccanismo è possibile ottenere un miglioramento generale delle prestazioni ed in particolar modo quelle relative agli ordini di grandi dimensioni: *“prioritisation appears to be the best solution to incorporating small and large job sizes within the release mechanism of the WLC concept, providing the best balance between the differing needs of the two job sizes”*. Gli autori concludono che *“results suggest the best solution is assigning priority based on routing length; this improved performance, especially for large jobs, and allowed a short release period to be applied, as favoured by small jobs”*.

Lawrence *et al.* (2010) hanno testato 25 meccanismi di rilascio disponibili in letteratura al fine di comprendere come tre dei parametri costituenti il WLC (Order selection, Work aggregation, buffer limits) condizionano le prestazioni del sistema al variare delle condizioni ambientali (differenti livelli di carico delle risorse collo di bottiglia e livelli di capacità protettiva delle altre risorse). Nello studio vengono testati anche il CONWIP (CONstant Work In Progress) e il DBR (Drum-Buffer-Rope). Il modello simulativo comprende dieci prodotti e tredici stazioni di lavoro. L'analisi dei dati evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo sulle prestazioni del sistema solamente in presenza di colli di bottiglia estremamente sovraccarichi e di una ridotta capacità protettiva delle altre risorse. Inoltre secondo gli autori il metodo con cui viene aggregato o disaggregato il carico di lavoro è un fattore di primaria importanza all'interno dei metodi di controllo del carico.

⁸ *“Jobs are prioritised in the pool according to job size or routing length. Either the largest job or longest routing is considered for release first”*.

Capitolo 3 - Workload Control (WLC)

Il Workload Control (WLC) è un sistema di Pianificazione e Controllo della Produzione efficace in ambienti manifatturieri complessi operanti con logica to-order e caratterizzati come noto da un notevole mix produttivo, elevata variabilità dei cicli tecnologici e dei tempi di lavorazione (Stevenson *et al.*, 2005, Moreira e Alves, 2009).

Il WLC ha l'obiettivo di mantenere il carico di lavoro di ogni risorsa stabile a un determinato livello, garantendo al contempo un adeguato bilanciamento delle risorse produttive, al fine di assicurare tempi di attraversamento ridotti e costanti. Una volta che viene fissato il livello di WIP del sistema, è possibile determinare anche i valori delle altre variabili chiave che definiscono un sistema produttivo, come ad esempio il tempo medio di attraversamento e il tasso di utilizzo della capacità (Missbauer, 2002). La relazione funzionale che intercorre tra il WIP medio da una parte, e le altre variabili sopra menzionate dall'altra, e che è alla base del concetto di workload control, può essere ottenuta tramite modelli analitici, ma nella maggior parte dei casi viene determinata direttamente analizzando i dati ottenuti da simulazioni o da studi empirici (per un'analisi matematica della relazione tra WIP medio e tempo di attraversamento medio si rimanda a Bertrand, 1981). La Figura 7 mostra un esempio della relazione funzionale tra i parametri ottenuta tramite simulazione (Wiendahl, 1995). Tali funzioni, spesso note come "curve caratteristiche", riflettono le caratteristiche operative delle unità produttive (Bertrand *et al.*, 1990). Esse dipendono quindi dalle proprietà del processo manifatturiero e del flusso di materiale (i.e. cicli, capacità, flessibilità, tempi di set up, etc), ma anche dalle regole definite nel sistema di pianificazione e controllo della produzione. La fase di rilascio degli ordini acquista dunque enorme rilevanza.

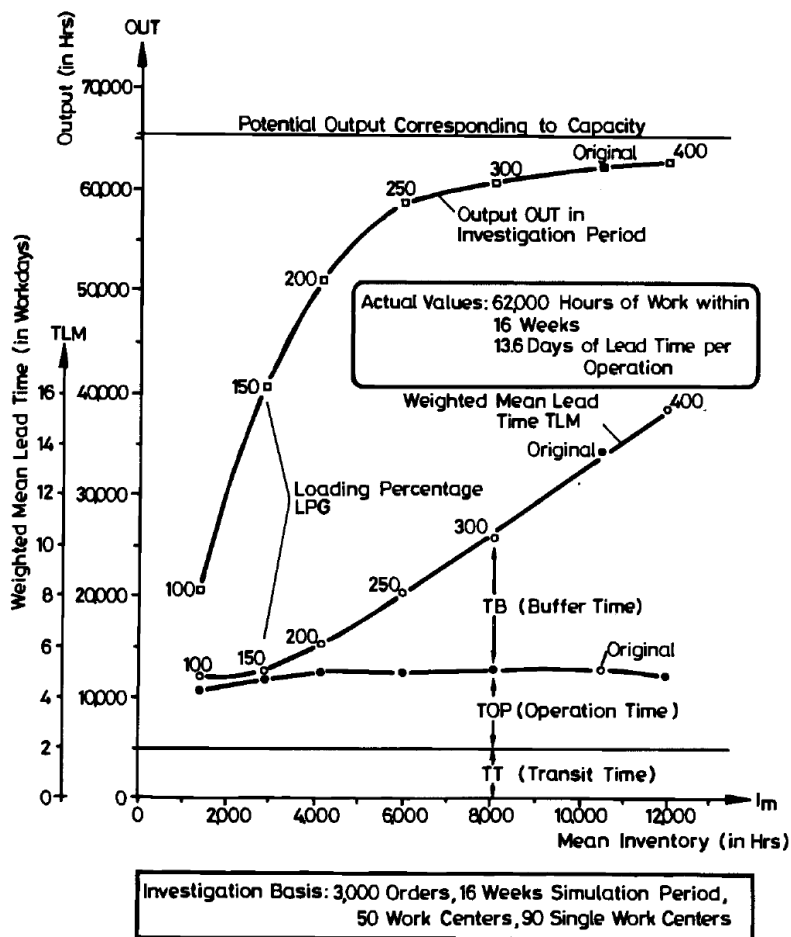


Figura 7 – Curve della produttività e del tempo di attraversamento al variare del work in process. (Wiendahl 1995).

In altre parole, lo scopo del WLC è quello di ottenere una fabbrica “snella”: piuttosto che finire in lunghe code e competere per la capacità delle risorse, gli ordini attendono di essere rilasciati nel “portafoglio ordini” fintantoché il valore del carico di lavoro delle risorse interessate dal ciclo produttivo non raggiunge un valore tale da consentirne il rilascio (Breithaupt *et al.*, 2002). Il portafoglio ordini presenta due peculiarità: (1) da una parte isola la fabbrica dalle continue fluttuazioni nella distribuzione degli ordini in arrivo e (2) dall’altra riduce il costo legato al mantenimento del work-in-process e il ricorso frequente all’expediting degli ordini (Land e Gaalman, 1998; Thurer *et al.*, 2009).

Oggi giorno la domanda è sempre più “sostanziosa”, sia in termini di livello di servizio elevati, che della qualità, che della varietà offerta al cliente. Questo fatto ha via via spostato la competizione sul fattore tempo e sull’offerta di prodotti customizzati. L’essere in grado di stabilire una data di consegna fattibile e che verrà in seguito rispettata già dalle prime fasi di trattativa con il cliente e il poter identificare con adeguato anticipo eventuali colli di bottiglia, rappresentano dei fattori critici. In un tale scenario proprio il controllo

delle code consente di ottenere tempi di attraversamento stabili e di stabilire già in fase di contrattazione con il cliente date di consegna “fattibili ed attendibili”. Ricerche empiriche dimostrano che l’implementazione del WLC comporta una riduzione media del 40-50% del tempo di attraversamento totale medio degli ordini (Bertrand e Van Ooijen, 2002). Tuttavia alcuni studi di carattere simulativo contrariamente ne riportano un incremento (e.g. Kanet, 1988; Fowler *et al.*, 2002; Roderick *et al.*, 1992). La divergenza esistente tra le prestazioni ottenute nelle applicazioni empiriche e quelle ottenute tramite simulazione, nota come *research paradox* (Kanet, 1988; Melnyk e Ragatz, 1989), potrebbe risiedere nel fatto che queste ultime non considerano il decremento di produttività legato all’incremento della congestione del reparto all’aumentare del Work-in-Process; questo è un fenomeno tipico nei sistemi manifatturieri (Bertrand e Van Ooijen, 2002).

A partire dagli anni 80, in tre città differenti, Eindhoven (e.g. Bertrand e Wortmann, 1981), Hannover (e.g. Bechte 1988, Wiendahl) e Lancaster (e.g. Kingsman *et al.*, 1989) vennero sviluppati in maniera indipendente tre metodi per la gestione ed il controllo del carico noti in letteratura con l’acronimo di WLC. Il modello di simulazione presentato in questo lavoro farà riferimento proprio a questi metodi, valutandone i principali parametri di funzionamento in un sistema manifatturiero locale.

Il framework generale del WLC presenta una struttura gerarchica a tre livelli di controllo legati alle fasi di avanzamento dell’ordine, in accordo con quanto riportato da Bergamaschi *et al.* (1997) circa le tecniche di Order Review and Release. Il metodo LUMS, sviluppato nel corso degli anni all’università di Lancaster, introduce inoltre un quarto livello, noto come Customer Enquiry Stage (A1), relativo alla fase di negoziazione dell’ordine con il cliente (Figura 8).

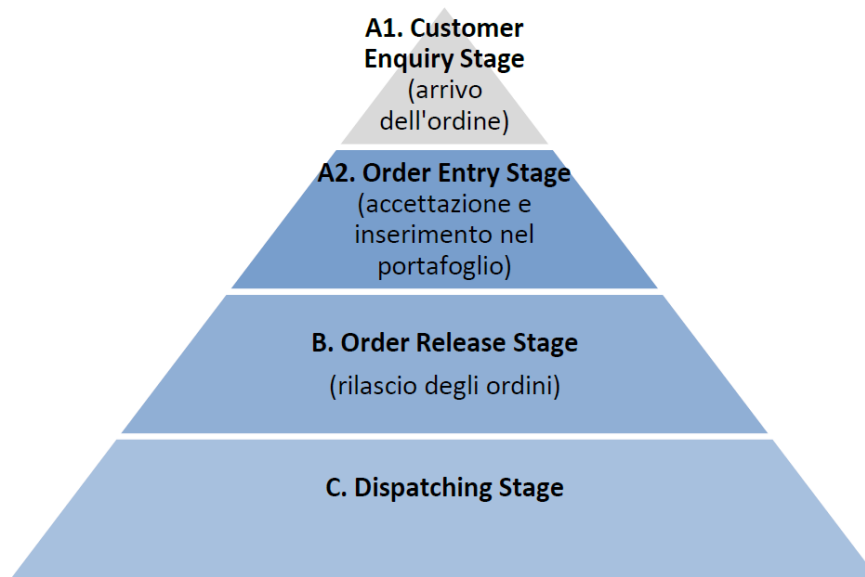


Figura 8 - Struttura gerarchica del WLC

La Figura 9 mostra le tre fasi fondamentali del flusso degli ordini:

- Ingresso (Entry);
- Rilascio (Release);
- Dispatching.

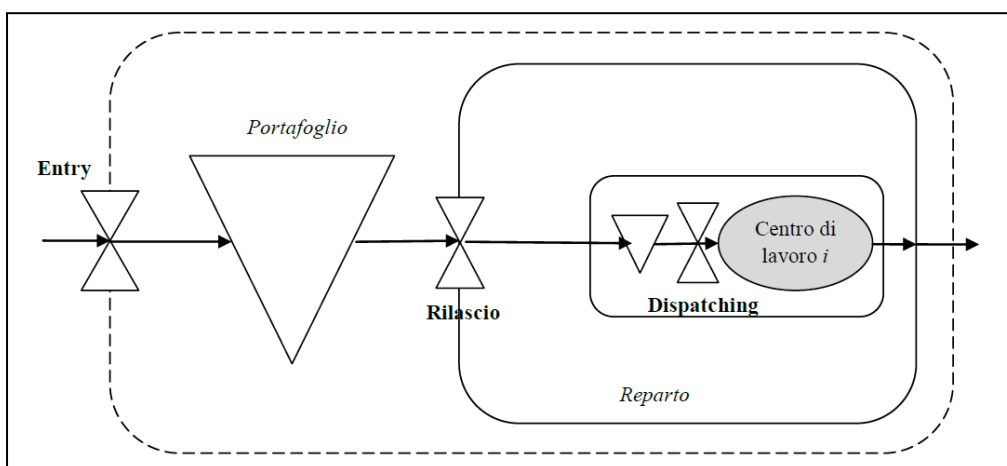


Figura 9 - Step principali nel flusso di un ordine.

Il controllo del carico nella fase di inserimento dell'ordine (*Order Entry Level*) si esplica attraverso la decisione di accettare o meno l'ordine; l'accettazione genera un certo carico di lavoro per il sistema produttivo. Una volta accettato l'ordine viene inserito nel portafoglio ordini (*Order Pool*) dove attende per il rilascio; viene quindi definita la data di consegna promessa al cliente e di conseguenza lo slack disponibile per la produzione. Il

valore di quest'ultimo parametro è fondamentale per la pianificazione del fabbisogno di capacità per periodi futuri poiché consente una prima verifica di congruenza tra la capacità produttiva richiesta e quella disponibile. Vincolare il rilascio immediato di alcuni job ha molteplici vantaggi, primo fra tutti la riduzione e il controllo del work-in-process presente in produzione. Il sistema produttivo risulta inoltre meno congestionato e più trasparente; è quindi più agevole identificare le cause di eventuali problemi ed introdurre le opportune azioni correttive. La letteratura sul JIT e sulle filosofie di gestione di origine orientale, descrive ampiamente i benefici ottenibili da un sistema produttivo snello, in cui il ridottissimo livello di materiale in lavorazione consente di attivare istantaneamente opportune azioni correttive. In secondo luogo il tempo che gli ordini trascorrono nel portafoglio antecedentemente al rilascio consente di posticipare alcune decisioni operative; Ciò comporta certamente una riduzione degli sprechi imputabili a ordini cancellati all'ultimo momento, agevola la politica di gestione "al più tardi" delle materie prime e dei codici di acquisto, riduce il ricorso all'*expediting* di ordini urgenti, etc.

Il controllo del carico in produzione avviene invece nella fase di rilascio (*order release level*), che rappresenta il cuore del metodo WLC. L'intervallo di tempo che intercorre tra l'ingresso ed il rilascio permette di svolgere alcune attività di preparazione come ad esempio la verifica della disponibilità dei materiali. Fintantoché non viene rilasciato, un ordine consta solamente di documenti in formato cartaceo o elettronico, senza alcun materiale ad esso legato. Nell'eventualità fosse necessario apportare delle modifiche all'ordine, queste vengono introdotte evitando perdite di materiale e soprattutto senza intervenire direttamente in produzione. Una volta rilasciato l'ordine permane in reparto fino al completamento dell'operazione finale prevista dal ciclo tecnologico. Il rilascio rappresenta quindi l'ultimo istante in cui è possibile intervenire per ottenere un buon bilanciamento tra la capacità richiesta e quella disponibile. La scelta tra diverse regole di dispatching ha un effetto estremamente limitato su questo aspetto. Difatti "*It should be recognized that order release is the last moment one can effectively contribute to a constant direct load. The effectiveness of load-balancing dispatching rules (e.g. Work-In-Next-Queue) after release is limited*" (Land, 2009).

Il meccanismo di rilascio consente di controllare gli input definendo principalmente:

- a) quando rilasciare gli ordini,
- b) quanti ordini rilasciare,
- c) quali ordini rilasciare.

Come nel livello precedente, il controllo dell'output si ottiene attraverso la variazione della capacità produttiva (nel breve periodo), nel caso questo fosse necessario (Land e Gaalman, 1996). La fase di rilascio degli ordini verrà approfondita nei prossimi capitoli. In particolare i capitoli 3 e 4 trattano in modo più esteso il ruolo specifico della fase di rilascio relativamente al metodo WLC.

Una volta che l'ordine è stato rilasciato nel reparto produttivo viene attivato il terzo livello del WLC: il dispatching. La scelta dell'ordine da far avanzare tra quelli disponibili in coda nelle risorse viene presa "localmente" presso ogni centro di lavoro. Le regole di priorità di avanzamento degli ordini note come regole di *dispatching*, consentono di correggere parzialmente eventuali deviazioni createsi tra la situazione pianificata e quella corrente, imputabili ad eventi imprevisi di natura stocastica, come ad esempio guasti dei macchinari, materiali mancanti o danneggiati, assenteismo degli operatori, etc. Le regole di dispatching si differenziano dallo scheduling in quanto quest'ultimo stabilisce in anticipo l'esatta sequenza ed i tempi di inizio delle lavorazioni per ogni ordine su tutte le macchine. Per una disamina delle regole di priorità maggiormente impiegate negli studi presenti in letteratura si rimanda il lettore al capitolo 2.

Alcuni lavori hanno dimostrato che le regole di dispatching hanno un effetto trascurabile sulle prestazioni del sistema quando il livello di work-in-process è mantenuto stabile e limitato (Land e Gaalman, 1996). Tuttavia altri studi hanno evidenziato il contrario. Questo aspetto verrà approfondito nel capitolo 5 introducendo i risultati sperimentali.

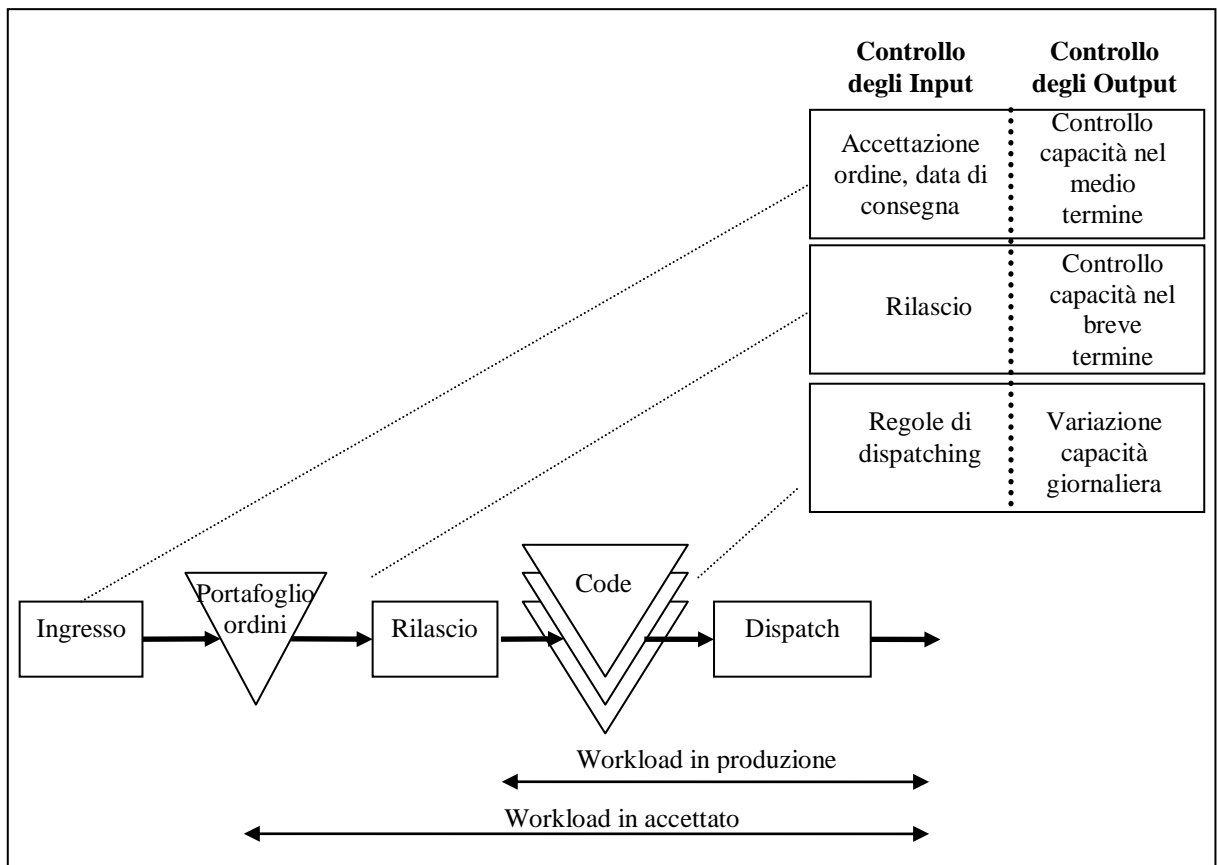


Figura 10 - Controllo dell'input e dell'output nel WLC.

Oltre ai tre livelli fin qui presentati, alcuni ricercatori hanno introdotto un livello ulteriore noto come *Customer Enquiry Stage*. In fase di contrattazione con il cliente, prima di accettare l'ordine ed inserirlo nel portafoglio, viene fatta una verifica preliminare di capacità. Un parametro noto come *strike rate* o *bidding rate*, ossia la percentuale di ordini effettivamente confermati da un dato cliente, prende parte nella determinazione della capacità produttiva richiesta nei periodi futuri (Kingsman *et al.*, 1993; Tatsiopoulos, 1983; Kingsman e Mercer, 1997). “At the customer enquiry stage, a prospective customer will invite a number of potential suppliers to provide a tender for a particular job specification, perhaps including the design process” (Stevenson *et al.*, 2006). Una review strutturata sul tema del bidding in fase di contrattazione con il cliente è fornita da Easton e Moodie (1999).

In ogni livello della struttura del WLC viene deciso (1) quale ordine può proseguire verso il livello successivo (*Input Control*) e (2) se è necessario intervenire modificando la capacità del sistema (*Output Control*) (Figura 10).

Ad un livello molto generale, l'intervallo di tempo trascorso dall'ordine nel portafoglio è detto *pool time* dell'ordine, mentre l'intervallo di tempo che intercorre tra completamento dell'ordine e il suo rilascio è detto *Shop Floor Throughput Time* o più brevemente *Shop Floor Time* (Figura 11). Il shop floor time dell'ordine può essere suddiviso in sottointervalli, relativi al tempo di lavorazione nei centri di lavoro, detti *Station Throughput Times*.

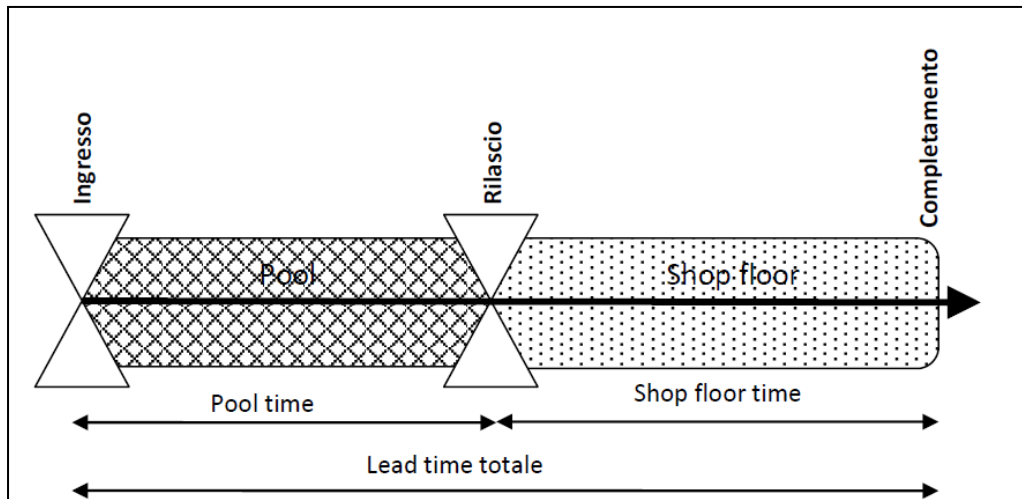


Figura 11 -- Tempi dell'ordine.

3.1 Definizioni generali

Si introducono brevemente alcune definizioni che sono funzionali all'inquadramento del tema specifico.

3.1.1 Le componenti dei lead times

E' stato più volte sottolineato che la valutazione ed il controllo dei lead time sono tra le funzioni principali dei sistemi di pianificazione e controllo della produzione ed in particolar modo del WLC. Tuttavia il lead time è un concetto generale che può essere specificato ad un livello di dettaglio maggiore. Una prima distinzione possibile riguarda i valori *pianificati* e valori *effettivi* o a consuntivo. Il lead time pianificato è assegnato all'ordine in funzione del ciclo tecnologico dei prodotti (ad esempio il tempo che viene inserito nelle tabelle per il funzionamento dell'algoritmo MRP e CRP), mentre quello effettivo è il tempo di attraversamento misurato a consuntivo. Quest'ultimo tiene conto quindi dello stato contingente del reparto, delle deviazioni dallo standard e delle disruption verificatesi. In letteratura si possono trovare diverse classificazioni delle componenti dei lead time a seconda delle applicazioni pratiche. Di seguito si farà riferimento alla classificazione data da Wiendahl (1995), riportando la terminologia originale.

Il *Throughput Time* di un ordine o *Order Throughput Time* o ancora *Order Lead Time* (lead time dell'ordine) è il tempo che un ordine impiega per attraversare l'intero sistema produttivo. Il tempo richiesto per una singola operazione è invece l'*Operation Lead Time* (lead time dell'operazione). La Figura 12 mostra le componenti del lead time dell'ordine.

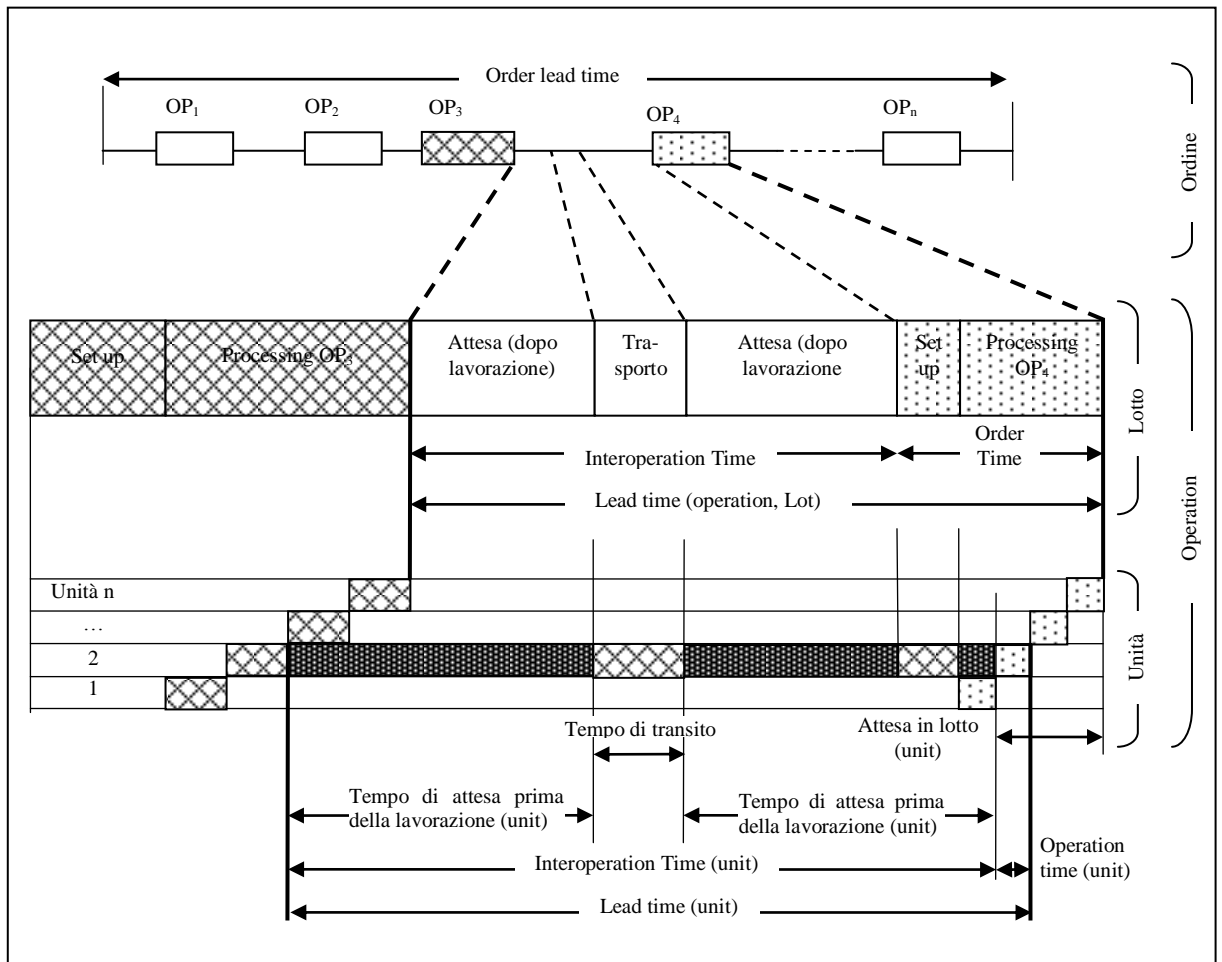


Figura 12 - Componenti del lead time dell'ordine e del lotto (Wiendahl, 1995).

Dalla Figura 12 si possono identificare tre livelli differenti:

- I. livello dell'ordine (*Order Level*);
- II. livello operativo (*Operational Level*);
- III. livello di singola unità (*Single Unit Level*)

Nel livello dell'ordine si possono distinguere le singole operazioni, eseguite nei centri di lavoro, che nel caso specifico presentato in figura vanno da OP_1 ad OP_n . Il lead time di ogni operazione è a sua volta composto di cinque componenti, relative al livello operativo (Operation level), ovvero:

- Tempo di attesa dopo la lavorazione,
- Tempo per il trasporto,
- Attesa prima della lavorazione,
- Tempo di set-up (eventuale),
- Tempo di lavorazione.

La somma delle prime tre componenti (tempo di attesa dopo la lavorazione, tempo per i trasporti e attesa prima della lavorazione) rappresenta l'*Interoperation Time*. Nel modello presentato in Figura 12, sia il tempo di attesa dopo lavorazione in un centro a monte che il tempo di trasporto sono assegnati al centro a valle. Tipicamente un ordine è costituito di diverse unità che assieme vanno a formare il lotto di produzione. Il lead time delle n parti caratterizzanti il lotto di produzione può essere suddiviso ulteriormente a livello di singola unità. E' importante far notare che vi è un tempo di attesa aggiuntivo compreso nel tempo di lavorazione del lotto, detto *lot waiting time*. Nei sistemi produttivi di tipo job shop, è comune che le parti dei lotti vengano trasportate congiuntamente e lavorate in successione dalle diverse risorse. Da un punto di vista analitico, in tali contesti è quindi sufficiente fermarsi a considerare l'intero lotto, ossia il livello operativo. Nei sistemi produttivi con funzionamento di tipo *batch* è invece essenziale considerare il lead time delle singole unità o dei sottolotti, poiché il tempo di lavorazione è tipicamente maggiore dell'*interoperation time* (vi è inoltre l'esigenza di coordinare l'*overlapping* tra operazioni successive). Nella Figura 14 viene schematizzato il tempo di attraversamento dell'ordine nel reparto produttivo. Un'operazione inizia al tempo t_{PEU} (Process End at Upstream work centre) e termina al tempo t_{PE} (Process End Time).

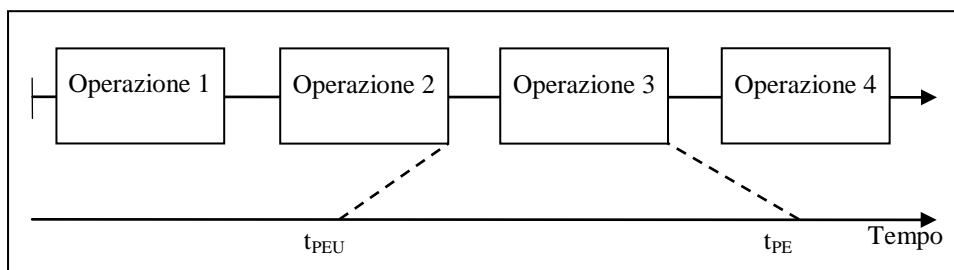


Figura 14 – schematizzazione dell'Order Throughput.

Il tempo t_{PEU} non caratterizza l'arrivo fisico dell'ordine nel centro di lavoro, ma indica l'istante in cui questo viene completato nella stazione a monte. La rappresentazione grafica del lead time del centro di lavoro è detta *throughput element*. La Figura 15 mostra il throughput element di un'operazione e i vari tempi che lo compongono.

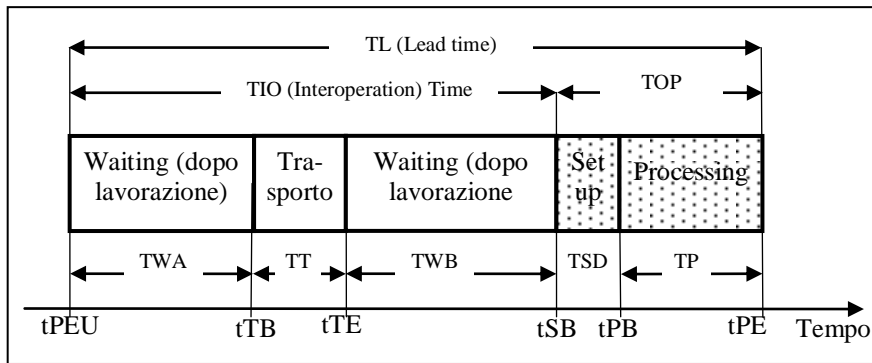


Figura 15 – Throughput element di un centro di lavoro

Riprendendo e schematizzando nuovamente i principali eventi che caratterizzano il flusso degli ordini si possono identificare i seguenti step:

- *Entry*: accettazione dell'ordine ed inserimento nell'portafoglio ordini;
- *Release*: rilascio degli ordini in produzione ed inizio del flusso manifatturiero;
- *Input*: arrivo al centro di lavoro;
- *Output*: partenza dal centro di lavoro, completamento della fase di lavoro;
- *Exit*: completamento dell'ordine, fine del flusso manifatturiero.

La Figura 16 riporta queste fasi congiuntamente alle diverse componenti del lead time. Il tempo di attraversamento totale è dato dalla somma del tempo di attraversamento del reparto e di quello speso nel portafoglio ordini.

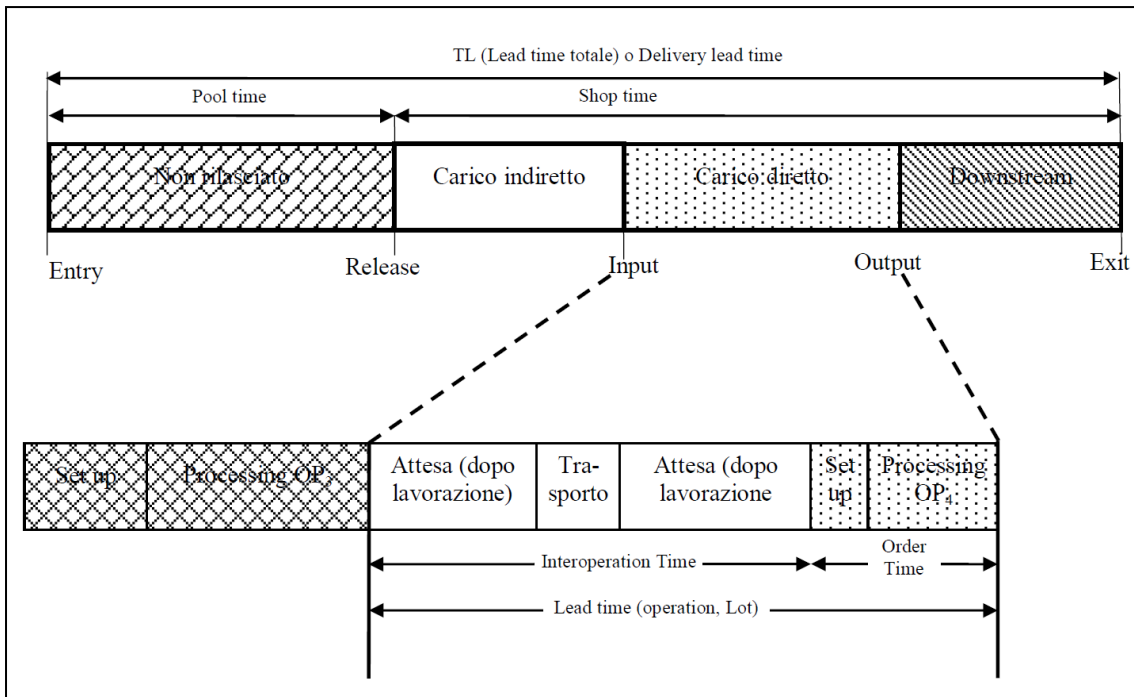


Figura 16 - Step principali caratterizzanti il flusso dell'ordine e relativi lead time.

3.2 Stima della data di consegna e di rilascio

In questa parte verrà presentato il metodo utilizzato per la stima della data di consegna e di rilascio. Come introdotto in precedenza, affinché un ordine venga rilasciato devono sussistere le seguenti due condizioni:

1. L'ordine è urgente (la data di rilascio pianificata è compresa nel time limit);
2. L'ordine non contravviene alle regole definite per il rilascio.

Tuttavia per definire se un ordine è urgente è indispensabile stabilire una data di rilascio pianificata. Quando l'ordine i perviene, la sua data di consegna prevista (DD_i) viene stimata come:

$$DD_i = ED_i + CCT_i + DLT_i$$

Dove:

- ED_i : Data di arrivo dell'ordine i ;
- CCT_i : tempo previsto per la conferma dell'ordine i (è ottenuto da dati storici o imposto dal pianificatore). In questa tesi, come in molti casi pratici questa componente viene ignorata.
- DLT_i (Delivery lead time). È il tempo che intercorre dall'accettazione dell'ordine i al suo completamento. Più in dettaglio:

$$DLT_i = MatLT_i + PD_p + \sum_{k=1}^n LT_{i,k}$$

dove:

- $MatLT_i$: tempo medio per l'approvvigionamento dei materiali non disponibili in produzione o a magazzino. In presenza di più materiali è pari al tempo di approvvigionamento maggiore. Questo include il lead time di sicurezza.
- PD_p : tempo medio di attesa nel portafoglio ordini per ordini con priorità p .
- $LTM_{i,k}$: lead time medio per il centro di lavoro k relativamente all'ordine i

$$LT_{i,k} = (PT_{i,k} * Q_i + t_{set-up\ i,k} + QT_{i,k} + Tt_{i,k} + InspT_i)$$

Dove:

- $PT_{i,k}$: tempo di lavorazione unitario del codice i sulla risorsa k ;
- Q_i : dimensione lotto i ;
- $t_{set\ up\ i,k}$: tempo di set-up dell'ordine i sulla risorsa k ;
- $QT_{i,k}$: tempo di coda medio dell'ordine i sulla risorsa k ;
- $Tt_{i,k}$: tempo di trasporto dell'ordine i alla risorsa k ;
- $InspT$: tempo di ispezione (eventuale) dell'ordine i ;

Le varie componenti sono identificabili visivamente nella Figura 17.

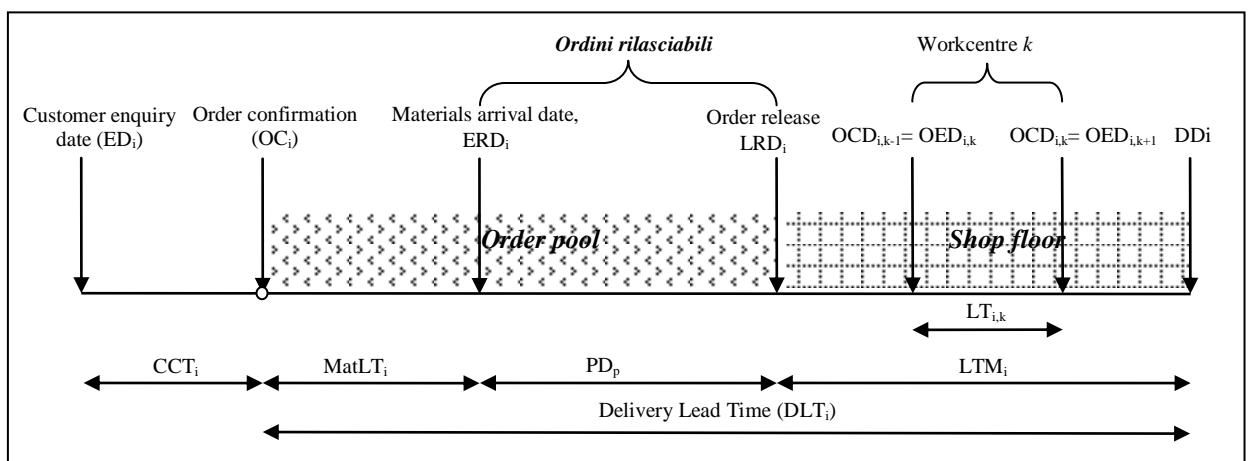


Figura 17 – Lead time dell'ordine.

Per definire la data di rilascio al più tardi (Latest Release Date - LRD) viene effettuata una schedulazione all'indietro utilizzando i lead time standard partendo dalla data di consegna dell'ordine stimata. LRD rappresenta l'ultima data di rilascio utile affinché la DD venga rispettata. Dalla Figura 17 si possono facilmente ricavare le seguenti relazioni:

$$OCD_{i,n} = DD_i$$

Ossia la data di completamento dell'ultima operazione ($OCD_{i,n}$) coincide con quella di completamento dell'ordine. Inoltre:

$$OCD_{i,k-1} = OCD_{i,k} - LT_{i,k}$$

$$LRD_i = OCD_{i,1} - LT_{i,1}$$

$$ERD_i = OC_i + MatLT_i$$

Dove:

- $OCD_{i,k}$ (Order Completion Date). È la data di completamento dell'operazione k dell'ordine i .
- ERD_i (Early Release Date). È la prima data in cui l'ordine i è rilasciabile.
- LRD_i (Latest Release Date). È la data al più tardi per il rilascio dell'ordine i affinché la DD_i possa essere rispettata.
- $LT_{i,k}$ è il lead time medio per l'ordine i nel centro k .

3.3 Aspetti legati al load bounding e al load accounting

Le tecniche di "esamina e rilascio" degli ordini (ORR) sono utilizzate nei sistemi di Workload Control per determinare quali ordini devono essere rilasciati in produzione e in quale momento. In letteratura numerosi lavori propongono una review di tali tecniche (i.e. Philipoom *et al.* 1993, Wisner 1995, Bergamaschi *et al.* 1997, Sabuncuoglu e Karapinar 1999). Seguendo la classificazione dei meccanismi di Order Review e Release proposta da Bergamaschi *et al.* (1997), due tra le dimensioni più importanti nella fase di rilascio sono:

- I. il metodo utilizzato per calcolare il carico di lavoro nel tempo (*Workload Accounting Method*);
- II. la modalità con cui viene limitato il carico di lavoro nei vari centri (*Workload Bounding Method*).

3.3.1 Il metodo per il Workload accounting

All'interno del WLC, gli approcci base di contabilizzazione del carico di lavoro degli ordini nel tempo sono essenzialmente tre:

1. *Approccio Time Bucketing* (i.e. Bobrowski, 1989). L'orizzonte di pianificazione viene diviso in più periodi di carico detti *load period* o *time buckets*. Partendo dalla prima o dell'ultima operazione nel ciclo dell'ordine, attraverso una schedulazione a capacità finita in avanti o all'indietro rispettivamente, viene stimato un parametro detto *flow time estimator*. Questo determina in che intervallo di tempo ogni operazione prevista dall'ordine richiederà la relativa capacità produttiva in ogni risorsa secondo il ciclo tecnologico. Se in un certo periodo la capacità della macchina è disponibile per l'intero tempo di lavorazione richiesto, allora l'operazione viene assegnata alla macchina in quello specifico intervallo di tempo e la capacità disponibile viene ridotta conseguentemente. In caso contrario l'operazione è assegnata al periodo più prossimo che ha una sufficiente capacità disponibile. L'approccio time bucketing “*considers the load in transit as load on hand for the future periods, and it tries to compute the exact time period when each operation will be performed by each machine centre for each job to be processed in the system. Consistently, the workload thresholds for the time buckets are set to a value that usually equals the total capacity of the considered workcentre over the specific time period*” (Cigolini *et al.*, 1998). L'approccio time bucketing non verrà impiegato nel modello simulativo presentato in questo lavoro.
2. *Approccio probabilistico* (Probabilistic Approach). È impiegato all'interno del metodo noto come LOOR (Load Oriented Order Release). Sviluppato ad Hannover, è principalmente il risultato degli studi di Becthe (1988, 1994) e Wiendahl (1990, 1995, 1996). Se confrontato con il Time Bucketing, l'approccio probabilistico si focalizza solamente sul primo periodo dell'orizzonte di pianificazione: “*It does not try to determine the time period when each operation will be performed. Rather, it estimates the probability that each job will be processed by each machine centre required by its routing within the current planning period*” (Cigolini *et al.*, 1998). Il carico in transito è calcolato utilizzando un algoritmo noto come *Load Conversion*. Questo consente di calcolare, per ogni ordine che giace in coda in un centro di lavoro a monte, la probabilità di raggiungere la stazione considerata entro il periodo di pianificazione corrente detto anche *planning period*. Quindi il carico atteso è calcolato moltiplicando il tempo di lavorazione per la corrispondente probabilità di raggiungere il centro considerato entro il periodo di pianificazione. Secondo Knolmayer (1991) la criticità

principale di tale approccio è legata al fatto che “*it neglects the order influences after the planning period*”. Elementi chiave e criticità dell’approccio probabilistico verranno approfonditi alla fine del presente capitolo.

3. *Approccio aggregato o atemporale*. Questo approccio attribuisce il carico di lavoro di un ordine ai centri di lavoro interessati all’istante del rilascio, senza considerare la sequenza del ciclo tecnologico, ossia incurante della sequenza con cui l’ordine raggiunge le risorse (i.e. Bertrand e Wortmann, 1981; Tatsiopoulos, 1983; Hendry, 1989; Hendry e Kingsman, 1991; Kingsman, 2000; Kingsman e Hendry, 2002; Stevenson, 2006; Stevenson e Hendry, 2006). Il carico di lavoro include sia il carico diretto che quello indiretto, senza distinzione tra i due. Alcune ricerche di natura simulativa hanno evidenziato che l’approccio aggregato non è il più efficace nel controllo del carico (i.e. Perona e Portioli 1998, Oosterman *et al.* 2000), soprattutto se impiegato in sistemi con una struttura produttiva ed un flusso di materiali assimilabile ad un *pure job shop*.

Gli approcci *Extended* e *Corrected Aggregate Load* rappresentano delle modifiche e delle estensioni a quello aggregato che puntano a ridurre alcune criticità. Secondo Oosterman *et al.* (2000) il carico aggregato di un centro di lavoro deve essere corretto tenendo conto della specifica posizione che questo occupa all’interno del ciclo tecnologico dell’ordine: “*The underlying idea is that the aggregate load of a work centre should be corrected for the variable position of this work centre within the routings of released orders. The applied correction is such that the adjusted aggregate load of a work centre can be seen as an estimate of its future direct load*”. Aspetti legati all’approccio aggregato e aggregato modificato saranno approfonditi nel proseguimento di questo lavoro.

3.4- Contabilizzazione del carico

Nel Workload Control si riconosce che nei sistemi manifatturieri di tipo job shop gli ordini in coda si trovano inevitabilmente a competere per la capacità della stessa risorsa. Come già illustrato in precedenza il WLC ha l’obiettivo di mantenere il livello delle code limitato e stabile; Ciò equivale al controllo del carico diretto. Il carico di lavoro di ogni risorsa può essere suddiviso fondamentalmente in tre contributi:

- il *carico diretto* o *direct workload*, imputabile agli ordini in coda ed in lavorazione nella risorsa considerata, e

- il *carico indiretto* o *indirect workload* o *upstream load*, imputabile agli ordini in coda e in fase di lavorazione nelle risorse a monte;
- Il *carico non rilasciato* contenuto nel portafoglio ordini. Questo contributo si può anche considerare appartenente al carico indiretto.

Con riferimento alla Figura 18 introduciamo ora la seguente simbologia:

- $C_{k,t}^D$: è il carico diretto del centro k all'istante t di rilascio;
- $C_{k,t}^I$: è il carico indiretto del centro k all'istante t di rilascio;
- $C_{k,t}^A = C_{k,t}^D + C_{k,t}^I$: è il carico aggregato per il centro k all'istante t di rilascio, dato dalla somma del carico diretto e indiretto;
- $(C_{k,t}^P)$: è il carico di lavoro presente nel portafoglio ordini al istante t ;
- $(C_{k,t}^V)$: è il carico di lavoro già processato dal centro k , ma ancora presente nel reparto al istante t .

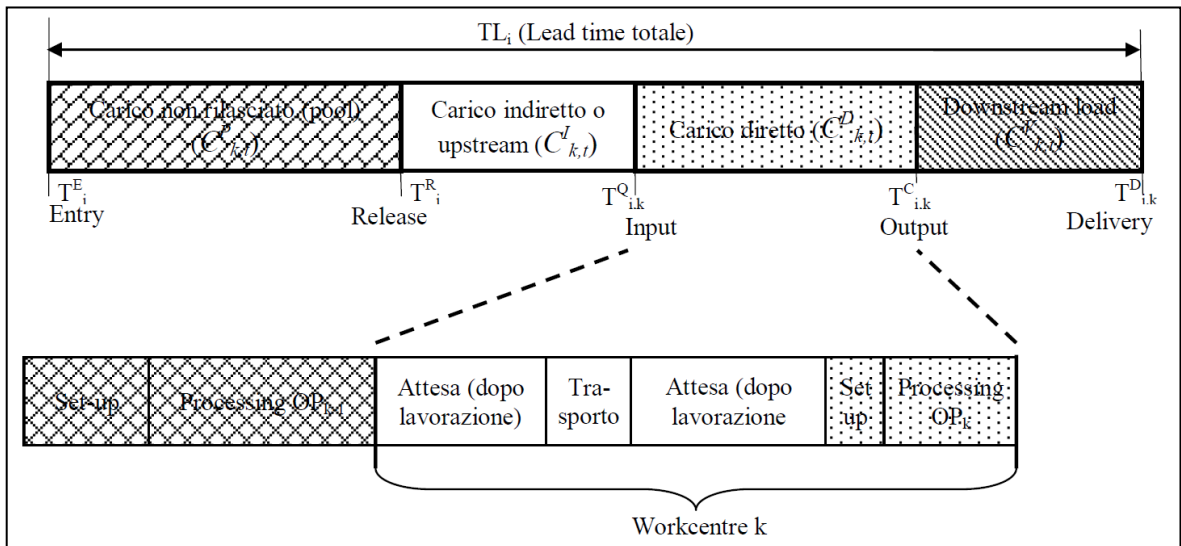


Figura 18 - Contributi del carico di lavoro.

Purtroppo è piuttosto difficile stimare l'esatta influenza del rilascio di un ordine sul carico diretto. Esaminiamo ora il problema con maggiore dettaglio prendendo come esempio il centro di lavoro k riportato in Figura 19. Una volta rilasciati, solamente una parte degli ordini pervengono direttamente a tale centro. All'istante del rilascio t , solamente i job che prevedono la prima operazione del ciclo tecnologico sul centro k contribuiscono al carico diretto ($C_{k,t}^D$). Un altro contributo al carico diretto nell'istante t è dovuto agli ordini che saranno in coda al centro k che provengono da risorse poste a monte, dove hanno già completato le lavorazioni previste dal ciclo tecnologico. I job che non

hanno ancora terminato le lavorazioni nei centri a monte contribuiscono al carico indiretto del centro (Figura 19).

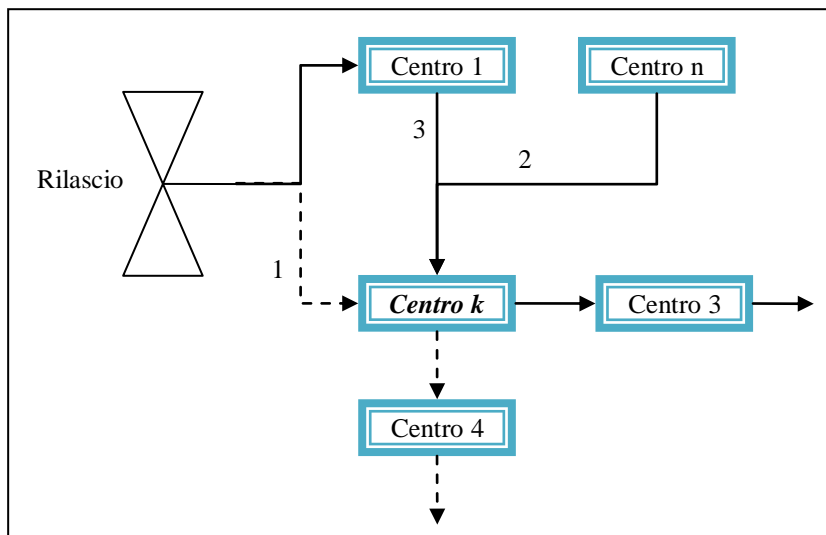


Figura 19 – Input al carico diretto del centro k .

La Figura 19 esemplifica quanto appena esposto raffigurando un sistema produttivo composto da quattro centri di lavoro. Parte carico diretto del centro k è generato *direttamente* dal rilascio dell'ordine (freccia 1), mentre la restante parte del carico diretto proviene dalle risorse a monte dove sono terminate le relative operazioni (freccie 2 e 3).

Come presento nella sezione precedente, in questo lavoro sono considerati due approcci di contabilizzazione del carico di lavoro.

- A. *Probabilistico*. L'approccio LOOR utilizza un metodo conosciuto come *Load Conversion Method* letteralmente metodo di conversione del carico, per stimare il carico di lavoro, proveniente dai centri a monte, che si trasformerà in carico diretto per il centro k durante il periodo di rilascio T . La somma di tale valore e del carico diretto già presente nel centro k nell'istante di rilascio t , viene confrontato con il limite di carico di progetto.
- B. *Aggregato*. L'approccio aggregato evita la stima del carico diretto previsto in nel periodo di rilascio T al centro k . Il carico diretto C_{kt}^D e indiretto C_{kt}^I di ogni risorsa nell'istante t di rilascio vengono sommati, ottenendo il valore aggregato C_{kt}^A . Il valore di C_{kt}^A viene confrontato con il limite di carico definito.

Per illustrare la differente natura dei due approcci, si farà riferimento ad un formalismo che può essere interpretato come una sorta di equazione di continuità dei carichi.

Carico diretto e aggregato

L'equazione di continuità del *carico diretto* durante il periodo di rilascio T [t', t''] è data da:

$$C_{kt'}^D + I_{kT} = C_{kt''}^D + O_{kT}$$

Dove:

- $C_{kt'}^D$: carico diretto della risorsa k alla fine del periodo di rilascio precedente (T-1);
- I_{kT} : input al carico diretto del centro k , ossia il carico diretto in arrivo nel periodo T;
- $C_{kt''}^D$: carico diretto (coda) del centro k alla fine del periodo di rilascio T;
- O_{kT} : output della risorsa k , ossia lavoro completato in T.

Osservando l'equazione riportata sopra, possiamo notare che all'istante t di rilascio solamente il carico diretto iniziale $C_{kt'}^D$ è noto. Per raggiungere il livello del carico diretto prestabilito alla fine del periodo T, è necessario stimare il carico I_{kT} in input e quello O_{kT} in uscita dalla risorsa k . L'input I_{kT} , ossia il carico diretto del centro k nel periodo T, è dovuto al carico presente nei centri di lavoro a monte prima e successivamente al nuovo rilascio, rispettivamente C_{kt}^P e I_{kT} .

L'equazione di continuità per il *carico aggregato* è invece la seguente:

$$(C_{kt'}^D + C_{kt'}^I) + I_{kT}^A = (C_{kt''}^D + C_{kt''}^I) + O_{kT}$$

Oppure raggruppando alcuni termini:

$$C_{kt'}^A + I_{kT}^A = C_{kt''}^A + O_{kT}$$

Dove:

- $C_{kt'}^I$: carico indiretto del centro k alla fine del periodo di rilascio precedente (T-1);
- I_{kT}^A : input al carico aggregato per il centro k , ossia il carico rilasciato nel periodo T;
- $C_{kt''}^I$: carico indiretto del centro k alla fine del periodo T;
- O_{kT} : output del centro k , i.e. il lavoro completato nel periodo T;
- $C_{kt'}^A$: carico aggregato del centro k alla fine del periodo di rilascio precedente (T-1);
- $C_{kt''}^A$: carico aggregato del centro k alla fine del periodo di rilascio T.

Notiamo che tutte le variabili presenti a primo membro dell'equazione sono note subito dopo il rilascio. Tutti gli input al carico aggregato si verificano nel momento del rilascio t ,

quindi il rilascio degli ordini definisce univocamente il valore di I_{kT}^A . La Figura 20 esemplifica quanto appena presentato. Data l'equazione di continuità del carico, l'incertezza del valore del carico aggregato ($C_{kt'}^A$) alla fine del periodo T è dovuta dall'incertezza dell'output alla risorsa nel periodo T, O_{kT} .

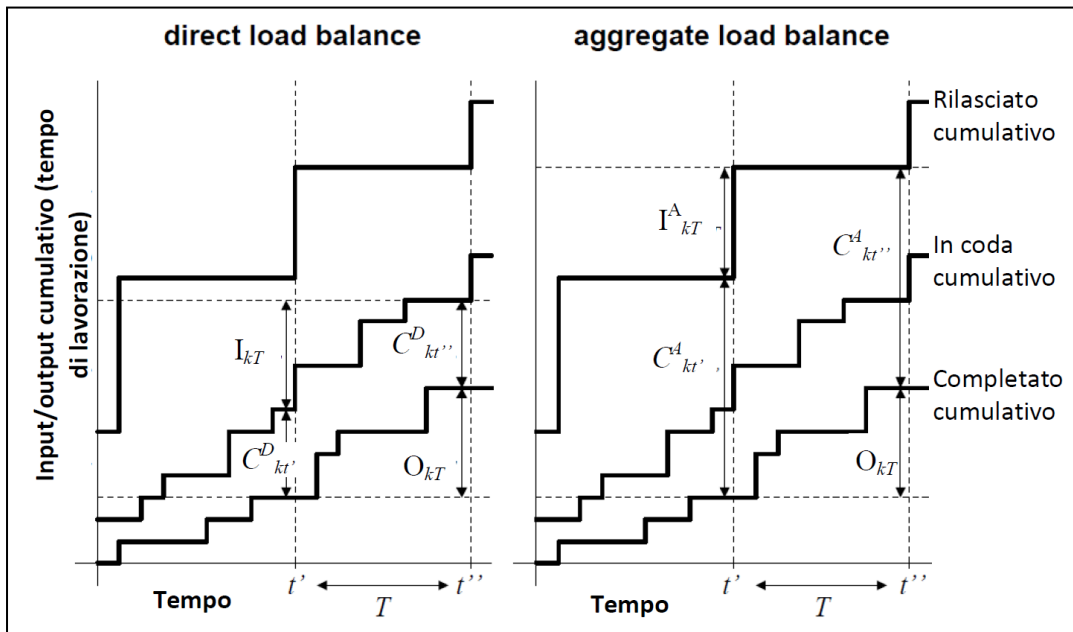


Figura 20 – Carico aggregato e carico diretto.

Come conseguenza di quanto appena presentato, l'utilizzo di limiti di carico per l'approccio aggregato non richiede una previsione dell'input nel periodo T. Il rilascio di nuovi ordini nella risorsa k è consentito fintantoché il primo membro dell'equazione di continuità del carico aggregato non raggiunge il limite stabilito (parte destra delle Figura 21). Di conseguenza il limite di carico è pari alla somma del livello desiderato del carico alla fine del periodo di rilascio e dell'output pianificato.

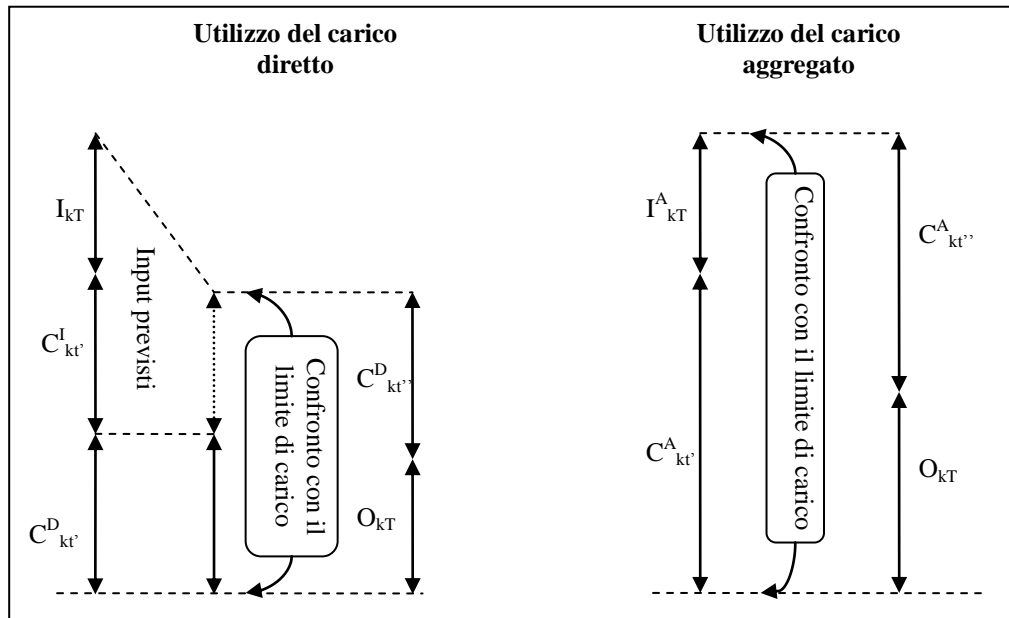


Figura 21 – Utilizzo dei limiti di carico nell’approccio aggregato e diretto.

L’equazione del carico diretto mostra chiaramente che l’impiego di limiti per il carico diretto richiede una procedura di rilascio più sofisticata. In modo analogo al carico aggregato, il limite di carico è pari alla somma del livello desiderato del carico diretto alla fine del periodo di rilascio e dell’output pianificato. Tuttavia il primo membro dell’equazione non può essere sottoposto a limiti di carico: in questo caso è necessario infatti stimare il carico diretto dovuto sia a quello già presente nei centri a monte (*upstream load*) che ai nuovi rilasci e confrontarlo con il limite imposto (parte a sinistra Figura 21). E’ chiaro quindi come la procedura di *load accounting* attraverso il carico diretto è molto più complesso rispetto l’utilizzo di quello aggregato. L’università di Hannover ha sviluppato un metodo, noto come *Load Conversion*, per stimare gli input al carico diretto (Bechte, 1980). La somma del carico diretto e di quello stimato in arrivo è detto *converted load*, e rappresenta il primo membro dell’equazione di bilanciamento. Il *Load Conversion* verrà presentato in dettaglio nella parte finale di questo capitolo

Modified Aggregate Workload

Tatsiopoulos (1983) ha proposto una variante del metodo aggregato. In accordo con quanto appena presentato, il carico di lavoro di ogni operazione viene detratto al momento del suo completamento, senza distinzione tra carico diretto o indiretto. Ciò significa che sia l’utilizzo di limiti di carico diretto che indiretto richiede dei feedback continui sullo stato di completamento di ogni operazione prevista dal ciclo tecnologico. Per eliminare tale

criticità Tatsiopoulos (1983), partendo dal metodo originale sviluppato a Lancaster, estende il significato di carico aggregato introducendo una nuova misura che egli definisce *shop load* (C_{kt}^F). Il metodo che ne risulta è noto come *Modified Aggregate Workload*, dove il *shop load* di ogni risorsa viene sottoposto al limite di carico di progetto. Il *shop load* di un centro di lavoro, a differenza del carico aggregato, include anche il lavoro già completato dalla risorsa, ma ancora in fase di lavorazione nelle stazioni a valle. In formula:

$$C_{k,t}^F = C_{k,t}^D + C_{k,t}^I + C_{k,t}^V$$

Ciò significa che un job contribuisce al $C_{k,t}^F$ di una risorsa fintantoché non vengono completate tutte le operazioni previste dal ciclo tecnologico. Il punto di forza dell'approccio aggregato modificato sta nella riduzione del numero di informazioni richieste: nell'istante del rilascio t anziché conoscere le singole operazioni completate, è sufficiente conoscere quali sono gli ordini completati.

Il carico di un job viene imputato a tutte le macchine previste nel ciclo tecnologico all'istante di rilascio (T_i^R), mentre viene rimosso una volta che l'ordine è completato (T_i^C) (Figura 20). Entrambi gli istanti considerati non si riferiscono a nessun centro di lavoro in particolare. In questo caso l'equazione di continuità del *shop floor load* è:

$$(C_{kt'}^D + C_{kt'}^I + C_{kt'}^V) + I_{kT}^A = (C_{kt''}^D + C_{kt''}^I + C_{kt''}^V) + O_{kT}$$

Oppure:

$$C_{kt'}^F + I_{kT}^A = C_{kt''}^F + O_{kT}^P$$

Dove:

- O_{kT}^P : è il carico completato dal centro k che ha lasciato il reparto nel periodo T ;
- $C_{kt'}^F$: *shop load* del centro k al momento del rilascio;
- $C_{kt'}^D$: carico diretto del centro k alla fine del periodo di rilascio precedente;
- $C_{kt'}^I$: carico indiretto del centro k alla fine del periodo di rilascio precedente;
- I_{kT}^A : input al carico aggregato per il centro k , ossia il carico rilasciato nel periodo T ;
- $C_{kt''}^D$: carico diretto del centro k alla fine del periodo T ;
- $C_{kt''}^I$: carico indiretto del centro k alla fine del periodo T ;
- O_{kT} : output del centro k , i.e. il lavoro completato nel periodo T ;
- $C_{kt'}^A$: carico aggregato del centro k alla fine del periodo di rilascio precedente;
- $C_{kt''}^A$: carico aggregato del centro k alla fine del periodo di rilascio T .

La riduzione delle informazioni richieste è evidente: per ogni ordine è necessario indicare solamente l'istante in cui questo viene terminato, mentre i singoli centri di non devono fornire alcuna indicazione sullo stato di avanzamento locale. Questa caratteristica riduce drasticamente sia aspetti di carattere gestionale che la complessità della struttura hardware e software impiegata per il monitoraggio degli avanzamenti in produzione.

3.4.1 Controllo del carico

Come presentato nel capitolo 2, relativamente alla classificazione di Bergamaschi *et al.* (1997) per limitare il carico di lavoro possono essere impiegati approcci differenti. In particolare, considerando le due categorie principali, il WLC prevede l'utilizzo di approcci appartenenti al *workload bounding* o al *workload balancing*.

Il *workload bounding* si riferisce ai valori limite che vengono imposti alle code per limitare il carico presso i centri di lavoro. Come già presentato nel capitolo 2 tale parametro può essere definito in termini di limite inferiore (*lower bound*), superiore (*upper bound*) o entrambi (*lower and upper bound*) ed è riferito al periodo compreso tra due rilasci successivi. Il *workload balancing* invece prevede il rilassamento di tali vincoli al fine di assicurare un maggiore bilanciamento globale delle risorse. Il lavoro di Cigolini e Portioli-Staudacher (2002) presenta una procedura di workload balancing che ha come obiettivo quello di determinare il trade-off migliore tra il tasso di utilizzo e il costo di sovraccarico delle risorse. Praticamente, i singoli centri di lavoro possono essere sovraccaricati fintantoché il bilanciamento del carico complessivo dell'intero reparto si riduce. Secondo gli autori il metodo proposto rappresenta la soluzione che fornisce il maggior grado di flessibilità e che consente di rilasciare in maniera il più agevole possibile gli ordini di grandi dimensioni. Fernandes e Silva (2009) propongono un'ulteriore procedura appartenente alla categoria di workload balancing. Entrambe verranno presentate in dettaglio nel capitolo 4 ed implementate nel modello di simulazione.

3.5 Limitazione e valutazione degli ordini nel portafoglio

Come visto in precedenza, esistono differenti meccanismi e procedure per il rilascio degli ordini e diversi metodi di valutazione del carico. Il portafoglio ordini contiene tutti quei job che sono stati accettati e che attendono il rilascio in produzione. È necessario quindi definire un criterio per stabilire qual è l'ordine più urgente che deve essere valutato per primo dalla procedura di rilascio. Difatti, il rilascio di job non urgenti potrebbe portare ad un completamento anticipato, generando al altresì ritardi di altri job. Il metodo

sviluppato ad Hannover (e.g. Wiendahl, 1995) introduce un parametro noto come *time limit o time horizon*, che restringe l'insieme di job rilasciabili presenti nel portafoglio ordini. Il funzionamento è molto semplice: solamente i job che hanno la data di rilascio pianificata contenuta entro dato intervallo sono considerati urgenti. Alcuni ricercatori hanno dimostrato che se non opportunamente gestito, l'impiego di un intervallo di tempo troppo stretto può ridurre l'opportunità di bilanciamento del carico tra le risorse, poiché la procedura di rilascio valuta un numero eccessivamente limitato di ordini. Una volta stabiliti quali sono gli ordini urgenti (poiché la sua data di rilascio pianificata è contenuta nel *time limit*) viene definita una regola di priorità che stabilisce la sequenza di valutazione dei job. A tal proposito i ricercatori hanno impiegato diverse delle regole già presentate per il dispatching nel capitolo 2, come ad esempio l'Earliest Due Date (EDD), il Critical Ratio (CR), etc. Wiendahl (1995) nel suo lavoro utilizza come criterio di priorità la data di rilascio pianificata (PRD).

3.6 LOOR – Load Oriented Order Release

Tra i fattori sperimentali inclusi nel modello di simulazione proposto in tesi questa vi è il metodo di valutazione del carico noto come *load conversion* (Bechte, 1988) più volte fin ora citato. Considerando una risorsa produttiva, la somma del carico diretto e del carico stimato in input è detta *converted load*. Per comprendere pienamente la sua logica di funzionamento verrà prima esaminato il metodo LOOR che al suo interno ne prevede l'implementazione.

La Tabella 13 sotto classifica il metodo LOOR, LUMS e LUMS modificato (Oosterman *et al.*, 2000) secondo le otto dimensioni introdotte dal lavoro di Bergamaschi *et al.* (1997).

Tabella 13 - Classificazione di alcuni modelli di WLC secondo le otto dimensioni di Bergamaschi *et al.* (1997).

Dimensioni	LOOR	LUMS	LUMS modificato
Order release mechanism.	Load limited	Load Limited	Load Limited
Timing convention	Discreto	Discreto	Discreto
Workload measure	Work quantity	Work quantity	Work quantity
Aggregation of workload measure	Per ogni centro	Per ogni centro	Per ogni centro
Workload accounting over time	Probabilistic	Atemporal (aggregate)	Atemporal (aggregate) modificato
Workload control.	Upper bound only	Upper and lower bound	Upper and lower bound
Capacity planning.	Passivo	Passivo	Attivo
Schedule visibility	Limited	Limited	Limited

Il metodo LOOR è governato da tre parametri di funzionamento principali:

- il *periodo di rilascio* (release period);
- l'orizzonte di anticipazione (*time limit* o *anticipation horizon*);
- il *limite di carico* o *load limit* che viene confrontato al converted load.

La decisione di rilasciare o meno un ordine e quale ordine rilasciare è presa periodicamente all'inizio di ogni periodo di rilascio T. Vediamo ora quali sono gli step fondamentali del metodo originale.

Step 1. Tutti gli ordini contenuti nel portafoglio e non ancora rilasciati sono ordinati per data di rilascio pianificata (*Planned Release Date - PRD*) crescente. Quest'ultima viene determinata attraverso una schedulazione all'indietro partendo dalla data di consegna dell'ordine: dalla due date vengono sottratti i lead time standard delle operazioni previste dal ciclo di lavoro. In formula:

$$\text{Planned Release Rate (PRD)} = DD - \sum \text{operation lead time} = DD - \text{order lead time}$$

Tutti gli ordini che hanno la data di rilascio pianificata compresa nel *time limit* vengono etichettati come "urgenti" e quindi diventano candidati per il rilascio. Nell'esempio di Figura 25 l'ordine A non viene considerato per il rilascio in questo periodo poiché la data di consegna non è compresa nel *time limit*. Il *time limit* riduce quindi il numero di ordini rilasciabili per evitarne il rilascio prematuro.

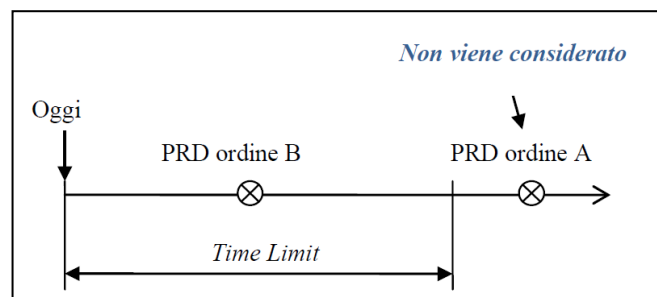


Figura 22 - Ordini compresi nel time limit

Step 2. Attraverso uno specifico algoritmo viene stabilito il contributo di carico di lavoro degli ordini urgenti in ogni stazione. Il *load conversion algorithm* verrà presentato in dettaglio nel prossimo paragrafo.

Gli ordini vengono rilasciati nella sequenza di priorità stabilita fintantoché in un centro non viene superato per la prima volta il limite di carico (load limit -LL) definito; gli ordini rimanenti (contenuti nel portafoglio) che prevedono tale centro nel ciclo tecnologico verranno valutati per il rilascio nel periodo successivo. Il procedimento prosegue considerando tutti gli altri ordini urgenti. Il load limit (e il suo legame con il WIP) determina il tempo di attraversamento medio e le prestazioni del sistema produttivo secondo la nota legge di Little.

Il carico di lavoro diretto calcolato con il metodo probabilistico di conversione del carico viene confrontato con il limite di carico imposto per ogni centro di lavoro in questione (LL). Come già visto in precedenza il limite di carico per il centro k (LL_k) è composto di due componenti: l'output pianificato durante il periodo di rilascio (O_{kT}) e la coda programmata alla fine del periodo di rilascio T (C_{kt}^D). L'output atteso che equivale alla capacità produttiva pianificata della risorsa durante il periodo di rilascio e l'ampiezza della coda al termine del periodo di rilascio devono soddisfare l'equazione di continuità del carico vista in precedenza:

$$C_{kt}^D + I_{kT} = C_{kt}^D + O_{kT}$$

Dove:

- C_{it}^D : carico diretto della risorsa k alla fine del periodo di rilascio precedente ($T-1$);
- I_{kT} =input al carico diretto del centro k , ossia il carico diretto in arrivo nel periodo T ;
- C_{kt}^D : carico diretto (coda) del centro k alla fine del periodo di rilascio T ;
- O_{kT} = output della risorsa k , ossia lavoro completato in T .

Con riferimento alla Figura 23, il carico di lavoro in coda nella risorsa k è rappresentato dal buffer iniziale o *Initial Inventory* o *Leftover Inventory* (ILO), prima indicato come C_{it}^D , mentre la coda pianificata al termine del periodo di riferimento è il *Final Inventory* (Im) o *Planned Mean Inventory*, in precedenza indicato come C_{kt}^D . Tutte le grandezze sono in unità di tempo di lavorazione. L'output medio della risorsa sarà pari alla capacità pianificata per il periodo di riferimento⁹, al netto dell'inefficienza della risorsa.

⁹ Ad esempio $(\text{ore}/\text{giorno}) * \text{giorni}$

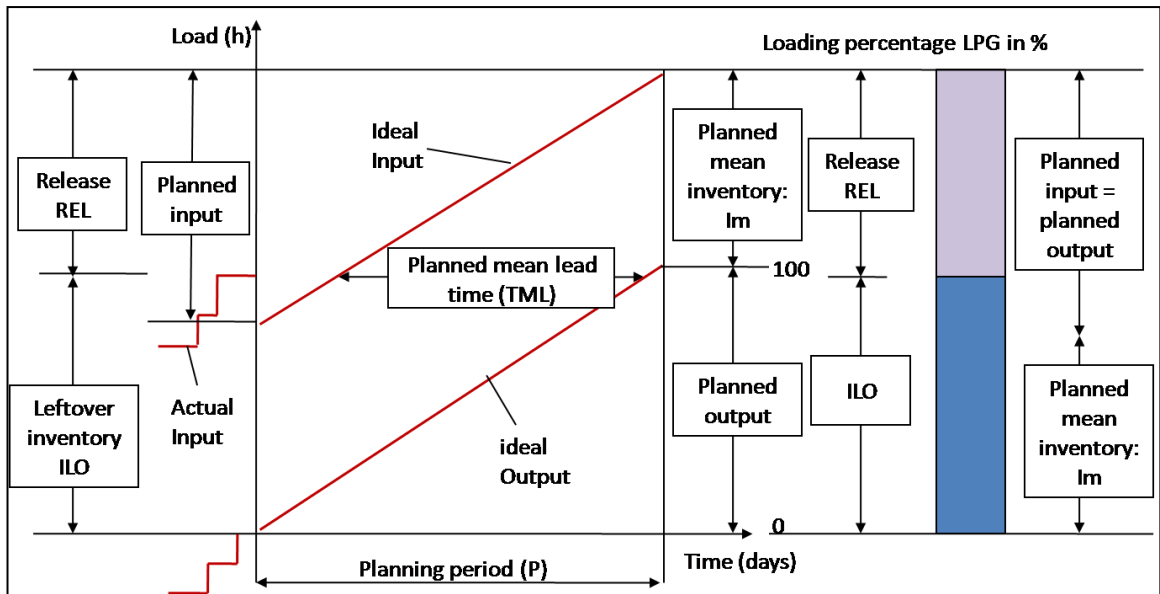


Figura 23 Parametri del throughput diagram per la fase di rilascio dell'ordine in un centro di lavoro

Una volta definite (1) la coda nell'istante di rilascio t , (2) la coda pianificata e (3) la capacità disponibile al termine del periodo di riferimento (misurate ad esempio in ore di lavoro) è possibile stabilire il carico rilasciabile. In altre parole dato un certo livello di WIP^{10} iniziale nella risorsa, è possibile rilasciare solamente un carico pari al limite di carico imposto (LL) al netto della coda iniziale (ILO). Di seguito sono riportati i parametri che caratterizzano il problema generale. Tutti i parametri si riferiscono al centro di lavoro k . Dalla Figura 23:

- LL_k : Load limit o limite di carico per il centro k ;
- T : Planning Period (Periodo di riferimento per il rilascio);
- TML_k : Planned Mean Lead Time (lead time medio);
- OUT_k : Planned Output (capacità pianificata per il centro s nel periodo T);
- INP_k : Planned Input;
- ILO_k : Leftover Inventory (coda presente di fronte al centro k all'istante t di rilascio);
- Im_k : Planned Mean inventory (WIP pianificato al termine del periodo di riferimento);
- LPG_k : Loading Percentage (percentuale di carico del centro di lavoro k).

Osservando la Figura 23 si ha che:

$$TLM_k = \frac{(Im_k * T)}{OUT_k}$$

¹⁰ Work in Process misurato in unità di tempo di lavorazione.

Quindi:

$$Im_k = \frac{TLM_k}{T} * OUT_k$$

Inoltre:

$$ILO_k + REL = Im_k + OUT_k$$

$$LL_k = Im_k + OUT_k$$

Sostituendo:

$$LL_k = \left(\frac{TLM_k}{T}\right) * OUT_k + OUT_k = \left(\frac{T + TLM_k}{T}\right) * OUT_k$$

Normalizzando rispetto la capacità pianificata (OUT_k) per il periodo di riferimento T nel centro di lavoro k si ha:

$$LL_k = 100 * \left(\frac{T + TLM_k}{T}\right)$$

Nell'equazione sopra, il limite di carico rappresenta la percentuale della capacità produttiva pianificata (al netto delle inefficienze) nel periodo di riferimento nel centro k . Nell'istante t la procedura di rilascio incomincia con la misurazione del carico iniziale del centro di lavoro k (ILO_k). Il carico rilasciabile nel periodo di riferimento T è dato dalla differenza tra il carico limite (LL_k) e quello iniziale.

$$\text{Carico rilasciabile nel centro } k = LL_k - ILO_k$$

Nel caso in cui la capacità produttiva è flessibile nel breve periodo si ha che:

$$\text{Capacità richiesta al centro } k = OUT_k = LL_k * \left(\frac{T}{TLM_k + T}\right)$$

La Figura 24 riassume la procedura di rilascio dell'ordine.

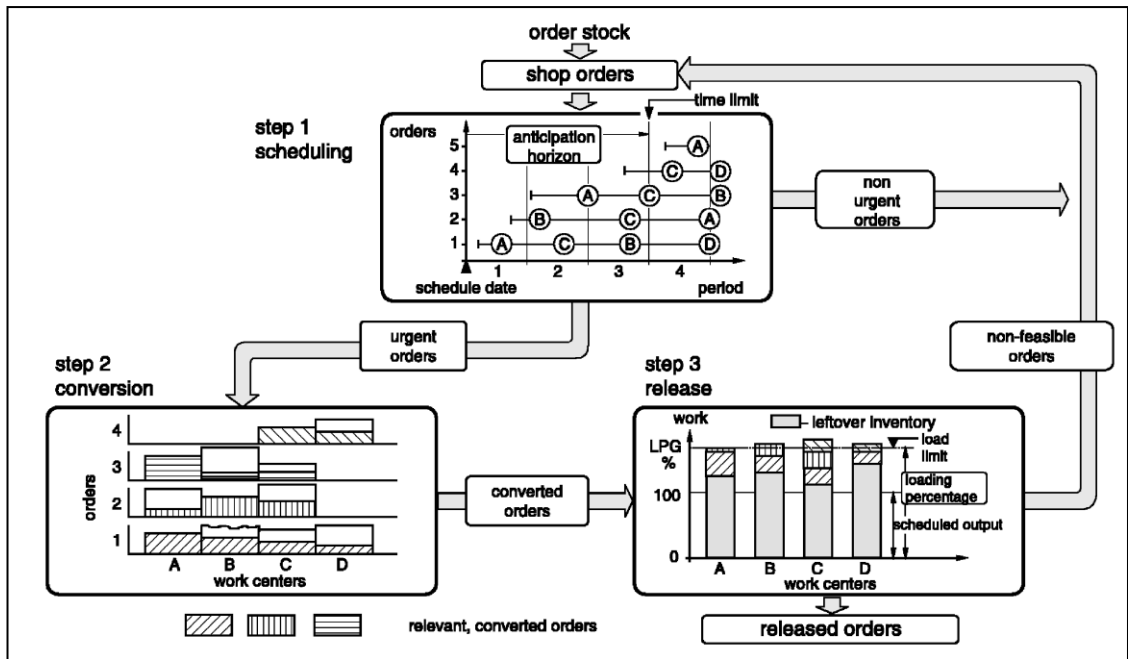


Figura 24 – Procedura della fase di order release (Wiendahl, 1995).

3.6.1 - Load Conversion Method

In precedenza abbiamo visto che è molto semplice determinare il carico diretto di un centro di lavoro nell'istante t di rilascio (basta infatti valorizzare la coda della risorsa in ore di lavoro). Tutt'altro compito è la previsione dell'entità del carico di lavoro presente nelle risorse a monte e che diventerà carico diretto per il centro nel periodo di riferimento (T). Ricordiamo che il carico totale di un centro di lavoro nell'istante t è dato da:

$$\text{Carico totale} = C_{kt}^D + I_{kT}$$

Il fine del metodo di conversione dei carichi proposto da Bechte e Wiendahl, definito in dettaglio in Wiendahl (1995) e noto come *Load Conversion Algorithm*, è quello di fornire una risposta alla seguente domanda: “Qual è la probabilità che un ordine i (e quindi il suo carico di lavoro) raggiunga un determinato centro di lavoro s durante il prossimo periodo di rilascio se prima deve transitare per altri n risorse?”. La Figura 25 rappresenta una serie p di centri di lavoro impiegati nella realizzazione dell'ordine i . Il carico di lavoro dovuto alla prima operazione prevista dal ciclo tecnologico viene imputato interamente (con il tempo di lavorazione) al centro di lavoro corrispondente. In questo caso il carico della prima operazione viene interamente imputato al centro 1. Per destinare il carico delle operazioni successive alla prima risorsa, viene valutata la probabilità che l'ordine raggiunga il centro di lavoro corrispondente nel periodo di riferimento T .

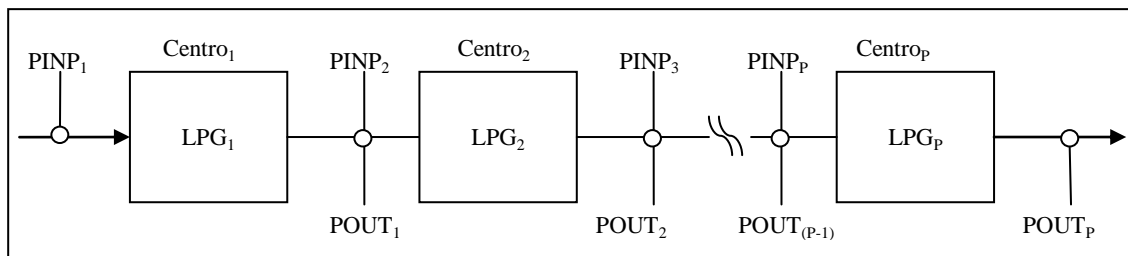


Figura 25 – Rappresentazione di p centri di lavoro interessati dal ciclo di lavoro dell'ordine i.

Definiamo le seguenti grandezze:

- $POUT_m$: probabilità di completare l'operazione m entro il periodo di riferimento T ;
- $PINP_m$: probabilità che l'operazione m inizi entro il periodo di riferimento T .

La probabilità che un ordine riesca ad attraversare il primo centro di lavoro previsto dal ciclo tecnologico nel periodo di riferimento T è:

$$POUT_1 = \frac{OUT_1}{ILO_1 + REL} = \frac{OUT_1}{LL_1} = \frac{T}{TML_1 + T}$$

Il metodo LOOR esprime il limite di carico del centro k come percentuale della capacità pianificata nel periodo T . Questa nuova variabile, detta percentuale di carico, *loading percentage* (LPG), è definita come:

$$LPG_k = \frac{LL_k}{OUT_k} * 100$$

Sostituendo:

$$LPG_k = \frac{LL_k}{OUT_k} * 100 = \frac{Im_k + OUT_k}{OUT_k} * 100 = \left(1 + \frac{Im_k}{OUT_k}\right) * 100$$

Quindi:

$$POUT_p = \frac{100}{LPG_p}$$

La probabilità che l'ordine i entri nel centro di lavoro $p+1$ è pari alla probabilità di uscita dal centro p , quindi:

$$POUT_p = PINP_{p+1}$$

Allora:

$$PINP_p = POUT_1 * POUT_2 * \dots * POUT_{p-1}$$

A questo punto definiamo il *fattore di conversione* o *conversion factor* (CF_p) per il p-esimo centro previsto dal ciclo tecnologico dell'ordine come:

$$CF_p = \frac{100}{LPG_1} * \frac{100}{LPG_{21}} * \dots * \frac{100}{LPG_{(p-1)}}$$

Assumendo per semplicità che tutti i centri di lavoro abbiano lo stesso LPG di progetto, l'equazione precedente si può semplificare in:

$$CF_p = \left(\frac{100}{LPG} \right)^{p-1}$$

In termini più generali e modificando leggermente la simbologia, $CF_{p_{jikt}}$ è la probabilità al tempo t che l'ordine j attualmente nel centro k raggiunga il centro i nel periodo di riferimento T . La probabilità che l'ordine j raggiunga il centro i dove si trova attualmente in coda è ovviamente pari ad 1. Il carico di lavoro atteso (intermini probabilistici) nel centro i calcolato nell'istante t di rilascio ed imputabile all'ordine j in coda nel centro y è quindi:

$$Lp_{jikt} = CF_{p_{jikt}} * TO_{ij}$$

dove TO_{ij} è il tempo di lavorazione (*Operation Time*) previsto dal ciclo dell'ordine j nel centro i . Questo è dato dalla somma del tempo di lavorazione e di set-up. Sommando tutti i carichi attesi per ogni singola risorsa i (all'istante t di rilascio) è possibile calcolare il carico di lavoro diretto atteso per ogni risorsa i nel periodo di riferimento T dovuto all'ordine j :

$$W_{it} = \sum_{j=1}^n Lp_{jikt}$$

Questo valore rappresenta il carico diretto atteso nel centro i dovuto a tutti gli n ordini in coda nelle stazioni a monte. Considerando anche il carico di lavoro iniziale in coda nella risorsa i nell'istante t , ossia ILO_{it} , si ottiene il carico diretto totale del centro i nell'istante t :

$$WL_{it} = ILO_{it} + W_{it}$$

L'espressione che governa il controllo del carico del centro i è quindi:

$$WL_{it} \leq LL_i$$

Quindi, un ordine urgente viene selezionato dal portafoglio ordini e rilasciato solamente se il valore del carico diretto totale, WL_{it} , per tutte le risorse i previste dal ciclo tecnologico dell'ordine non superano il limite di carico LL_i definito.

3.7 Aspetti chiave degli approcci WLC e considerazioni generali

Di seguito sono elencati alcuni degli aspetti chiave di natura generale dei metodi di Workload Control presentati in letteratura.

- A. Una caratteristica fondamentale del WLC risiede nella sua funzione di buffer tra il reparto produttivo e l'ambiente esterno (la dinamicità che contraddistingue l'arrivo degli ordini cliente). Difatti, se un ordine venisse rilasciato immediatamente una volta pervenuto, la produzione dovrebbe far fronte direttamente alle criticità generate da possibili incongruenze tra capacità disponibile e quella richiesta (Irastroza e Deane 1974). Il WLC tiene sotto controllo il reparto, mentre attraverso il portafoglio ordini è possibile evidenziare in anticipo eventuali problemi legati ad una scorretta pianificazione della capacità (Bechte, 1994). È quindi possibile introdurre alcune misure correttive, come ad esempio la variazione della capacità produttiva o la rinegoziazione della data di consegna promessa al cliente, già nella fase di accettazione degli ordini.
- B. L'impiego di limiti di carico nella fase di rilascio riduce il fenomeno noto come *Lead Time Syndrome*. Ploss (1988) descrive il ciclo vizioso che s'instaura tra l'incremento dei lead time pianificati e del carico di lavoro (Figura 26). Tale comportamento può essere sintetizzato come segue:
 - a. L'incremento dei lead time pianificati da parte del pianificatore si traduce nel rilascio di più ordini;
 - b. Il rilascio anticipato di tali ordini incrementa il carico di lavoro dei centri e quindi le code;
 - c. I lead time reali diventano più lunghi e le date di consegna non vengono quindi rispettate;
 - d. Il pianificatore incrementa ulteriormente il valore dei lead time standard e il ciclo si ripete.

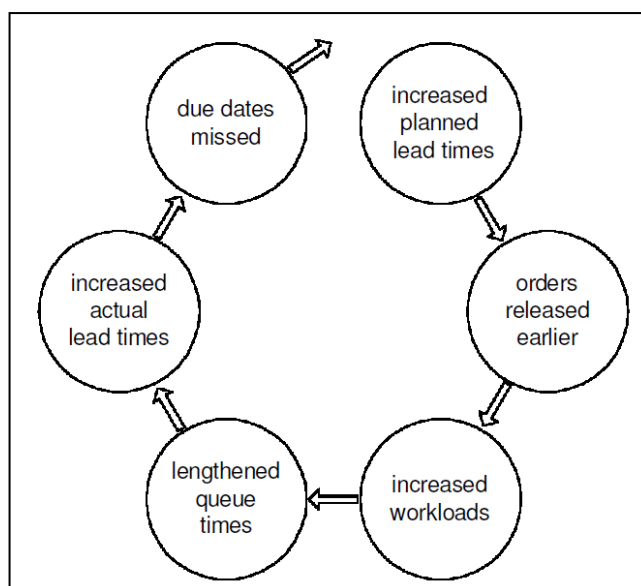


Figura 26 – Lead Time Syndrome (Ploss, 1988).

Il ciclo vizioso descritto da Ploss e riportato in Figura 26 ha inizio se il pianificatore rilascia anticipatamente degli ordini per far fronte ad un incremento del carico di lavoro. Il WLC spezza il circolo vizioso in corrispondenza della fase b, poiché il rilascio degli ordini è subordinato alle regole di carico e alla situazione contingente del reparto (Melnik e Ragatz, 1989; Wiendahal, 1991).

3.7.1 Limite del carico e dimensione degli ordini

Si analizzano ora nello specifico il tema della limitazione del carico di lavoro. La maggior parte degli studi presenti in letteratura propone un controllo del carico tramite l’ipostazione di limiti superiori e/o inferiori (*MXLMIL*), indagando modalità e peculiarità della definizione progettuale dei valori di riferimento. Tuttavia si può riscontrare come a questo parametro sia associata una certa criticità. Secondo Land e Gaalman (1998) limiti di carico troppo severi possono impedire il rilascio di ordini urgenti, mentre al contrario limiti di carico eccessivamente “laschi” non garantiscono un efficace controllo del WIP. Secondo Enns e Prongue Costa (2002) un valore elevato del limite è inefficace poiché il WIP non viene opportunamente limitato, mentre livelli eccessivamente stretti inducono una sconveniente riduzione del tasso di utilizzo delle risorse e quindi della produttività; *“a control level set too high is ineffective but that too low a level provides inadequate throughput”*. Secondo Land e Gaalman (1998) in presenza di livelli di WIP molto ridotti, le prestazioni del sistema produttivo sono estremamente sensibili alle variazioni, seppur di modesta entità, del valore dei limiti di carico. Land (2004) sostiene che valori eccessivamente ridotti dei limiti di carico possono ritardare il *timing* del rilascio degli

ordini, ma al contempo possono ridurre le fluttuazioni e l'ampiezza delle code delle risorse nel reparto produttivo. Secondo Cigolini e Portioli-Staudacher (2002) l'adozione di un range che limita il carico superiormente e inferiormente porta ad un decadimento generale delle prestazioni del sistema: *“adding a lower workload bound leads to a worsening of almost all performance measures”*. Più volte in questa tesi si è fatta distinzione tra metodi di workload bounding e workload balancing. In riferimento alla loro robustezza secondo Fernandes e Silva (2008) *“the workload balancing showed to be robust strategies, when facing changes in the manufacturing environmental conditions”*.

Per rappresentando un aspetto estremamente importante, solamente un numero esiguo di ricerche ha considerato se ed in che modo la presenza di ordini di grandi dimensioni vada ad influenza l'efficacia della tipologia e del valore del limite di carico. Secondo Land (2004), gli ordini di notevoli dimensioni possono generare delle criticità in fase di rilascio in concomitanza a limiti di carico molto stretti. Tuttavia secondo l'autore, un possibile rimedio consiste nell'incrementare la priorità degli ordini di grandi dimensioni contenuti nel portafoglio. Il lavoro di Perona e Portioli (1998) ha dimostrato che è necessario modificare l'estensione dell'intervallo temporale compreso tra due rilasci successivi coerentemente alle dimensioni degli ordini. Benché limiti di carico elevati e periodi di rilascio lunghi consentono di rilasciare agevolmente anche gli ordini di dimensioni notevoli, per contro questi possono compromettere la capacità del sistema di controllo sul carico. In altre parole, mentre un periodo di rilascio ampio consente di mitigare le criticità legate alla presenza di ordini di grosse dimensioni, allo stesso tempo riduce la frequenza di rilascio degli ordini di piccole dimensioni che si trovano quindi ad attendere più lungamente nel portafoglio. Il metodo LOOR di Becthe (1988) e Wiendahal (1995) tiene conto in un certo qual modo delle criticità presenti in fase di rilascio e legate agli ordini di grandi dimensioni. In particolare la procedura di rilascio viene “congelata” non appena una risorsa raggiunge il limite (per la prima volta): l'ordine che ne ha generato il superamento viene rilasciato ugualmente, mentre nessun altro ordine che prevede tale risorsa nel ciclo tecnologico potrà più essere rilasciato fino al periodo successivo. A tal proposito Land e Gaalman (1998) riportano quanto segue: *“The concept presented by Bechte compensates at the release stage for large jobs. When the load limit is reached, the consideration of jobs is continued for one additional job, with the next job that would visit the fully loaded work centre released to the shop floor. This allows very large jobs to be released that would otherwise need the load at work centres to be very low before they could fit within the limit, providing a useful relaxation of rigid workload bounding towards a more balancing*

approach”. Analogamente Hendry (1989) descrive il meccanismo denominato ‘*Force Release*’ che consente all’utente di rilasciare un ordine anche se questo ha oltrepassato il valore del limite di carico di una o più risorse. Secondo Cigolini e Portioli-Staudacher (2002) il metodo di workload balancing da loro proposto è estremamente flessibile e rispetto a criteri riconducibili alla categoria del workload bounding consente di rilasciare con grande facilità gli ordini di notevoli dimensioni.

3.7.2 Peculiarità dell’approccio probabilistico

Un numero cospicuo di ricerche ha comparato le prestazioni ottenute dall’implementazione del metodo probabilistico, LOOR, e di quello aggregato, LUMS, in funzione delle caratteristiche del sistema produttivo. Il metodo LOOR ha conseguito prestazioni superiori in strutture produttive riconducibili ad un *pure job shop*, mentre il LUMS è risultato l’opzione migliore in quei contesti in cui il flusso di materiali segue una direzione preferenziale (*dominant flow shop*). Secondo Oosterman *et al.* (2000) il metodo aggregato modificato “*perform better than the LUMS approach in a pure and ‘restricted job shop’, however, in the general flow shop the LUMS approach outperforms this release mechanism*”. Tuttavia secondo Enns (1995) “*real life job shops have most in common with the theoretical general flow shop, suggest in that in practice an approach such as the LUMS concept would compare favourably*”.

Alcuni studi hanno valutato la robustezza dei due diversi approcci in funzione del grado di variabilità delle condizioni ambientali esterne ed interne. Cigolini *et al.*, (1998) affermano che: “*the probabilistic techniques appear to match the characteristics of job shop environments with a higher uncertainty degree*”. Al contrario secondo Fernandes e Silva (2008) “*the atemporal workload accounting over time showed to be robust strategies, when facing changes in the manufacturing environmental conditions*”. Il lavoro di natura simulativa di Cigolini e Portioli (2002) dimostra che “*there is no workload control method performing better than the others under all tested conditions*”.

Con riferimento al metodo di contabilizzazione del carico impiegato, alcuni studi hanno dimostrato che il grado di variabilità nella dimensione degli ordini ha un effetto estremamente deleterio sulle prestazioni dell’approccio aggregato. Secondo Thurer (2009) “*When a large job is released, it will have a big impact on the current workloads of all work centres in its routing, even when it is queuing or being processed elsewhere. This can distort the ‘true state’ of the shop floor and affect the release of other jobs from the pool. It could result in some work centres being left idle and others overloaded.*”

Diversi studi hanno riconosciuto che la fase di definizione dei valori dei parametri di funzionamento del metodo LOOR, come i limiti di carico, l'estensione del planning period e il time limit è estremamente critica (Fernandes e Silva, 2008; Breitaup et al., 2002). Come osservato in precedenza il time horizon rappresenta la misura in cui il metodo valuta in avanti nel tempo gli ordini per il rilascio. Un valore ridotto può limitare pesantemente l'insieme di ordini che sono potenzialmente rilasciabili, riducendo la possibilità di bilanciare adeguatamente i carichi con effetti negativi sul livello di produttività del sistema. Per contro, un orizzonte temporale eccessivamente ampio può portare ad una notevole variabilità della data di completamento dell'ordine e quindi di consegna al cliente. Lo studio di Perona e Portioli (1998) indica che le prestazioni del metodo LOOR sono estremamente sensibili all'ampiezza del *planning period*. Hendry et al. (1998) hanno evidenziato lo stesso comportamento nel caso venga impiegato l'approccio aggregato.

Il metodo LOOR stima i carichi previsti in arrivo nelle risorse tenendo in considerazione la distanza che separa il centro dall'ordine. Questa caratteristica è fondamentale nei sistemi produttivi caratterizzati da un'elevata varietà dei cicli tecnologici (Oosterman, 2000). Il metodo aggregato invece, poiché non considera in alcun modo i cicli tecnologici e la disposizione delle risorse nel ciclo dell'ordine, ha riportato prestazioni inferiori in ambienti riconducibili alla struttura di tipo *pure job shop*. Chiaramente vi è il rovescio della medaglia; l'implementazione del metodo LOOR infatti diventa critica se questo viene introdotto in sistemi produttivi caratterizzati da una direzione dominante del flusso di materiali (i.e. *flow shop*). Ciò è imputabile sia all'utilizzo dell'algoritmo di conversione dei carichi che non è molto attendibile nel calcolo del carico di lavoro per i centri posti a valle sia al fatto che viene trascurata l'influenza degli ordini sul carico di lavoro successivamente al periodo di pianificazione corrente. Il sistema evidenzia così un andamento ciclico, dove si alternano periodi di sovraccarico e periodi di sottocarico (Knolmayer, 1991).

Alcune critiche al metodo di conversione dei carichi sono giunte anche dal mondo Tedesco. Sotto l'assunzione sostanziale alla base dell'algoritmo ogni risorsa raggiungerà esattamente il valore del limite di carico assegnato al termine della fase di rilascio. Difatti nella formula impiegata per il calcolo del carico diretto previsto in input alle risorse, non viene utilizzato l'effettivo livello di carico raggiunto, ma il valore di LPG pianificato che è quindi puramente teorico. Perona e Portioli (1996) hanno dimostrato che le prestazioni del

metodo LOOR possono essere incrementate riducendo, nell'algoritmo di conversione, la deviazione tra il livello di carico previsto e quello effettivo (al termine della fase di rilascio) dovuta al non perfetto e non completo bilanciamento delle risorse. Difatti, è estremamente difficile che il livello di carico raggiunga esattamente il limite imposto in ogni risorsa. Quindi l'algoritmo di conversione sottostima di fatto la probabilità che ogni operazione ha di essere completata nel periodo di pianificazione. Altri ricercatori come ad esempio Adam (1988) e Knolmayer (1991) hanno criticato il metodo LOOR in quanto la stima del carico diretto è legata ad una prospettiva del singolo ordine. Secondo questi autori, oltre al livello di saturazione della risorsa e la sua capacità, vi sono altri fattori che influenzano la probabilità di completamento del singolo ordine, come ad esempio la sua priorità.

Come obiezione a molte delle critiche sollevate sull'algoritmo di conversione dei carichi, Breithaupt *et al.* (2002) sostengono che uno dei punti di forza primari del LOOR risiede nella sua semplicità: sebbene la stima del carico diretto può non essere realistica per il singolo ordine, il valore complessivo dell'carico in ingresso in una risorsa, ottenuto valutando tutti gli ordini, è molto prossimo a quello reale. In altre parole, attraverso l'algoritmo di conversione, ogni ordine rilasciato contribuisce in piccola parte al carico totale. La stima dell'input non è particolarmente precisa, ma le deviazioni dalla situazione reale sono generalmente di piccole. Secondo Breithaupt *et al.* (2002) "*load estimations of LOOR can be qualified as simple but reasonable*".

3.7.2.1 Migliorie introdotte al metodo LOOR

Nella sezione precedente sono state presentate e discusse alcune delle criticità riconducibili al metodo LOOR, ed in particolar modo quelle legate all'algoritmo di conversione del carico. Breithaupt *et al.* (2002), sulla base di esperienze empiriche e dei risultati ottenuti da ricerche specialistiche, hanno ampliato il metodo LOOR classico introducendovi importanti, seppur semplici, migliorie. Di seguito vengono presentate alcune di queste estensioni.

- I. La teoria delle Logistic Operating Curves rappresenta uno strumento utile e diretto per determinare il valore più appropriato del limite di carico (e quindi dell'LPG) (Wiendahl *et al.*, 1998; Wiendahl e Nyhuis 1996; Nyhuis e Wiendahl, 2009). Tali curve consentono di ricavare empiricamente la relazione matematica che intercorre tra la produttività e il work-in-process per una data risorsa e per l'intero sistema produttivo.

- II. Come già sostenuto più volte, la scelta del valore del *time limit* è di estrema criticità. Studi condotti presso l'Institute of Production System hanno dimostrato che, in contesti produttivi dove la maggior parte delle lavorazioni sono meccaniche, è consigliabile utilizzare un valore del *time limit* pari a 2 - 3 volte il periodo di pianificazione (Wiendahl 1995).
- III. Come affermato in precedenza, l'algoritmo di conversione può generare una notevole oscillazione del carico diretto specialmente nei centri posti molto a valle (Knolmayer, 1991). Una soluzione estremamente semplice, ma allo stesso tempo di straordinaria efficacia, consiste nell'applicare l'algoritmo di conversione dei carichi solamente per un dato numero di centri a valle (previsti dal ciclo tecnologico). In altri termini i centri di valle, che al momento del rilascio occupano una posizione molto lontana relativamente al ciclo tecnologico, vengono ignorati nella procedura di calcolo del carico diretto generato. Studi svolti presso l'Institute of Production System hanno dimostrato che la criticità sopra citata viene ridotta notevolmente considerando solamente quattro step, e quindi 4 risorse, nell'algoritmo di conversione. Così facendo infatti, se da un lato è ancora possibile valutare l'entità del carico diretto nei centri di lavoro più prossimi, dall'altro vengono ignorate le operazioni che saranno svolte molto in la nel tempo e che influenzano solo marginalmente il rilascio degli ordini.

Capitolo 4 - Il modello di simulazione

In questo capitolo verranno presentati le domande di ricerca, la metodologia, il modello concettuale proposto e il processo sperimentale seguito.

4.1 Domande di ricerca

In riferimento al modello WLC, molte ricerche hanno analizzato l'impatto che i diversi parametri e criteri di funzionamento, come ad esempio le regole di rilascio degli ordini, le regole di dispatching, i metodi di contabilizzazione del carico, etc hanno su svariati indicatori di prestazione. Nella maggior parte dei casi si tratta di lavori di natura simulativa che utilizzano come modello sistemi estremamente semplificati e stilizzati che poco hanno in comune con i sistemi manifatturieri reali (ad esempio quello proposto da Ragatz e Mabert, 1988). All'opposto il modello simulativo proposto in questo lavoro rappresenta piuttosto fedelmente le strutture dei prodotti (numerosità, struttura e livelli della distinta base), delle risorse (centri di lavoro, macchine) e degli ordini (tipo, dimensione e data di arrivo) di una realtà manifatturiera locale. La complessità del modello è legata al fatto che:

- si è riprodotta una struttura produttiva realmente esistente;
- è stata mantenuta integralmente la struttura della distinta base dei prodotti;
- viene valutato l'effetto di 8 parametri e criteri di funzionamento del modello WLC sulle prestazioni del sistema.

E' stata selezionata un'azienda meccanica di medie dimensioni, con sede nel nord est Italia, operante con logica *make-to-order* che produce e commercializza cappe per aspirazione da cucina. Con riferimento alla classificazione fornita da Oosterman, Land e Gaalman (2000), il sistema produttivo in questione è identificabile come *general job shop* (ossia direzione preferenziale del flusso di materiale e differente "estensione" dei cicli tecnologici). Pur cercando di rimanere il più fedeli possibili alla struttura reale, per motivi legati principalmente a limiti di potenza di calcolo e di memoria della strumentazione impiegata per la simulazione, sono risultate inevitabili alcune semplificazioni. Nello specifico sono stati trascurati i cicli di produzione alternativi degli ordini (quando presenti) e si è ipotizzato un sistema con capacità produttiva non flessibile nel brevissimo periodo (i.e. straordinari, doppi turni, etc). Inoltre si è assunto di gestire i codici di acquisto con logica *to-stock* (quindi sempre disponibili quando richiesto). Quest'ultima assunzione è in linea con la pratica aziendale per cui i codici di acquisto sono gestiti a scorta. Tali aspetti saranno più approfonditamente in altre sezioni di questo capitolo.

Questo studio si pone principalmente i seguenti obiettivi:

- I. Valutare l'impatto e l'interazione di diversi parametri e logiche di funzionamento facenti parte del Workload Control su alcuni indicatori di prestazione operativi in presenza di una struttura manifatturiera complessa.
- II. Approfondire le conoscenze teoriche di funzionamento di alcuni parametri e regole facenti parte del modello WLC in un sistema complesso, ed in particolar modo in presenza di una distinta base profonda.
- III. Testare le prestazioni di un nuovo ed originale metodo di rilascio degli ordini facente parte della categoria del *workload balancing*.

4.2 Metodologia di ricerca: sviluppo ed utilizzo di modelli quantitativi

Inizialmente i modelli quantitativi sviluppati nell'ambito della ricerca operativa (OR) erano soprattutto orientati alla risoluzione di problemi pratici nel campo dell'Operations Management (OM¹¹) e non nello sviluppo di sapere scientifico. Negli anni 60 negli stati uniti, nasce un filone di ricerca che si occupa di problemi più astratti con l'obiettivo di costruire della teoria più generale nell'ambito dell'Operations Management. Tuttavia negli ultimi tre decenni la maggior parte della conoscenza generata ha perduto in gran parte i suoi fondamenti empirici. Recentemente il tema dello sviluppo di teorie esplicative (*explanatory theory*) e predittive (*predictive theory*) è tornato ad essere tema di grande importanza e priorità. Articoli di recente pubblicazione hanno sottolineato la necessità di uno sviluppo maggiore di teorie sul tema dell'OM (i.e. Schmenner e Swink, 1998; Amundson, 1998; Wacker, 1998).

Nelle ricerche di natura quantitativa (*quantitative model-based research*) vengono sviluppati, analizzati o testati modelli causali delle relazioni tra variabili di controllo (indipendenti) e variabili risposta (dipendenti). Le variabili di prestazione possono essere sia di natura fisica, come ad esempio il livello di scorta a magazzino o il tasso di utilizzo delle risorse, o variabili economiche come ad esempio il costo, il fatturato, etc. Bertrand e Fransoo (2002) hanno classificato le ricerche di natura quantitativa in due categorie principali: l'*axiomatic research* secondo la terminologia introdotta da Meredith *et al.* (1989) e quella basata su osservazioni empiriche.

¹¹ Bertrand and Fransoo (2002) definiscono l'OM come "*the process of design, planning, controlling and executing operations in manufacturing and service industries*".

- L'*axiomatic research* è guidata principalmente da modelli astratti: “*the primary concern of the researcher is to obtain solutions within the defined model and make sure that these solutions provide insights into the structure of the problem as defined within the model. Axiomatic research produces knowledge about the behavior of certain variables in the model, based on assumptions about the behavior of other variables in the model*” (Bertrand e Fransoo, 2002). Questo filone di ricerca utilizza rigorose elaborazioni fondate su teoremi e prove logiche (ad esempio modelli matematici) (Meredith *et al.*, 1989). In tale contesto, dove non è possibile ottenere soluzioni analitiche, l’impiego di metodologie simulative consente di manipolare ed includere nell’analisi i dati empirici, garantendo dunque rilevanza scientifica dei risultati. Tuttavia, i modelli di simulazione sono legati anche alla classe di ricerche nota come *model-based*.
- La seconda classe di ricerche è caratterizzata da riscontri empirici e misure: “*empirical quantitative research indicates the process of achieving resolutions by empirical findings*”. Qui, il compito principale del ricercatore è quello di assicurarsi che vi sia una corrispondenza tra quanto osservato e la realtà del fenomeno. In questo caso il modello non è astratto. Secondo Bertrand e Francisco (2002) “*the methodology of qualitative model-driven empirical research offers a great opportunity for further advancing theory*”. I modelli quantitativi empirici sono ancora nella fase embrionale di sviluppo.

Le ricerche di tipo assiomatico ed empirico possono essere suddivise a loro volta in due sub categorie; tipo *descrittivo* e *normativo* a seconda del loro obiettivo. Quelle descrittive sono volte a generare un modello che descriva la relazione causale esistente tra le variabili dipendenti e quelle indipendenti, e consentono di ottenere una comprensione maggiore delle dinamiche sottostanti ai processi (ad esempio la *System Dynamics*¹² – Forrester, 1961)”. Le ricerche di tipo normativo “*has the objective of establishing policies, strategies and actions. It is very hard to assess which changes in performance are due to the specific improvement tested and which are due to other changes*” (Bertrand e Francisco, 2002). Tabella 14 riporta la classificazione introdotta da Bertrand e Francisco (2002).

¹²Secondo Bertrand e Francisco (2002) “*The industrial dynamics models of Forrester (1961) are scientific theoretical models of operational processes, as they can explain and predict the dynamic behavior and performance of the processes, and can be validated empirically. In this respect the work of Forrester was a major breakthrough, which has led to a general methodology for modeling dynamic systems known as system dynamics*”.

Tabella 14 – Classificazione dei metodo di ricerca quantitativa nel OM (Bertrand e Francisco, 2002).

	Descrittivo	Normativo
Empirico	ED	EN
Assiomatico	AD	AN

4.3 Simulazione ad eventi discreti

Un caso particolare di assiomatic research è la simulazione al calcolatore (in tal caso la soluzione non è ottenuta tramite un’analisi matematica). In tali lavori è di primaria importanza l’aspetto metodologico che consiste in gran parte in teorie statistiche atte alla definizione della progettazione design dell’esperimento e all’analisi dei risultati (i.e. Law e Kelton, 2000). Secondo Bertrand e Francisco (2002) *“this technique is used in case the model or problem is too complex for formal mathematical analysis. This type of research generally leads to lower scientific quality results than research using mathematical analysis, but the scientific relevance of the process or problem studied may be much higher. This is because computer simulation can deal with a much wider variety of scientific models than can mathematical analysis. So the trade-off here often is between scientific relevance of the process or problem studied and scientific quality of the result”*.

Secondo Kleijnen e Smiths (2003) la simulazione ad eventi discreti è divenuto uno strumento estremamente importante nello studio del Supply Chain Management. La simulazione consente infatti di tener conto della variabilità del sistema e della natura stocastica del problema. I sistemi produttivi vengono modellati descrivendone la logica sottostante e gli *eventi* che sono processati in ordine cronologico al trascorrere del tempo di simulazione. Uno dei possibili impieghi di tali studi consiste nella valutazione della configurazione del sistema in essere (status quo) e nella comparazione con configurazioni alternative. Ciò richiede il confronto tra i valori di differenti indicatori di prestazione che devono essere definiti a priori.

Law e Kelton (2000) hanno definito un processo da seguire nella costruzione di un modello simulativo ad eventi discreti (Figura 27). Nel primo step è necessario formulare il problema da analizzare, definire l’obiettivo dello studio ed identificare le problematiche specifiche e le criticità. Nel secondo step vengono raccolte informazioni e dati, ottenuti dall’analisi di lavori precedenti presenti in letteratura (se disponibili) e sulla base dell’obiettivo della ricerca. Lo step 3 consiste nella validazione del modello concettuale. Nella quarta fase, utilizzando appositi software di programmazione o specifici, il modello

concettuale viene tradotto in un modello di simulazione calcolatore. Nello step 5, vengono effettuati alcune simulazioni pilota. In caso di esito positivo nello step 6 viene effettuata la verifica e la validazione del modello simulativo. Gli step che vanno dal 7 al 10 consistono nell'ordine:

- nella progettazione degli esperimenti attraverso apposite tecniche statistiche (i.e DOE – Design of Experiment);
- nella simulazione degli scenari al fine di ottenere i valori assunti delle variabili dipendenti del sistema nel piano sperimentale;
- nell'analisi dei risultati attraverso tecniche statistiche.

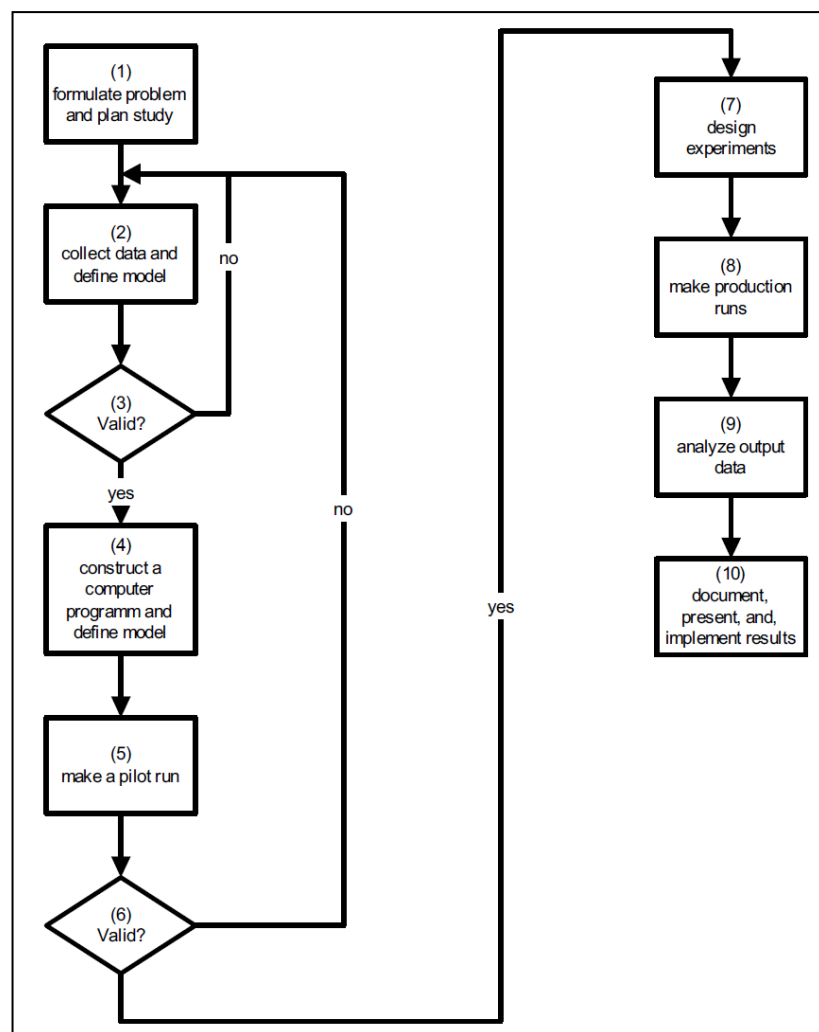


Figura 27 – Processo di costruzione di un modello simulativo (Law e Kelton, 2000).

Seguendo la classificazione di Law e Kelton, gran parte degli elementi riportati nelle fasi che vanno dalla prima all'ottava sono stati già presentati nei capitoli precedenti. In

particolare il significato dei vari parametri, che costituiranno il piano sperimentale che sarà presentato in questo capitolo, è stato ampiamente discusso nei capitoli 2 e 3.

4.4 Modello di simulazione

Simulazione è un termine generico, che comprende una serie di metodi e applicazioni che consentono di imitare o rappresentare sistemi reali, tipicamente attraverso un calcolatore. La simulazione è necessaria, nell'analisi di problemi complessi. Il modello concettuale e il sistema produttivo selezionato sono stati sviluppati, integrati e simulati utilizzando *Simio*, un software di simulazione ad elementi finiti e programmabile ad oggetti (www.simio.biz) sviluppato dalla Simio LLC . Nelle sezioni successive verranno definite in dettaglio tutti i dati in input al modello di simulazione.

4.4.1 La struttura produttiva simulata

Il modello di simulazione rappresenta piuttosto fedelmente il sistema produttivo di un'azienda manifatturiera locale di medie dimensioni operante con logica su ordine. I prodotti commercializzati sono cappe d'aspirazione per cucine. Il sistema produttivo può essere classificato come un *general job shop*. La struttura del modello di simulazione e i dati in input sono stati ottenuti dal database dell'azienda.

4.4.1.1 Ordini cliente e codici

Nel modello di simulazione l'arrivo degli ordini cliente riproduce fedelmente quanto riportato nel database aziendale (vedi appendice). Gli ordini cliente considerati sono 1247 e compresi in un periodo di 12 mesi, che va dall'1 gennaio 2008 al 31 dicembre 2008. La distribuzione degli ordini è molto variabile sia nella dimensione che nella distribuzione di arrivo. L'azienda deve inoltre fronteggiare situazioni di domanda stagionale. La Figura 28 riporta la distribuzione del contenuto di lavoro degli ordini. La Figura 29 mostra la distribuzione di arrivo degli ordini. Una volta pervenuti, gli ordini sono inseriti nel portafoglio ordini dove attendono per il rilascio come previsto dal modello concettuale presentato nei capitoli precedenti. Anche la distinta base ed il ciclo tecnologico dei prodotti implementati nel modello simulativo riproducono fedelmente il database dall'azienda. Vi sono 450 codici prodotto finito, mentre i codici intermedi e i materiali sono complessivamente 3351. La distinta base presenta un massimo di 5 livelli di profondità.

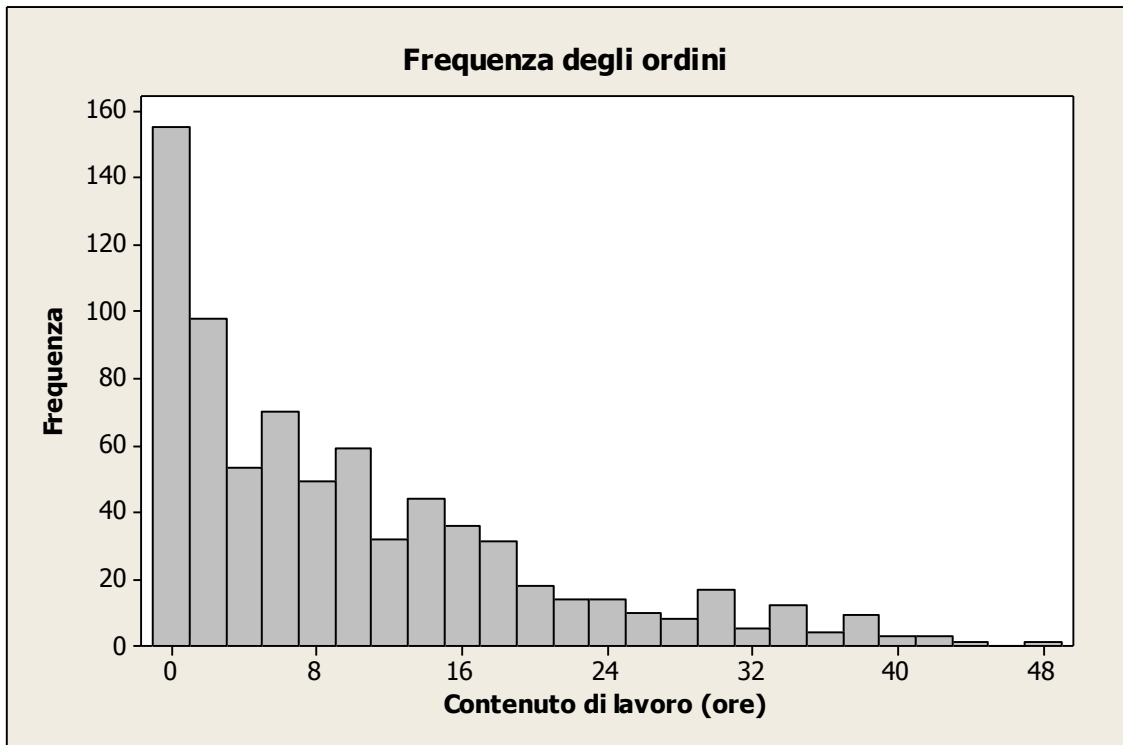


Figura 28 – Distribuzione di frequenza di contenuto di lavoro degli ordini.

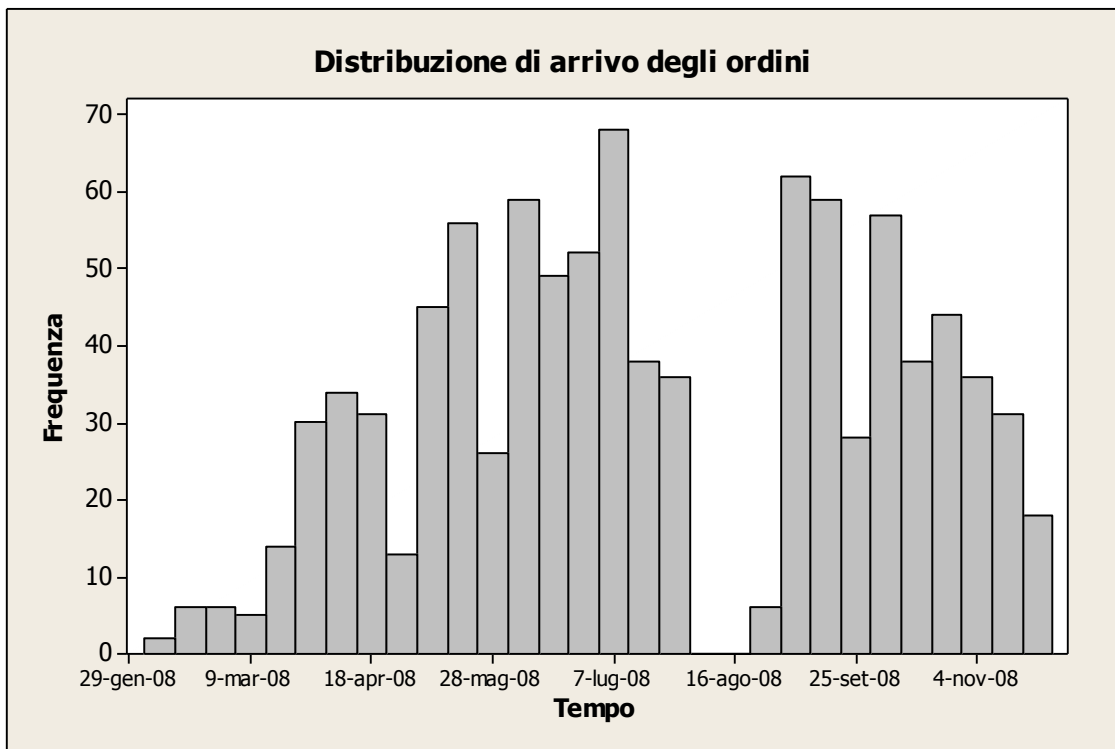


Figura 29 - Distribuzione di frequenza di arrivo degli ordini.

4.4.1.2 Centri di lavoro e risorse

La struttura del sistema produttivo considerato è classificabile come *general job shop*, poichè il flusso dei materiali segue un andamento non lineare. Il reparto conta 55 macchine raggruppate in 29 centri di lavoro (vedi appendice).

4.4.1.3 Cicli, tempi di lavorazione e di set-up

La distribuzione del tempo di lavorazione è nota ai ricercatori come una delle aree che più facilmente consente di inserire della variabilità all'interno dei sistemi di pianificazione e controllo della produzione (Melnyk *et al.*, 1992; Matsuura *et al.*, 1993, 1995). Nel modello proposto il *tempo di lavorazione* segue una distribuzione normale, dove il valore medio equivale a quanto riportato nel database dell'azienda. Per non complicare ulteriormente il modello, si è assunto che il tempo di set-up è indipendente dalla sequenza di lavorazione: al tempo di lavorazione viene aggiunto un *extra time* prestabilito ogni qual è richiesta un'operazione di set-up (Perona e Portioli, 1998; Kia *et al.*, 2009; Vinod e Sridharan, 2009; Kurz e Askin, 2003). Quest'assunzione, pur semplificando notevolmente il modello dal punto di vista computazionale, non limita la validità dei risultati poiché è stato verificato che, nel sistema manifatturiero considerato, il tempo di set-up non dipende pesantemente dalla sequenza con cui vengono eseguite le operazioni.

4.4.2 Assunzioni al modello

In questo lavoro, sono state introdotte le seguenti assunzioni:

- Tutti gli ordini cliente sono accettati e quindi inseriti nel portafoglio ordini fintantoché quest'ultimo non raggiunge un determinato limite prefissato.
- I codici di acquisto, quando richiesti dai codici "padre", sono sempre disponibili a magazzino (gestione a stock). Questa assunzione, che determina una gestione a scorta dei codici di livello più basso nella distinta base, è verosimile e non limita la generalità del modello.
- La distribuzione del tempo di lavorazione è una delle aree più importanti all'interno dei sistemi di pianificazione e controllo della produzione dove può essere facilmente inserita della variabilità (Melnyk *et al.*, 1992; Matsuura *et al.*, 1993, 1995). Nella simulazione il *processing time* segue una distribuzione normale, con valor medio equivalente a quello presente nel database.
- Il tempo di set-up è indipendente dalla sequenza di lavorazione

- La *machine unavailability* è una delle fonti maggiori di variabilità in molti sistemi manifatturieri (Hopp e Spearman, 1991; Cigolini e Perona, 2002). La *machine unavailability* segue una distribuzione esponenziale.

4.4.2.1 **Definizione della data di consegna**

In questa sezione viene descritto il metodo con cui viene stabilita la data di consegna (prevista) al cliente. Una volta pervenuto un ordine è necessario stabilire la data di consegna, tenendo conto della situazione contingente del sistema, ossia il livello del carico. In particolare, la data di consegna pianificata (DD) per ogni nuovo ordine i in arrivo all'istante t è data da:

$$DD_i = ED_i + OPt + \sum_{k=1}^n LT_{ik}$$

Dove:

- ED_i è l'istante di arrivo dell'ordine cliente i ;
- OPt è il carico aggregato, misurato in ore di lavoro, del portafoglio ordini all'istante t di arrivo dell'ordine i .
- LT_{ik} è il lead time medio dell'ordine i nel centro k , dato dalla somma del tempo di lavorazione e del tempo di coda medio.

Nel modello proposto, i lead time medi nei centri di lavoro vengono aggiornati continuamente durante la simulazione e quindi variano la loro estensione dinamicamente. In altre parole il simulatore utilizza come valori iniziali quelli riportati nel database (tempi di lavorazione delle operazioni) e, via via che la simulazione avanza, il software aggiorna i lead time tenendo conto delle code che si creano nel sistema. Questo consente di ottenere un modello estremamente flessibile che riesce a stimare la data di consegna tenendo conto dell'evolversi della situazione contingente nel reparto produttivo.

4.4.2.2 **Distinte base e logica di rilascio dei codici intermedi e dei materiali**

Dall'analisi della letteratura non sono emersi studi che trattano il tema del rilascio degli ordini in presenza di distinte base. In questa sezione verrà brevemente riportato il meccanismo di rilascio dei "codici figli" che si trovano a livelli inferiori della distinta base. Nella fase di valutazione del rilascio di un ordine, viene dapprima verificata la disponibilità delle materie prime e dei sotto-assiemi. Ricordiamo nuovamente che in questo lavoro si è

assunta una gestione a scorta dei codici di acquisto, che risultano quindi sempre presenti a magazzino quando richiesto (ad esempio i codici C, E e F in Figura 30).

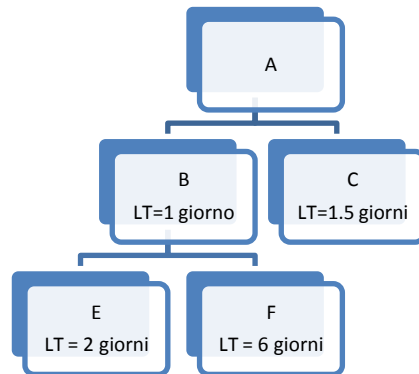


Figura 30 – Esempio di meccanismo di rilascio e distinta base.

Nell'esempio di Figura 30, quando viene valutato il rilascio del prodotto finito A, dapprima è necessario verificare la disponibilità dei codici figli B e C nelle quantità richieste (in realtà C è sempre disponibile poiché codice di acquisto). In caso il test abbia esito positivo, si verifica se l'eventuale rilascio di A soddisfa tutti i criteri e i limiti di carico imposti dal modello adottato. Non è possibile rilasciare A se B non è disponibile a magazzino; in tal caso viene generato un ordine di produzione per il codice B nella quantità richiesta. La procedura appena esposta si ripete nuovamente, ossia segue la verifica:

- della disponibilità del codice figlio (nel caso di B, i codici E ed F devono essere disponibili a magazzino) e
- dei vincoli/regole imposte al carico.

Se il materiale è disponibile e nessun vincolo viene violato, allora B viene rilasciato in produzione. Non appena entrambi i codici figli sono disponibili (B e C nel caso dell'esempio), è possibile procedere alla fase di valutazione del rilascio dell'ordine A: se le regole di rilascio non sono violate, allora A viene rilasciato.

4.5 Piano sperimentale

La Tabella 15 rappresenta il piano sperimentale e riporta gli 8 fattori ed i vari livelli considerati nel modello proposto in questa tesi. Nei capitoli precedenti si è dato ampio spazio alla descrizione di alcuni dei fattori del piano sperimentale. Quelli non ancora descritti, saranno discussi in dettaglio nelle prossime sezioni.

Tabella 15 – Piano sperimentale proposto.

Fattore	Descrizione	Tipo	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
A	Periodo di rilascio (in giorni)	Numerico - discreto	2	5	8		
B	Time limit (in giorni)	Numerico - discreto	8	14	20		
C	Order pool sequence rules (not valid for WLB2)	Categoriale	Earliest Planned Release Date (PRD) (Bechte 1988, Portioli, 1991, Perona e Portioli, 1996)	Critical Ratio (CR) (Bobrowski (1989)			
D	Workload accounting	Categoriale	Aggregato	Load conversion algoritm (Wiendahl, 1995)			
E	Workload control limit per workcentre	Numerico - discreto	70	140	210	280	
F	Release workload control method	Categoriale	WUL (Wiendahl, 1995)	WLB1 (Cigolini, Portioli, 2002)	WLB2 (metodo originale)	WLB3 (Fernandes e Silva, 2008)	
G	Lot splitting	Categoriale	Si	No			
H	Dispatching rule	Categoriale	FIFO (First In First Out)	EDD (Earliest Due Date)	TSPT (truncated shorter processing time)	CR (critical ratio)	OPNDD (Operation Due Date)

4.5.1 Periodo di rilascio, time limit e limiti di carico

Il Periodo di rilascio, il time limit ed il limite di carico superiore (*upper bound limit*) sono stati ampiamente delineati nelle sezioni precedenti di questa tesi. Il periodo di rilascio (fattore A) è qui espresso in giorni lavorativi e può assumere i valori 2, 5 e 7. In maniera analoga, anche il time limit (fattore B) è espresso in giorni lavorativi e può assumere i seguenti valori: 8, 14, 20. Il valore del limite di carico superiore (fattore E) è espresso come percentuale della capacità disponibile nel periodo di rilascio. I valori definiti sono 70, 140, 210 e 280.

4.5.2 Workload accounting

Il valore del carico diretto in ogni centro può essere valutato utilizzando l'approccio probabilistico e quindi il *load conversion algorithm* o seguendo l'approccio aggregato (fattore D) (per i dettagli si rimanda il lettore al capitolo 3).

4.5.3 Lot splitting

Benché sia uno strumento utilizzato di frequente nelle realtà produttive, come le BOMs, anche il lot splitting non è stato esaminato nella letteratura specialistica sul WLC. Nella modellazione proposta in questo lavoro, si è invece tenuto conto di tale fattore pur seguendo un approccio semplificato (fattore G). In particolare, se l'opzione di splitting è attiva nello scenario da simulare, allora il lotto sarà suddiviso in due sottolotti di uguali dimensioni che avanzano indipendentemente nel sistema produttivo. Ovviamente se il numero di codici riportato nell'ordine è dispari, i due sottolotti non potranno avere le stesse dimensioni (i.e. un lotto di dimensione 5 viene suddiviso in sottolotti di 2 e 3 unità). Lo splitting dei lotti avviene solamente nella fase del rilascio, quindi in pratica nel primo centro di lavoro previsto dal ciclo tecnologico. Non vi è invece splitting nelle operazioni intermedie. Il lotto viene ricomposto a valle quando entrambi i sottolotti hanno completato le lavorazioni.

4.5.4 Criteri di valutazione per il rilascio degli ordini

Come mostrato nel capitolo 2 e 3, esistono molteplici criteri per valutare il rilascio o meno dell'ordine. In questo lavoro si considerano un approccio di tipo *load bounding* (limitazione del carico) e tre approcci di tipo *load balancing* (fattore F). I diversi approcci sono presentati di seguito.

4.5.4.1 *Workload Upper Load Limit (WUL)*

E' lo stesso meccanismo utilizzato nel metodo LOOR (Wiendahal, 1995) che limita superiormente il carico; in questo lavoro assume l'acronimo WUL. Il carico di ogni centro di lavoro, calcolato secondo diverse logiche di load accounting (probabilistico o aggregato) viene confrontato con un valore massimo prestabilito definito come *load limit* (LL). In altre parole il carico di ogni centro di lavoro è vincolato "superiormente" e per questo viene detto *upper load limit*. Come avviene nel metodo LOOR, è consentito di rilasciare l'ordine solamente la prima volta che il limite di carico viene superato: in seguito a tale evento il centro di lavoro viene "congelato" e nessun ordine che prevede delle lavorazioni su questa risorsa può più essere rilasciato. Di seguito verranno presentati in maniera dettagliata tre criteri di rilascio degli ordini, appartenenti alla categoria di workload balancing, che seppur in maniera differente, hanno come obiettivo quello di incrementare il valore del bilanciamento globale delle risorse dell'intero sistema produttivo.

4.5.4.2 *Equazione di bilanciamento - Workload Balancing 1 (WLB1)*

In riferimento a quanto discusso riguardo i metodi per il controllo del carico (*bounding e balancing*, vedi capitolo 2 e 3), Cigolini e Portioli (2002) hanno sviluppato un meccanismo di workload balancing che considera il bilanciamento del carico di lavoro tra le risorse del reparto produttivo. Il controllo del carico non ottenuto attraverso un limite diretto, ma attraverso la minimizzazione di una funzione di bilanciamento che tiene conto del carico di lavoro globale del reparto. L'obiettivo del metodo è quello di rilasciare gli ordini in modo tale che la somma delle deviazioni tra limite di carico massimo e carico effettivo sia minimo. In altre parole un ordine può essere rilasciato anche se questo oltrepassa il limite di carico, purché contribuisca ad un maggior bilanciamento globale delle risorse.

L'equazione di bilanciamento (*Balancing Equation - BE*) da minimizzare è la seguente:

$$BE = \sum_i p_i * (LL_i - WL_i)^2$$

Dove:

- LL_i è il limite di carico per il centro di lavoro i ;
- WL_i è il carico di lavoro del centro i ;

- P_i : è la penalità dovuta a un sovra o sotto carico del centro di lavoro i

$$P_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } WLi \geq LLi \\ 1 & \text{if } WLi < LLi \end{cases}$$

Con $\alpha \geq 1$.

Quindi α_i rappresenta la penalità in cui si incorre nel consentire un sovraccarico di un'unità nel centro i piuttosto che incrementare il bilanciamento del carico dell'intero reparto. L'ordine i viene rilasciato solamente se questo migliora il bilanciamento complessivo, ossia se riduce il valore dell'equazione di bilanciamento. Nel proseguimento di questa tesi tale criterio verrà identificato con l'acronimo *WLB1* (Workload Balancing 1), poiché rappresenta il primo metodo di bilanciamento del carico valutato.

Descrizione metodo originale

Cigolini e Portioli (2002) nel loro studio valutano gli ordini contenuti nel pool e quindi l'equazione di bilanciamento secondo la data di rilascio pianificata (Planned Release Date – PRD) più prossima. Inoltre il carico diretto di ogni centro di lavoro è calcolato implementando il *load conversion algorithm*.

Tabella 16 –Metodo originale proposto da Portioli e Cigolini (2002)

Contabilizzazione del carico	Load conversion algorithm
Regole di priorità nella valutazione degli ordini rilasciabili	Planned Release Date (PRD)
Regola per il rilascio	WLB1: Minimizzazione di BE

In questo lavoro il metodo WLB1 sarà implementato sia nella versione originale descritta da Portioli e Cigolini (2002) quindi utilizzando l'approccio probabilistico per calcolare il carico diretto, ma anche impiegando l'approccio aggregato (come previsto da Hendry e Kingsman). Questo equivale a combinare i fattori D ed F del piano sperimentale proposto (Tabella 15). Inoltre come regola di prioritizzazione degli ordini nell'order pool verrà impiegata, oltre che PRD, anche il CR; questo equivale a combinare i fattori D, F e C (Tabella 15).

4.5.4.3 *Workload Balancing 2 (WLB2)*

Nel metodo proposto da Cigolini e Portioli, l'equazione di bilanciamento viene valutata per gli ordini rilasciabili (contenuti nell'orizzonte di pianificazione) secondo la loro priorità. Ad esempio, nel caso in cui la sequenza di priorità degli ordini è A, B, C e D, l'equazione verrà valutata prima per A, successivamente per B, poi C ed infine D. Così facendo non si considera la sequenza ottimale di rilascio. In questo lavoro viene proposta una modifica del tutto originale al algoritmo di Cigolini e Portioli (2002) della quale di seguito vengono riportati in dettaglio gli step operativi.

Step 1: Tutti gli ordini compresi nel *time limit* sono etichettati come urgenti e valutati per il rilascio.

Step 2: Sono valutate alcune possibili permutazioni degli ordini rilasciabili e viene calcolato il valore dell'equazione di bilanciamento totale (BE) Cigolini e Portioli (2002).

Se ad esempio gli ordini urgenti sono 4, esistono 12 differenti sequenze operative possibili in fase di valutazione del rilascio (ossia 4!).

- 1,2,3,4;
- 1,2,4,3;
- 2,1,3,4;
- 2,1,4,3;
-
-
- 4,3,2,1

Generalizzando, in presenza di n ordini urgenti, le sequenze possibili sono $n!$.

Step 3: Scelta casuale di k sequenze tra le n possibili. Al crescere di n , il numero di sequenze possibili aumenta molto rapidamente. Per motivi di natura tecnologica quali, tempo di calcolo e memoria richiesta per la simulazione, non è pensabile di valutare tutte le possibili permutazioni generate anche in presenza di un valore di n piuttosto limitato. Per questo motivo in quest a fase vengono scelte casualmente k permutazioni tra le n generate. La casualità della scelta preserva la robustezza del procedimento.

Step 4. Calcolo dell'equazione di bilanciamento per ognuna delle k sequenze e sottosequenze di rilascio degli ordini. Ad esempio, il BE per la prima sequenza (1,2,3,4) è:

BE1 sequenza 1	(rilascia 1)
BE1,2 sequenza 1	(rilascia 1 e poi 2)
BE1,2,3 sequenza 1	(rilascia 1, 2 e poi 3)
BE1,2,3,4 sequenza 1	(rilascia 1, 2, 3 e infine 4)

I primi 3 valori di BE sono delle sottosequenze della sequenza di rilascio 1.

Quindi $BE_{1,2,3,4,sequenza\ 1} = BE_{totale\ sequenza\ 1}$

Step 6: Rilascia la sequenza o la sotto sequenza che fornisce il BE minore.

4.5.4.4 **Indice di bilanciamento - Workload balancing 3 (WLB3)**

Fernandes e Silva (2008) hanno proposto un ulteriore meccanismo di rilascio facente parte della categoria del *workload balancing*. Il controllo del carico è ottenuto attraverso la valutazione dell'indice di bilanciamento delle risorse dell'intero reparto produttivo. Secondo gli autori “*workload balancing strategy may compensate for the fact that, when workload across capacity groups is poorly balanced, rigid upper workload limits for the heavily loaded resources may block the release of work to the under-loaded resources, introducing idle time*”. Anche in questo caso, un ordine viene rilasciato solamente se questo contribuisce positivamente al bilanciamento del reparto. Il carico di lavoro rilasciato può eccedere al massimo di una percentuale x prestabilita il limite superiore imposto per ogni risorsa prevista nel ciclo tecnologico dell'ordine. A seguito di una serie di valutazioni, Silva e Fernandes (2008) hanno posto tale valore pari al 20% (quindi un ordine che genera un carico totale pari al 120% del limite di carico non viene rilasciato anche se il suo rilascio induce un miglioramento del indice di bilanciamento).

L'indice di bilanciamento (BI) impiegato è il seguente:

$$BI = \frac{\sum_{i=1}^m WL_{ij}}{\max_i \{WL_{ij}\}m}$$

Dove WL_{ij} rappresenta il carico di lavoro del centro i dovuto al rilascio dell'ordine j , mentre m rappresenta il numero di centri del sistema produttivo. La situazione di bilanciamento ottimale si ottiene quando BI è pari a 1 (reparto completamente bilanciato).

Descrizione metodo originale

Come per Cigolini e Portioli (2002), anche Fernandes e Silva (2008) valutano gli ordini da rilasciare ordinando gli stessi secondo la data di rilascio pianificata (Planned Release Date) ed implementano il *load conversion method* (Bechte, 1988; Wiendahl, 1995) per la stima dei carichi diretti (Tabella 17).

Tabella 17 – Workload Balancing method utilizzato da Fernandes e Silva (2008)

Contabilizzazione del carico	Approccio probabilistico (Wiendahl, 1995)
Regole di priorità nella valutazione degli ordini rilasciabili	Planned Release Date (PRD)
Regola per il rilascio	WLB3: migliorare BI. Il load limit può essere superato di una data percentuale x.

Anche in questo caso, come per WLB1, WLB3 sarà implementato sia nella versione originale quindi utilizzando l'approccio probabilistico per calcolare il carico diretto, ma anche impiegando l'approccio aggregato. Inoltre come regola di prioritizzazione degli ordini nell'order pool verrà impiegata, oltre che PRD, anche il CR.

4.5.4.5 Riepilogo dei metodi per il rilascio proposti

La Tabella 18 riassume i quattro metodi impiegati nella fase di rilascio degli ordini. Si ricorda che gli ultimi tre fanno parte della categoria nota come workload balancing.

Tabella 18 –Metodi proposti per il rilascio degli ordini.

Acronimo	Categoria	Autore	Particolarità
WUL	Load bounding	Bechte (1988), Wiendahl (1995)	
WLB1	Load balancing	Cigolini e Portioli (2002)	$\alpha = 1$
WLB2	Load balancing	Modifica originale al metodo di Cigolini e Portioli (2002)	$\alpha = 1$
WLB3	Load balancing	Fernandes e Silva (2008)	Overload consentito 10% -20%

4.5.5 Regole di prioritizzazione degli ordini nel portafoglio ordini

Come visto esaminato nella sezione precedente, sia il metodo LOOR che quelli proposti da Cigolini, Portioli (2002) e Fernandes e Silva (2008) utilizzano la data di rilascio pianificata (PRD) come regola di priorità degli ordini contenuti nel portafoglio ordini. Ciò nonostante si possono impiegare svariate regole differenti. Nel modello di simulazione proposto in questo lavoro si sono considerate due differenti regole di priorità nel portafoglio ordini (Fattore C):

- data di rilascio pianificata (PRD)
- rapporto critico (Critical Ratio - CR)

Si noti che il tipo di regola di priorità utilizzata nel portafoglio ordini prima del rilascio non ha alcun effetto nel caso si applichi il criterio WLB2, poiché l'equazione BE da minimizzare viene valutata per sequenze diverse, ottenute mediante permutazioni e selezionate in maniera casuale. Quindi, in corrispondenza del livello 3 del fattore F (WLB2) il fattore C perde di significato (Tabella 15). La Tabella 19 riassume le combinazioni tra regole di priorità impiegate nel portafoglio ordini e i criteri di rilascio presentati.

Tabella 19 - Combinazioni tra regole di priorità nel portafoglio ordini e criteri di rilascio.

		Regole di priorità nel portafoglio ordini	
		PRD	CR
Criterio per il rilascio	WUL	X	X
	WLB1	X	X
	WLB2	-	-
	WLB3	X	X

Combinando le regole di priorità nel portafoglio ordini, il criterio di rilascio ed il metodo di contabilizzazione del carico nel tempo (aggregato o probabilistico), si ottiene un piano sperimentale con 16 combinazioni possibili (Tabella 20), di cui 4, in modo analogo a quanto detto in precedenza, perdono di significato.

Tabella 20 – Combinazioni possibili tra criterio di controllo del carico, il metodo di contabilizzazione del carico e regole di priorità nel portafoglio ordini.

Aggregato			
		Regole di priorità nel portafoglio ordini	
		PRD	CR
Criterio per il rilascio	WUL	X	X
	WLB1	X	X
	WLB2	-	-
	WLB3	X	X
Probabilistico			
		Regole di priorità nel portafoglio ordini	
		PRD	CR
Criterio per il rilascio	WUL	X	X
	WLB1	X	X
	WLB2	-	-
	WLB3	X	X

I tre fattori riportati in Tabella 20 sono parte degli 8 fattori che costituiscono il piano sperimentale totale implementato in questo lavoro (Tabella 15).

4.5.6 Regole di dispatching

Successivamente al rilascio, l'avanzamento dei materiali in produzione è gestito attraverso le regole di dispatching (fattore H). Nel modello proposto in questo lavoro sono state considerate cinque differenti regole di priorità:

- FIFO (First In First Out);
- EDD (Earliest Due Date);
- TSPT (Truncade Shortest Processing Time);
- CR (Critical Ratio);
- OPNDD (Operation Due Date).

Per informazioni di maggiore dettaglio sulle regole di dispatching si rimanda il lettore al capitolo 2.

4.5.7 Modello concettuale

Una volta pervenuti, gli ordini cliente non sono rilasciati immediatamente, ma attendono nel portafoglio ordini dove vengono ordinati secondo alcune regole di priorità (fattore C). Gli ordini con data di rilascio pianificata (PRD- Planned Release Date) compresa in un certo orizzonte temporale (*Time Limit* – Fattore B), sono etichettati come urgenti e quindi teoricamente rilasciabili. Il tempo che intercorre tra due fasi di rilascio successive è dato dal periodo di pianificazione o di rilascio (fattore A). All'istante t del rilascio, gli ordini urgenti vengono ordinati per priorità secondo una delle due seguenti regole (fattore C):

- Data di rilascio pianificata più prossima (PRD)
- Critical Ratio (CR).

Tali valori vengono definiti partendo dalla data di completamento dell'ordine prevista (DD), calcolata dinamicamente seguendo il procedimento presentato in una delle sezioni precedenti. All'istante t di rilascio, seguendo le priorità definite dal fattore D, viene valutato il carico di lavoro generato dall'ordine in esame nelle risorse previste dal suo ciclo tecnologico. I metodi impiegati per la contabilizzazione dei carichi (fattore E) sono quello aggregato (Tatsiopoulos, 1983; Hendry, 1989) e il metodo probabilistico (Wiendahal, 1995) già

ampiamente discussi nei capitoli precedenti. Se il contenuto di lavoro imputabile all'ordine in fase di valutazione soddisfa alcuni "criteri limite", l'ordine viene rilasciato. I criteri di rilascio sono (fattore G):

- limite superiore – WUL - (Workload Upper Limit) (Becthe, 1988; Wiendahal, 1995);
- metodi che tengono conto del bilanciamento del sistema (WLB - Workload Balance):
 - minimizzazione dell'equazione di bilanciamento - WLB1 (Cigolini, Portioli, 2002);
 - minimizzazione dell'equazione di bilanciamento modificato tenendo conto della sequenza di rilascio - WLB2;
 - massimizzazione dell'indice di bilanciamento del sistema - WLB3 - (Fernandes e Silva, 2008).

Il fattore corrispondente al limite di carico (LL) (fattore E) può assumere i seguenti valori: 70, 140, 210 e 280. Tali valori sono espressi come percentuale di carico rispetto la capacità disponibile nel periodo di riferimento. Ad esempio, LL=140 significa che il limite di carico equivale al 140% della capacità disponibile. Se il criterio limite non è rispettato, l'ordine deve attendere nel portafoglio ordini la fase di rilascio successiva. Una volta effettuato il rilascio, il carico di lavoro di ogni centro previsto dal ciclo tecnologico dell'ordine viene aggiornato sommando al carico iniziale la quota parte dovuta all'ordine in questione. La procedura è ripetuta fintantoché non sono stati valutati tutti gli ordini etichettati come urgenti. In seguito al rilascio, l'avanzamento dei materiali in produzione è gestito attraverso le regole di dispatching (fattore H).

4.6 Dal piano sperimentale ai piani simulativi

Il piano sperimentale è costituito da 8 fattori che presentano un diverso numero di livelli. La Tabella 15 riporta la combinazione dei livelli di tutti i fattori. Come affermato nella sezione precedente, il fattore B "perde di significato" in concomitanza del livello WLB2 del fattore F. Difatti, il metodo WLB2, valutando le varie sequenze ottenute partendo dalle permutazioni degli ordini, prescinde dalle regole di prioritizzazione adottate nel pool. Per questo motivo, è necessario generare due piani sperimentali differenti. Il primo considera i livelli WUL, WLB1 e WLB3 del fattore F assieme ai due livelli del fattore C (Tabella 21), mentre il secondo valuta solamente il livello WLB2 e non tiene conto del fattore F (Tabella 22). La significatività

statistica dei fattori sperimentali è stata valutata utilizzando il piano in Tabella 21 (li include tutti).

Tabella 21 – Piano sperimentale escludendo WLB2.

Fattore	Descrizione	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
A	Release period in giorni	2	5	8		
B	Time limit in giorni	8	14	20		
C	Order pool sequence rules	PRD	CR			
D	Workload accounting	AGG	PROB			
E	LL per workcentre	70	140	210	280	
F	Release workload control method	WUL	WLB1	WLB3		
G	Lot splitting	Si	No			
H	Dispatching rules	FIFO	EDD	TSPT	CR	OPNDD

Tabella 22 – Piano sperimentale per WLB2.

Fattore	Descrizione	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
A	Release period in giorni	2	5	8		
B	Time limit in giorni	8	14	20		
D	Workload accounting	AGG	PROB			
E	LL per workcentre	70	140	210	280	
G	Lot splitting	Si	No			
H	Dispatching rules	FIFO	EDD	TSPT	CR	OPNDD

L'analisi dei piani fattoriali completi richiederebbe 4320 prove nel primo caso e 750 nel secondo, ossia pari al prodotto del numero di livelli di ogni fattore (i.e. $3*3*2*2*4*3*2*5 = 4320$ prove e $3*3*2*4*2*5=750$ prove). Data la notevole complessità del modello simulativo, un numero così elevato di prove richiederebbe uno sforzo computazionale notevole sia in termini di memoria che di tempo di calcolo. Si consideri, infatti, che ogni scenario, ossia ogni

run di simulazione, impiega mediamente 3.000 secondi, utilizzano nel caso specifico un calcolatore equipaggiato con processore core2 quad da 2,5 Ghz e 16gb di ram.

Gli esperimenti fattoriali completi pongono, in molte situazioni sperimentali problemi di costo e di tempo per la loro realizzazione. E' allora possibile ricorrere ai piani frazionati che necessitano per l'analisi di un numero inferiore di osservazioni. Tuttavia lo svantaggio dei piani fattoriali frazionati risiede nel fatto che gli effetti di alcuni fattori o interazioni risultano confusi con altri fattori o interazioni. Per ridurre drasticamente il numero di prove senza tuttavia perdere eccessive informazioni si è proceduto alla definizione di due piani D-ottimali, utilizzando il software Design-Expert® 8 (by Stat-Ease, Inc. - Minneapolis, MN) (Vaughn, *et al.*, 2010). Il piano D-ottimale risultante relativo alla Tabella 21 è costituito di 131 runs, mentre quello relativo la Tabella 22 consta di 95 runs. Per un esame completo dei piani simulativi, si rimanda il lettore a consultare le tabelle contenute in appendice (Appendice B). Per cogliere l'aspetto stocastico del modello, dato dalla distribuzione del tempo di lavorazione, si sono simulate 5 repliche per ogni runs. In totale quindi sono state effettuate 665 simulazioni nel primo caso e 475 nel secondo.

4.7 Variabili dipendenti: risposte sperimentali

Al fine di valutare l'impatto dei vari parametri del modello è necessario selezionare alcuni indicatori di prestazione. In questo lavoro sono state identificate 10 variabili di risposta o misure di prestazione operative che non includono tuttavia indici legati ai costi, come ad esempio il costo di mantenimento delle scorte o il costo di servizio al cliente. Ciò è legato principalmente alla difficoltà di una loro corretta stima. Le misure di prestazione considerate possono essere suddivise in 2 categorie. La prima riguarda le misure *shop oriented* (Cigolini e Portioli, 2002; Moreira e Alves, 2010) ed in particolare (1) il Mean Shop Utilization (MSU), (2) il Mean Shop Flow Time (MSHFT), (3) il Mean System Flow Time (MSYFT), (4) il Mean Shop WIP level (MSHW) e (5) il Mean System WIP level (MSYW). La seconda categoria comprende le misure di prestazione *job oriented* o legate alla data di consegna ed in particolare: (6) Mean Lateness (ML), (7) Mean Tardiness (MT), (8) Percentage of Tardy jobs (PT), (9) Lateness Deviation (LD) e (10) Tardiness Deviation (TD). La Tabella 23 riassume le misure di prestazione raccolte nelle simulazioni ed i rispettivi acronimi.

Tabella 23 – Indicatori di prestazione considerati nello studio.

	Acronimo	Misure Shop oriented
1	MSU	Mean Shop Utilization
2	MSHFT	Mean Shop Flow Time
3	MSYFT	Mean System Flow Time
4	MSHW	Mean Shop WIP level
5	MSYW	Mean System WIP level
	Acronimo	Misure job/DD oriented
6	ML	Mean Lateness
7	MT	Mean Tardiness
8	PT	Percentage of Tardy jobs
9	LD	Mean Lateness Deviation
10	TD	Mean Tardiness Deviation

Di seguito, sono descritti gli indicatori di prestazione impiegati nel modello.

I. *Mean shop utilization (MSU)*

L'utilizzo medio del reparto è un indicatore fondamentale nella valutazione delle prestazioni di un job shop.

$$MSU = \sum_{j=1}^n MSU_j$$

Dove MSU_j è l'utilizzo medio del centro di lavoro j .

II. *Mean shop flow time (MSTF)*

Il Shop Flow Time (SFT) dell'ordine i è il tempo che intercorre tra il rilascio dell'ordine e il suo completamento, ossia:

$$SFT_i = OCD_i - RD_i$$

Dove:

- OCD_i (Order Completion Date) = data di completamento dell'ordine i ,
- RD_i (Order Release Date) = data di rilascio dell'ordine i .

Quindi il job shop flow time medio degli n ordini considerati risulta:

$$MSFT_i = \frac{\sum_{i=1}^n (OCD_i - RD_i)}{n}$$

III. *Mean total flow time (MTFT) o mean system flow time (MSYFT)*

Il *Total flow time* dell'ordine i (TFT_i) è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'inserimento dell'ordine nel portafoglio ordini ed il suo completamento:

$$TFT_i = OCD_i - ED_i$$

Dove:

- OCD_i (Order Completion Date) = data di completamento dell'ordine i ,
- ED_i (Order Entry Date) = data di inserimento dell'ordine i .

Quindi il total flow time medio degli n ordini considerati risulta:

$$MTFT = \frac{\sum_{i=1}^n (OCD_i - ED_i)}{n}$$

IV. *Mean Shop WIP level (MSHW)*

Questo indicatore misura tutto il carico di lavoro rilasciato presente nel job shop

V. *Mean System WIP level (MSYW)*

Questo indicatore misura tutto il carico di lavoro rilasciato presente nel sistema, dato dalla somma del carico nel portafoglio ordini e di quello rilasciato nel job shop.

VI. *Mean Lateness (ML)*

Il lateness dell'ordine i (L_i) è dato da:

$$Lateness (L_i) = OCD_i - DD_i$$

Dove:

- OCD_i (Order Completion Date) = data di completamento dell'ordine i ,
- DD_i (Due Date) = Data di consegna prevista dell'ordine i .

Il lateness indica il ritardo di consegna di un job i rispetto alla data di consegna prevista: se si verifica che $OCD_i > DD_i$. Se $L_i < 0$, il job i è terminato in anticipo rispetto a quanto fissato.

Il lateness medio (ML) degli n ordini considerati risulta:

$$ML = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}$$

VII. *Mean Tardiness (MT)*

Il tardiness dell'ordine i (T_i) è dato da:

$$Tardiness (T_i) = \max\{0; L_i\}$$

Il tardiness indica l'effettivo ritardo di consegna di un job i ; se il job è consegnato on time o in anticipo, il tardiness vale 0.

Il tardiness medio (MT) degli n ordini considerati risulta:

$$MT = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

VIII. *Percentage of late delivery job (PT_r) - Percentuale di job consegnati in ritardo*

Definita una variabile booleana x_i , per $i = 1, \dots, n$, che assume valore 1 se il job i è in ritardo ($T_i > 0$), 0 se l'ordine i è on time o in anticipo ($T_i = 0$), la percentuale dei job che terminano il ciclo tecnologico oltre la data di consegna è:

$$PT_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

IX. *Lateness deviations (LD)*

Indica la deviazione standard del lateness degli n job considerati.

$$LD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - ML)^2}{n}}$$

X. *Tardiness deviation (TD)*

Indica la deviazione standard del tardiness degli n job considerati.

$$TD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - ML)^2}{n}}$$

4.8 Simulazione

4.8.1 Validazione del modello simulativo

Tramite appositi moduli *add-in* sviluppati ad hoc, il software di simulazione è in grado di generare dinamicamente la struttura dei prodotti, e dei centri, il layout produttivo e l'arrivo degli ordini, interfacciandosi ad un database che contiene i dati in input. Data l'estensione del database, è impensabile infatti definire manualmente, all'interno software, tutti i legami esistenti tra i codici, gli ordini ed i centri di lavoro, poiché lo sforzo richiesto sarebbe enorme. Una procedura automatizzata di creazione del modello di simulazione garantisce inoltre di eliminare gli errori di inserimento dei dati, frequenti nella compilazione diretta. Per validare il modello simulativo e gli *add-in* si è proceduto alla generazione e alla simulazione di una struttura produttiva teorica composta solamente da tre centri di lavoro e di un numero limitato di ordini. I 2 codici di prova sono caratterizzati da una distinta base semplice a 3 livelli di materiali. È stato possibile in questo modo valutare la bontà del modello simulativo. Una volta validato il modello di simulazione, il modello produttivo aziendale definitivo è stato generato dinamicamente caricando il database ottenendo così l'intero sistema produttivo che include la struttura completa dei centri di lavoro e dei prodotti (distinta base), la distribuzione degli ordini cliente e il calendario dell'azienda.

4.8.2 Periodo di simulazione e di inizializzazione

La simulazione inizia ad ogni run con il sistema produttivo completamente "scarico". È necessario quindi uscire dalla fase transitoria affinché si possano raccogliere valori corretti delle misure di prestazione. A tal proposito è stato impostato un periodo di inizializzazione (*warm-up*) per consentire al sistema di andare a regime. Per mezzo di alcune simulazioni test è stato constatato che un periodo di *warm-up* pari a 8 settimane è sufficiente a superare il transitorio. Giunti alla nona settimana, le grandezze statistiche raccolte dal simulatore vengono quindi inizializzate e incomincia la raccolta effettiva dei dati (Figura 31).

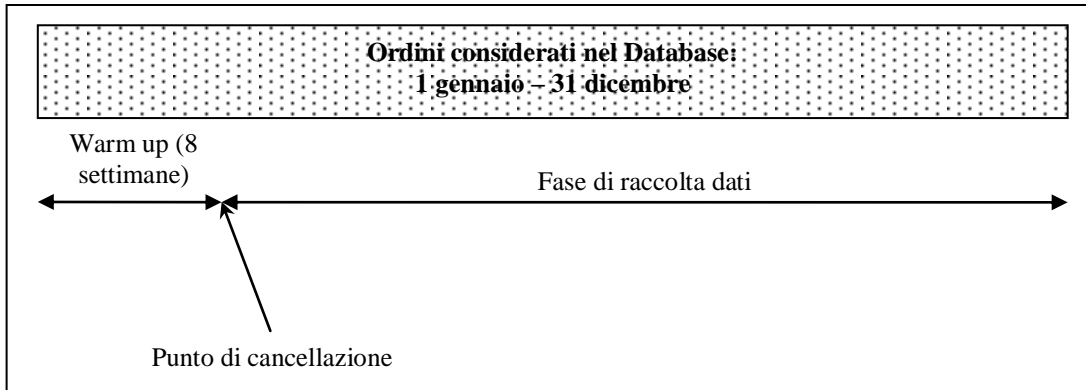


Figura 31 – Periodo di simulazione e di warm up.

Capitolo 5 - Risultati

In questo capitolo sono presentati l'analisi statistica dei risultati sperimentali, i limiti principali dello studio e le indicazioni per gli sviluppi futuri della ricerca.

5.1 Overview dei risultati

La Tabella 24 riassume i risultati dell'analisi del piano D-ottimale e riporta la significatività statistica degli otto fattori, relativamente alle dieci misure di prestazione considerate (per la consultazione dei risultati sperimentali si rimanda il lettore all'appendice). Si è dapprima analizzato il piano dei risultati simulativi utilizzando una *backwards stepwise regression*¹³ con un valore di α -out pari a 0,05. In seguito è stata ripetuta la stessa analisi riducendo il livello di severità all'uscita dei fattori, ponendo α -out pari a 0,1. La Tabella 24 riporta i risultati ottenuti tramite le due analisi di regressione successive.

Tabella 24 – Risultati della significatività statistica dei fattori ottenuti con *backwards stepwise regression* ($\alpha=0,1$ e $\alpha=0,05$).

	Risposta sperimentale	Dispatching rule	Order pool sequence rule	Lot splitting	Release rules	Load limit	Time limit	Load accounting method	Release period
1	MSU	*	**	**	**	**	**	--	--
2	MSHFT	--	*	**	**	**	**	--	--
3	MSYFT	**	*	**	**	*	**	--	--
4	MSHW	**	--	**	**	**	**	--	--
5	MSYW	*	--	**	**	--	**	--	--
6	ML	--	--	**	**	*	**	--	--
7	MT	**	--	**	**	**	**	--	--
8	PTJ	**	--	**	**	**	**	--	*
9	LD	*	**	**	**	**	**	*	**
10	TD	**	*	**	**	**	**	*	--

* significativo per $\alpha=0,1$
 ** significativo per $\alpha=0,05$

¹³ La stepwise regression è una tecnica per scegliere le variabili, ovvero i termini, da includere in un modello di regressione multipla. Il metodo di forward stepwise regression inizia con nessun termine, ed ad ogni step include i termini statisticamente più significativi (quelli con statistica F più elevata), fino a che nessun termine rimane. Il metodo di backward stepwise regression inizia con tutti i termini e rimuove quelli che sono meno significativi, fino a che non restano solo quelli significativi.

La presenza di due asterischi nelle caselle della Tabella 24 indica che il fattore è statisticamente significativo per la risposta sperimentale relativa con un α pari a 0,05, mentre la presenza di un asterisco indica che il fattore è statisticamente significativo per la risposta sperimentale relativa con un α pari a 0,1. Ad esempio le regole di dispatching sono risultate statisticamente significative rispetto al MSU con un valore di alfa pari 0,1 e al MSYFT con un alfa di 0,05. Di seguito viene riportata l'analisi della significatività statistica dei vari fattori.

5.1.1 Load accounting method

Dalla Tabella 24 è evidente che il metodo di contabilizzazione dei carichi (*load accounting method*) non è risultato essere statisticamente significativo per nessuno degli indicatori di prestazione considerati con un α pari a 0,05. Tuttavia, in corrispondenza di un α -out pari a 0,1 il *load accounting method* è significativo in relazione alla deviazione del tardiness e del lateness. Questo risultato (la limitata significatività del fattore) è alquanto sorprendente poiché negli ultimi anni, numerosi lavori hanno affrontato il tema delle prestazioni specifiche del metodo probabilistico e di quello aggregato (i.e. Lawrence *et al.*, 2010). Come già discusso ampiamente nel capitolo 3, secondo questi studi, l'efficacia dei due metodi dipende fortemente dalle caratteristiche del sistema produttivo in cui vengono implementati ed in particolar modo dalla struttura del flusso dei materiali. In particolare secondo Osteermann *et al.* (2000) il metodo probabilistico è più appropriato ed efficace nel caso di una struttura produttiva simile alla definizione teorica di *pure job shop*, mentre quello aggregato nel caso di *flow shop*. Secondo Fernandes e Silva (2010) l'approccio LOOR, che impiega il metodo probabilistico per la stima del carico diretto, consente di ottenere prestazioni superiori rispetto al LUMS (aggregato) per qualsiasi valore imposto ai limite di carico. Al contrario, lo studio simulativo di Perona e Portioli (2002) dimostra che l'approccio aggregato, pur nella sua grande semplicità di funzionamento e di implementazione, ottiene prestazioni del tutto comparabili a quello probabilistico: “*Results show that the behavior of these methods (workload limit) does not depend very much on the workload accounting over time approach adept*”.

Una possibile interpretazione del risultato qui determinato (la limitata significatività statistica del metodo di contabilizzazione del carico) può essere ricondotta al fatto che questo lavoro simula una struttura produttiva che rappresenta fedelmente un sistema manifatturiero reale, quindi indiscutibilmente di maggiore complessità rispetto ai modelli impiegati nella gran parte degli studi disponibili in letteratura. In particolare, la differenza più rilevante con gli altri

lavori consiste nella struttura della distinta base di prodotto che è stata introdotta nel modello tenendo in considerazione integralmente i legami tra i codici e i vari cicli tecnologici. Si può supporre quindi che *la presenza di una distinta base profonda e complessa riduce notevolmente le criticità legate alla scelta del metodo di contabilizzazione dei carichi*, al contrario di quanto evidenziato in numerose ricerche.

5.1.2 Periodo di pianificazione

L'analisi statistica dei dati mostra che il *periodo pianificazione* è significativo solamente rispetto a due risposte sperimentali: alla percentuale di ordini terminati in ritardo (PTJ) con un α pari a 0,1 e alla deviazione del lateness (LD) con α pari a 0,05 (Tabella 24). Questo risultato è in disaccordo con quanto riscontrato nel lavoro di Fernandes e Silva (2010) per cui il release period influenza il tempo di attraversamento del sistema. E' importante sottolineare tuttavia, che il periodo di pianificazione, seppur non significativo come effetto principale, diventa significativo nelle interazioni con numerosi altri fattori. Si può concludere quindi che *il release period è un parametro critico che deve essere valutato opportunamente nell'implementazione del metodo WLC*.

5.1.3 Regole di ordinamento nel portafoglio ordini

L'analisi statistica dei dati evidenzia che la sequenza con cui vengono valutati gli ordini nel portafoglio per il rilascio (order pool sequence rules) è significativa rispetto a cinque indicatori di prestazione considerati. In particolare è significativo rispetto all'MSU e al LD con un α pari a 0,05 e rispetto il MSHT, il MSYT e il TD con un α pari a 0,1. Questo risultato è in accordo con quanto riportato in diversi studi. Secondo Lingayat *et al.* (1995) il limite del carico è un parametro più importante rispetto alla sequenza con cui vengono selezionati gli ordini per il rilascio.

5.1.4 Lot splitting

L'analisi dei risultati dimostra che lo splitting dei lotti, successivo alla fase di rilascio, è statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati. Inoltre, anticipando ciò che verrà evidenziato in seguito nell'analisi dei dati, il lot splitting ha un effetto positivo su tutti gli indici di prestazione considerati, confermando quanto già più volte evidenziato in diverse ricerche simulative e riportato in molti testi di Operations Management

(i.e. Silver *et al.*, 1998). Quindi, l'applicazione del lot splitting in produzione rappresenta una buona pratica anche all'interno del WLC.

5.1.5 Regole di rilascio

Le regole impiegate per il rilascio degli ordini rappresentano il cuore del WLC e uno dei parametri chiave del modello presentato in questa tesi. Dall'analisi dei risultati sperimentali si evince che le regole di rilascio degli ordini sono statisticamente significative per tutti gli indici di prestazione considerati con un valore di α pari a 0,05. Questo risultato evidenzia nuovamente *la criticità insita nella scelta del criterio per il rilascio degli ordini all'interno dei metodi di Workload Control*. Secondo Cigolini e Portioli (2002) i metodi appartenenti alla categoria di *workload balancing*, ed in particolare quello da loro proposto (WLB2), sono più performanti rispetto a quelli che limitano direttamente il carico (*workload bounding*). Un risultato analogo è riportato nel lavoro di Fernandes e Silva (2008). Tali risultati verranno approfonditi e discussi nelle prossime sezioni.

5.1.6 Time limit

Dall'analisi dei risultati sperimentali si evidenzia che il *time limit*, ossia l'intervallo di tempo entro il quale gli ordini sono valutati per il rilascio, è statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati con un valore di α pari a 0,05. In letteratura, il *time limit* è noto essere uno dei parametri di funzionamento del WLC maggiormente critici (Cigolini e Portioli, 2002; Wiendahal, 1995). L'unica eccezione è rappresentata dal lavoro di Fernandes e Silva (2008).

5.1.7 Limite di carico

L'analisi dei dati sperimentali mostra che l'effetto del limite di carico è statisticamente significativo per nove degli indicatori di prestazione considerati. La significatività è relativa ad un alfa pari a 0,05, tranne che per il mean lateness e il tempo di attraversamento medio del sistema. L'effetto del limite di carico non è risultato invece statisticamente significativo per il livello di work in process del sistema (MSYW). In generale, tale risultato è in accordo con quanto riportato nel lavoro di Fernandes e Silva (2010) secondo cui il limite di carico influenza direttamente il *System Flow Time* e il *Shop Flow Time* (in misura ancora maggiore), ma non impatta sul MSYW.

5.1.8 Regole di dispatching

L'analisi statistica dei risultati sperimentali evidenzia che le regole di dispatching impiegate hanno un effetto statisticamente significativo su ben 8 dei 10 indicatori di prestazione considerati. Tale risultato è in disaccordo con diversi studi presenti in letteratura. Molti lavori enfatizzano il principio secondo cui, in presenza di code stabili e limitate, la tipologia di regola di priorità impiegata non influenza le prestazioni del sistema (i.e. Shimoyashiro *et al.*, 1984; Land e Gaalman, 1998; Bechte, 1988; Nicholson e Pullen, 1971; Bobrowsky e Park, 1989). Secondo alcuni autori “...*the concept of WLC favors the use of simple priority rules*” (Land, 2009). Alcuni studi concludono che le prestazioni del sistema produttivo sono influenzate in misura maggiore dalle regole di rilascio rispetto a quelle di dispatching (i.e. Sabuncuoglu e Karapinar 2000). La discordanza dei risultati potrebbe essere legata al differente grado di complessità del sistema produttivo analizzato. Difatti i risultati ottenuti in questo lavoro sono in accordo con un recentissimo studio di Soepenbergh *et al.* (2010) che riporta quanto segue: “*when complexity of orders increases, it should be questioned whether limiting potential of prioritizing on the shop floor is desirable. When e.g. routings are long it is difficult to control the total order flow at release, since arrivals at downstream operations can still be affected by many factors, and will thus be subject to high uncertainty. This uncertainty is even increased with converging flows in assembly type situations, which may increase the pressure to release early*”. Una possibile interpretazione del risultato qui determinato può essere ricondotta al fatto che la complessità introdotta della distinta base, in termini sia di legami tra codici, che di cicli e di flusso di materiali, rende indispensabile una gestione più evoluta delle priorità nell'avanzamento dei materiali rispetto alla semplice regola first-come-first-served. Altri studi invece evidenziano che le regole di dispatching sono un elemento particolarmente critico nella gestione di un job shop ed influenzano le prestazioni dei meccanismi di rilascio (Ragatz e Mabert, 1988; Enns e Progue Costa, 2002; Lygayart *et al.* 1992). Secondo Moreira and Alves (2009) l'utilizzo dell'Earliest Due Date consente di ottenere prestazioni superiori rispetto al First In First Out. Infine, secondo Sabuncuoglu e Karapinar (2000) le prestazioni delle varie regole di priorità dipendono fortemente dalla natura del sistema produttivo e dal mix di prodotto.

5.2 Interazioni tra i fattori

In questa sezione verranno introdotte le interazioni tra fattori e la loro significatività statistica. Le tabelle sotto riportano la significatività statistica delle interazioni a due fattori in ottenuta tramite la *backwards stepwise regression* con α pari a 0,05. Si nota immediatamente che il numero di interazioni a due fattori significative è notevole. Questo risultato è in accordo con quanto evidenziato da Rosario Moreira e Alves (2006) e introduce molteplici implicazioni. Da una parte il WLC risulta essere un modello relativamente articolato quando viene implementato in un ambiente manifatturiero complesso. Inoltre la definizione dei valori ottimali dei parametri di funzionamento non è diretta poiché sussistono molteplici interazioni tra i fattori. Inoltre anche gli effetti principali dei singoli fattori sono influenzati fortemente dalle interazioni esistenti. Per lo stesso motivo, l'analisi statistica degli effetti principali risulta decisamente complicata. Considerando anche i risultati di lavori precedenti, il numero e la magnitudine delle interazioni tra fattori sembrano essere direttamente collegate alla complessità del sistema manifatturo ed in particolare alla struttura della distinta base e del flusso di materiali.

L'analisi dei risultati dimostra che vi è un'interazione statisticamente significativa tra meccanismi di rilascio degli ordini e regole di dispatching in corrispondenza di diverse risposte sperimentali. Questo risultato è in linea con quanto riportato nel lavoro di Gentile e Rogers (2009). Nella parte successiva verrà sviluppata un'analisi di dettaglio dei vari fattori, riportandone oltre che gli effetti principali anche le loro interazioni. L'analisi viene presentata seguendo l'ordine delle risposte sperimentali. L'effetto principale di ogni fattore viene valutato impostando gli altri fattori sul valore medio (una specifica funzionalità del software di analisi consente la gestione di tale aspetto).

<i>Mean tardiness (MT)</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--		**			**		
PS		--						
LS			--	**			**	
RR				--	**	**		
LL					--		**	**
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>Tardiness Deviation (TD)</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--	**		**		**		
PS		--						
LS			--	**	**			
RR				--	**	**		
LL					--		**	
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>Mean Lateness (ML)</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--			*	**	**		**
PS		--						
LS			--	**				
RR				--		**		**
LL					--			
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>Lateness Deviation (LD)</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--					**		
PS		--						
LS			--	**	**	**	**	
RR				--	**	**		**
LL					--	**	**	
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>PTJ</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	X					**		
PS		X						
LS			X	**		**		
RR				X	**			**
LL								**
TH						X		**
AM							X	**
RP								X
$\alpha=0,05$								

<i>MSU</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	X		**		**	**		
PS		X						
LS			X	**	**	**		
RR				X	**	**		
LL					X	**		
TH						X		
AM							X	
RP								X
$\alpha=0,05$								

<i>MSFT</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--		**			**		
PS		--						
LS			--	**	**			
RR				--	**	**		
LL					--	**		
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>MTFT</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--			**		**		
PS		--						
LS			--	**		**		
RR				--	**	**		
LL					--	**		
TH						--		**
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>MSHW</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	RP
DR	--			*	**	**		**
PS		--				**		
LS			--	**		**		
RR				--	**	**		
LL					--	**		**
TH						--		
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>MSYW</i>								
	DR	PS	LS	RR	LL	TH	AM	R
DR	--		**			**		
PS		--			**			
LS			--	**		**		
RR				--	**	**	**	
LL					--			**
TH						--		**
AM							--	
RP								--
$\alpha=0,05$								

<i>Legenda</i>	
–	DR: dispatching rule
–	PS : pool sequence rule
–	LS: lot splitting
–	RR : Release rule
–	LL : load limit
–	TH : time horizon
–	AM: accounting method
–	RP : release period

5.2.1 MT – Mean Tardiness

Il mean tardiness è influenzato direttamente da 5 fattori sperimentali. Tuttavia considerando le interazioni di secondo ordine, si può notare come tutti i fattori considerati contribuiscano, seppur in maniera combinata, alla variazione del MT. La Tabella 25 riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa out pari a 0,1. Il modello di regressione è statisticamente significativo (P-value < 0,0001).

Tabella 25 - Risultati dell'analisi di regressione per il MT ($\alpha=0,1$).

Source	F Value	p-value Prob > F
Model	60,76	< 0,0001
A-Load accounting	0,82	0,3671
C-Dispatching rules	2,12	0,0276
D-Lot splitting	7,18	0,0093
E-Release rule	344,24	< 0,0001
F-Time Horizon	748,42	< 0,0001
G-Release period	0,51	0,6032
H-Load Limit	8,40	< 0,0001
AD	4,41	0,0395
AH	6,06	0,0010
CD	9,22	< 0,0001
CF	6,80	< 0,0001
DE	18,55	< 0,0001
EF	26,96	< 0,0001
EH	6,54	< 0,0001
GH	2,24	0,0502

Il limite di carico ha un effetto statisticamente significativo sul MT (p-value < 0,0001), seppur l'entità sia ridotta. Come era facilmente ipotizzabile MT aumenta al crescere del limite di carico imposto, poiché al crescere del valore del carico rilasciato la congestione del reparto aumenta (Figura 32). Il valore dell'effetto che il limite di carico ha sul MT è ridotto poiché l'algoritmo impiegato per determinare la data di consegna aggiorna dinamicamente il lead time atteso per l'ordine in base allo stato contingente del sistema (vedi capitolo 4).

L'analisi dei dati evidenzia un'interazione statisticamente significativa tra il limite di carico e la regola di rilascio impiegata (p-value < 0,0001) (Figura 33). In particolare il MT risulta più robusto al variare del LL (ossia riporta variazioni minori) in concomitanza all'impiego di regole appartenenti alla categoria del workload balancing (WLB1 e WLB3) rispetto ad un limite diretto del carico (WUL). Difatti come si può notare della Figura 33, il mean tardiness relativo al livello WUL, varia di molto in funzione del LL. In riferimento al MT, si può concludere quindi che i metodi di load balancing consentono di ottenere un sistema più robusto alla variazione del limite di carico. Tale risultato è in accordo a quanto riportato nel lavoro di Cigolini e Portioli (2002).

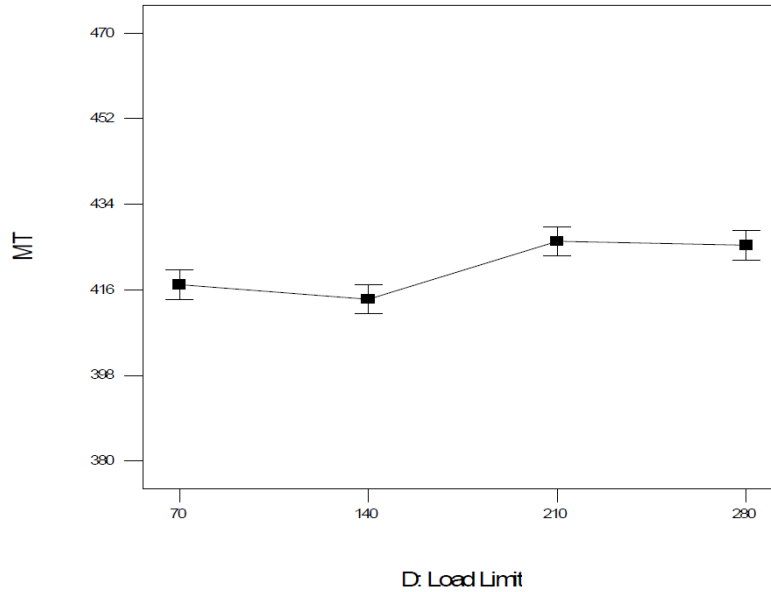


Figura 32 - Effetto del LL sul MT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

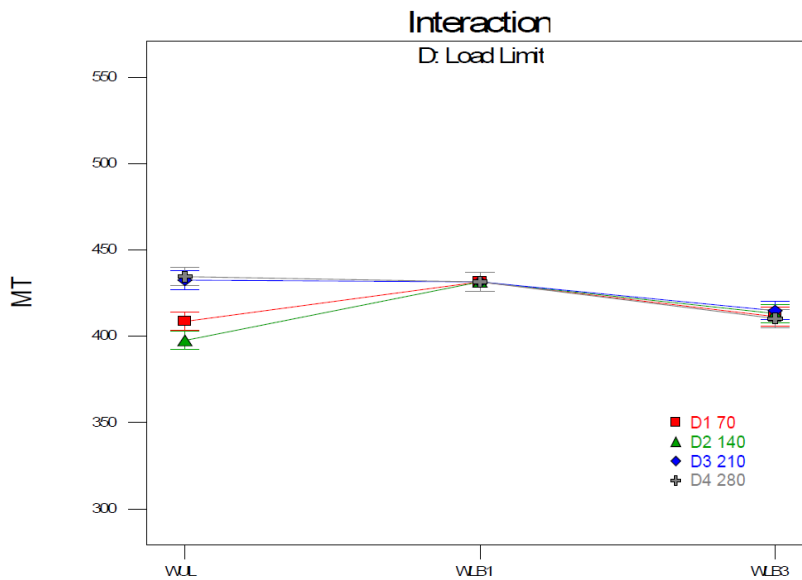


Figura 33 – Interazione tra LL e accounting method. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo sul MT (p-value <0,0001). Come mostrato dalla Figura 34, il mean tardiness è minore in corrispondenza di WUL e WLB3, mentre è maggiore per WLB1. Considerando congiuntamente sia l'effetto principale che la robustezza del metodo (appena argomentato sopra), WLB3 presenta le prestazioni migliori in termini di mean tardiness.

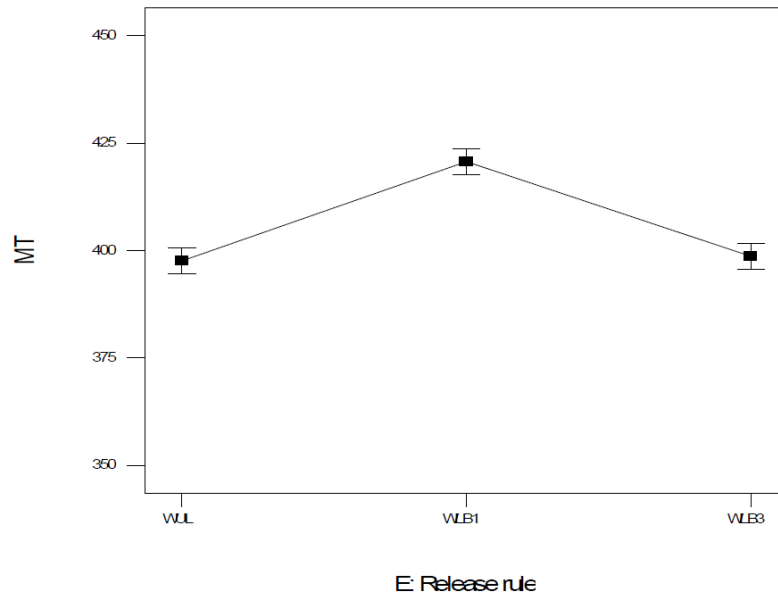


Figura 34 - Effetto del LL sul MT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

Come affermato nella parte introduttiva dell'analisi, il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati inducendone un generale miglioramento.

A differenza di quanto sostenuto da più autori, l'analisi dei risultati sperimentali mostra chiaramente che le regole di dispatching hanno un effetto statisticamente significativo sul MT (p-value =0,0276).

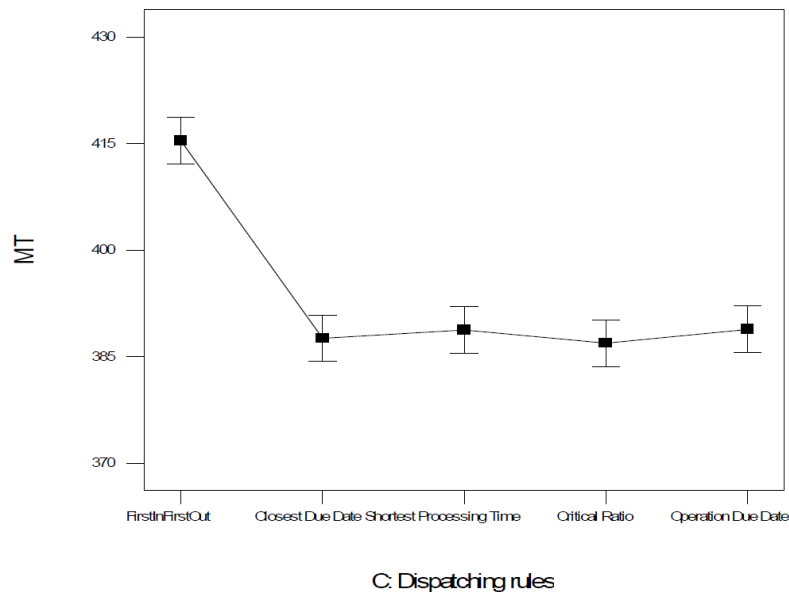


Figura 35 - Effetto delle dispatching rules sul MT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

Secondo Moreira e Alves (2009) il Mean tardiness si riduce utilizzando la CDD (closet due date) anziché il FIFO. Per Soempenberg *et al.* (2010) la regola SPT minimizza il MT. Secondo Melnik *et al.* (1994) la SPT consente di ottenere prestazioni superiori rispetto tutte le altre regole di dispatching relativamente a tutte le misure di prestazione. I risultati simulativi qui determinati evidenziano che la regola FIFO riporta i risultati peggiori in termini di MT (Figura 35). Le altre regole di priorità testate presentano invece prestazioni paragonabili. Diversi autori sostengono che l'effetto e quindi la criticità legata alla scelta delle regole di dispatching diminuisce quando le code nel reparto produttivo sono mantenute ridotte e costanti attraverso il rilascio controllato degli ordini. Tuttavia in un contesto in cui la complessità degli ordini e dei prodotti è elevata, non è sempre opportuno precludersi i benefici derivanti dall'impiego di opportune regole di priorità. *La presenza di distinte base relativamente profonde ed il legame tra i codici, nonché operazioni di assemblaggio dove convergono più materiali rende indispensabile l'utilizzo di regole che tengano conto della data di consegna dell'ordine. La rapidità con cui ogni sub-ordine (costituito dai codici figli) attraversa il reparto produttivo può essere variata applicando delle regole di priorità che tengano conto della data di consegna come la ODD (order due date), la CDD (closet due date) e il CR (critical ratio).*

5.2.2 ML - MeanLateness

La Tabella 26 riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa-out pari a 0,1. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p-value < 0,0001).

Tabella 26 – Risultati dell'analisi di regressione per il ML ($\alpha=0,1$).

Source	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
<i>Model</i>	4278,43	152,89	< 0,0001
B-order pool sequence rule	1,18	0,04	0,8377
C-priority rules	605,65	21,64	< 0,0001
D-lot splitting	341,61	12,21	0,0009
E-Release rule	16956,45	605,96	< 0,0001
F-TimeHorizonDays	62713,63	2241,14	< 0,0001
H-Load Limit	24,98	0,89	0,0499
AH	95,69	3,42	0,0224
BC	434,92	15,54	< 0,0001
BE	268,91	9,61	0,0002
BH	117,09	4,18	0,0091
CE	150,30	5,37	< 0,0001
CF	269,46	9,63	< 0,0001
CH	56,00	2,00	0,0385
DE	441,71	15,79	< 0,0001
HF	2555,16	91,31	< 0,0001
EH	213,16	7,62	< 0,0001

Così come evidenziato per il mean tardiness, l'analisi dei dati sperimentali evidenzia che il limite di carico ha un effetto statisticamente significativo anche sul lateness medio (p-value = 0,0499). Tuttavia l'effetto è molto ridotto, poiché come già sottolineato in precedenza l'algoritmo impiegato per la determinazione della data di consegna prevista aggiorna dinamicamente il lead time atteso dell'ordine in base allo stato contingente del sistema. Per questo motivo non deve stupire il fatto che il mean lateness non cresce sensibilmente all'aumentare del LL (Figura 36).

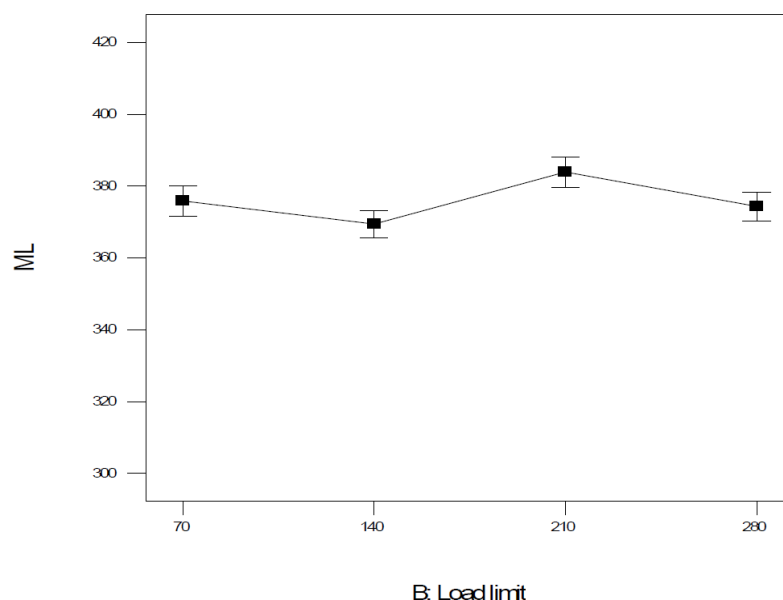


Figura 36 - Effetto del LL sul ML. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

Così come per il mean tardiness, anche in questo caso il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo sul ML (p-value = 0,0009). In particolare lo splitting dei lotti riduce il mean lateness.

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo (p-value < 0,0001) sul ML. Il mean lateness è minimo in corrispondenza del metodo WUL e massimo per WLB1, analogamente a quanto osservato precedentemente per il MT. Poiché l'obiettivo principale dei metodi di load balancing è quello di assicurare un adeguato bilanciamento globale delle risorse, questi possono talvolta trascurare le prestazioni legate al timing dell'ordine, poiché consentono il superamento di una quota parte del limite di carico imposto per le risorse. Con riferimento ai risultati sperimentali

il metodo di bilanciamento sviluppato da Cigolini e Portioli (2002) (WLB1) ha riportato i risultati peggiori in termini di ML (Figura 37).

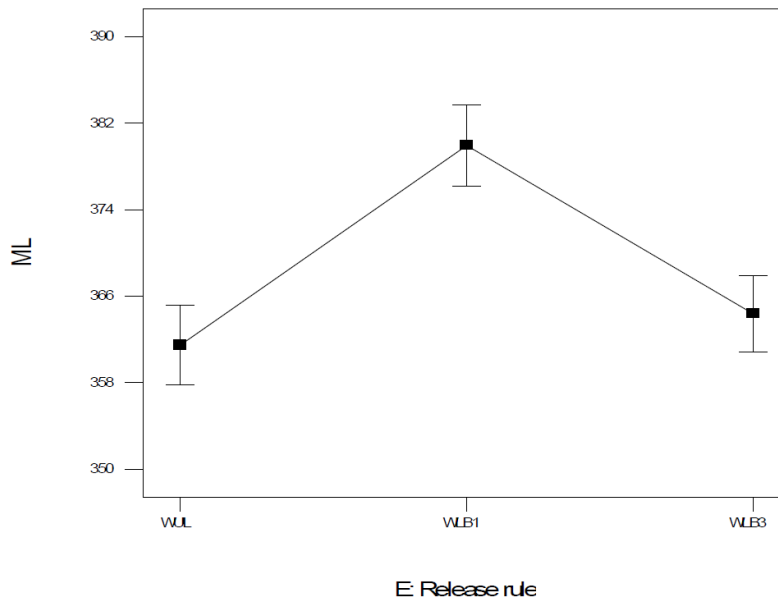


Figura 37 - Effetto delle regole di rilascio sul MT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei dati dimostra che l'interazione tra limite di carico e time horizon è statisticamente significativa ($P\text{-value} < 0,0001$) (Figura 38). In particolare è interessante notare come all'aumentare del time horizon si riduce la variazione del mean lateness dovuta al LL. Infatti, in corrispondenza di $TH=20$ giorni, il valore del ML rimane pressoché costante al variare di limite di carico. Utilizzando un time horizon esteso il ML diminuisce ed il modello diventa meno sensibile, e quindi più robusto, al valore dei limiti di carico imposti.

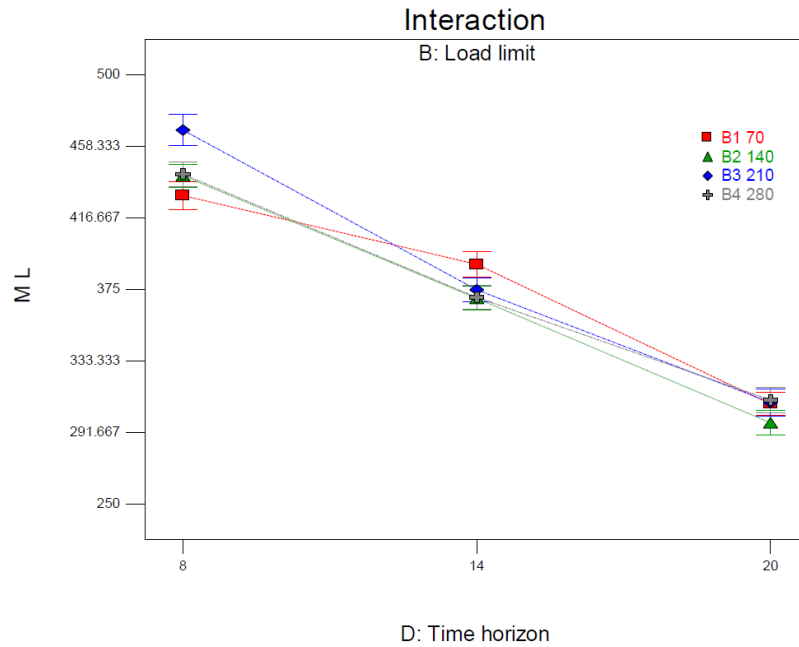


Figura 38 - Interazione tra time horizon e limite di carico relativamente al ML.

5.2.3 TD -Tardiness Deviation

L'analisi dei risultati evidenzia che il valore della regola di rilascio ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sulla deviazione del tardiness. La TD è minima in corrispondenza di WLB3 e massima per WUL (Figura 39).

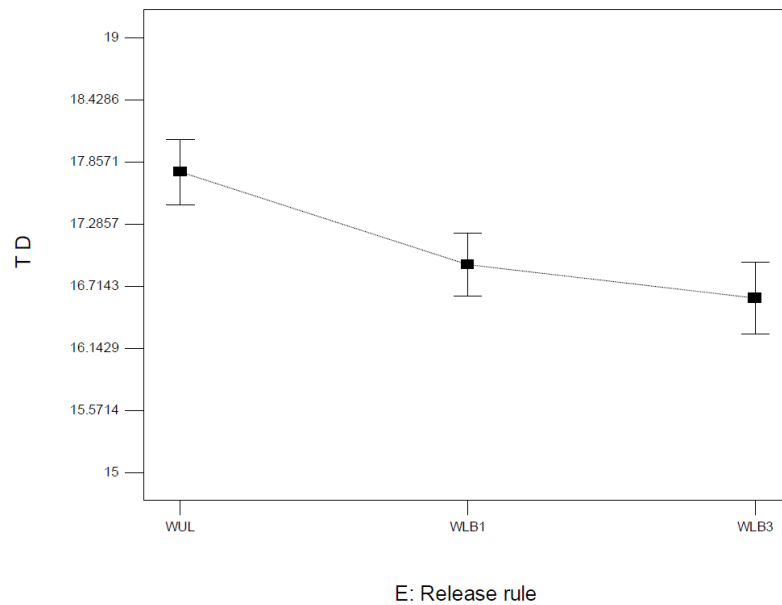


Figura 39 - Effetto delle regole di rilascio sul TD. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati evidenzia che le regole di dispatching hanno un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} = 0,01$) sulla deviazione del tardiness. Il TD è minimo in corrispondenza della regola Operation Due date e massimo per il First-In-First-Out. (Figura 40). Considerando anche il precedente risultato si può notare che in generale le regole di dispatching hanno un effetto più sensibile (in valore assoluto) sulla variazione del TD rispetto alle regole di rilascio. Questa evidenza è in accordo con quanto sostenuto nella maggior parte dei lavori di carattere simulativo sul tema del WLC.

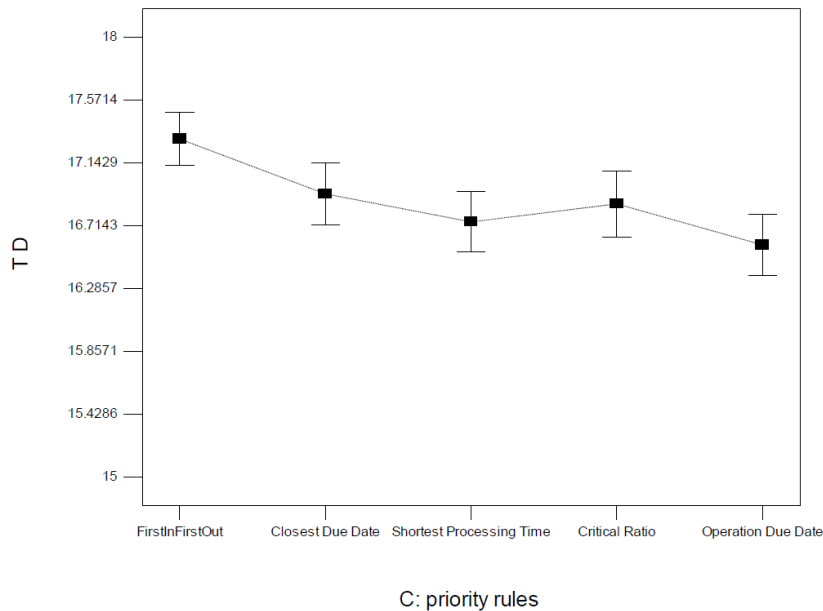


Figura 40 - Effetto delle regole di dispatching sul PTJ. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati evidenzia che il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sulla deviazione del tardiness. Dal confronto della Figura 41 con le due precedenti si evince come lo splitting dei lotti abbia un effetto sul TD nettamente superiore rispetto sia a quello delle regole di rilascio e che di dispatching. Come già affermato più volte in precedenza, in generale, i risultati sperimentali dimostrano che il lot splitting porta ad un notevole incremento delle prestazioni relativamente a tutti gli indicatori di prestazioni considerati.

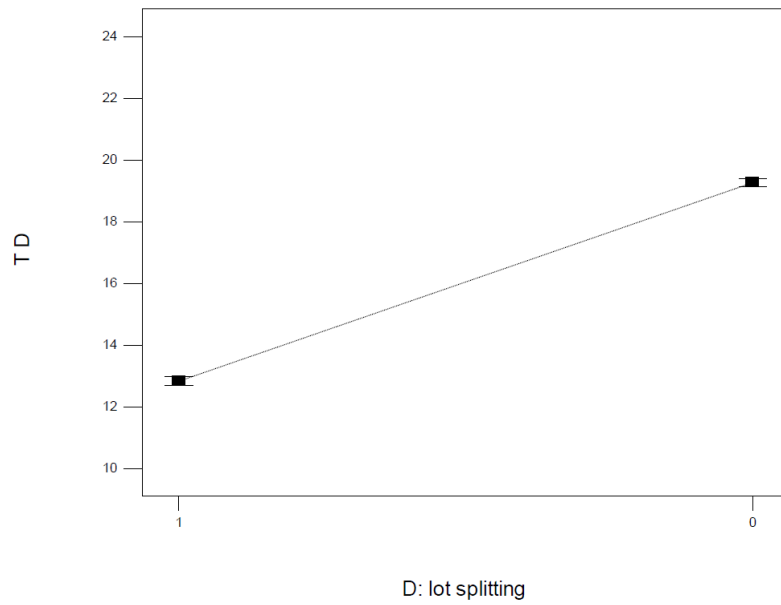


Figura 41 - Effetto del lot splittingo sul TD. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

5.2.4 LD – Latenes Deviation

L’analisi dei risultati sperimentali evidenzia che regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} = 0,003$) sulla deviazione del lateness. Anche in questo caso come per il TD, la regola WLB3 ha ottenuto i risultati migliori, seguita da WLB1 e infine da WUL.

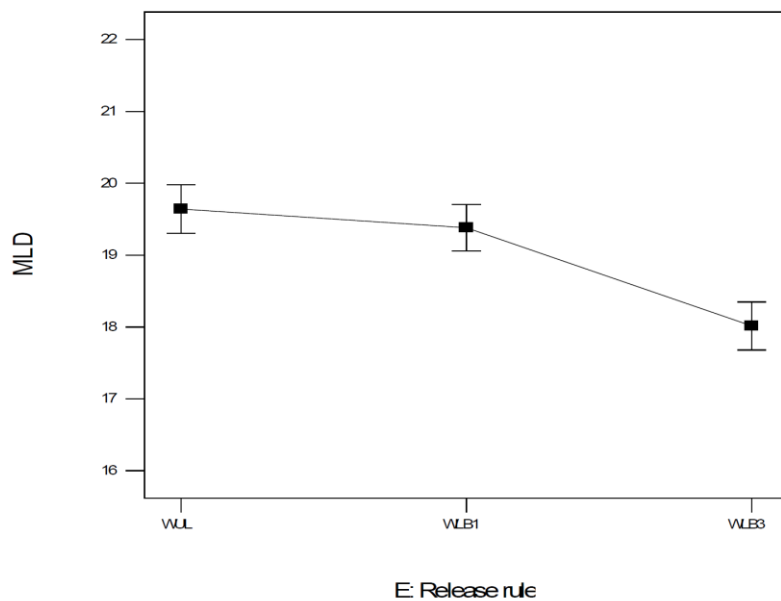


Figura 42 - Effetto delle regole di rilascio sul LD. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati evidenzia che il valore del limite di carico ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sulla deviazione del lateness. Il LD aumenta al crescere del valore del limite di carico (Figura 43).

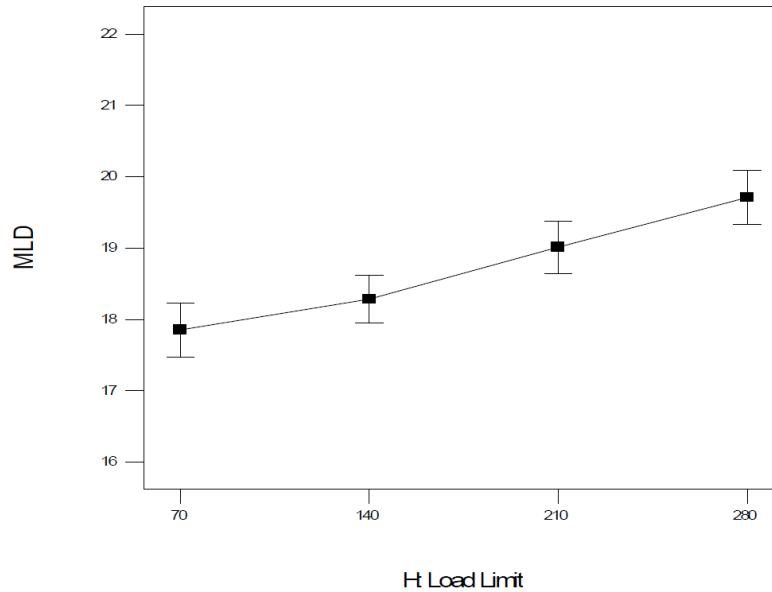


Figura 43 - Effetto delle regole di dispatching sul LD.

L'analisi dei risultati evidenzia che il valore del periodo di rilascio ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,03$) sulla deviazione del lateness. Il LD è minimo in corrispondenza del valor medio assunto dal periodo di rilascio, ossia 5 giorni (Figura 44). In accordo con quanto riportato da Cigolini e Portioli (2002), il periodo di rilascio deve assumere un valore conforme al sistema, che non sia quindi né troppo ridotto né eccessivamente esteso. Considerando l'interazione tra periodo di rilascio e time horizon ($p\text{-value} = 0,031$) si evince che la variazione del lateness è minima in corrispondenza di un valore del periodo di rilascio pari a 8 giorni (Figura 45). La variabilità è massima in corrispondenza di un periodo di rilascio di 7 giorni. La Figura 45 evidenzia che il lateness è massimo in corrispondenza di un periodo di rilascio di 7 giorni e un orizzonte temporale di 8 giorni.

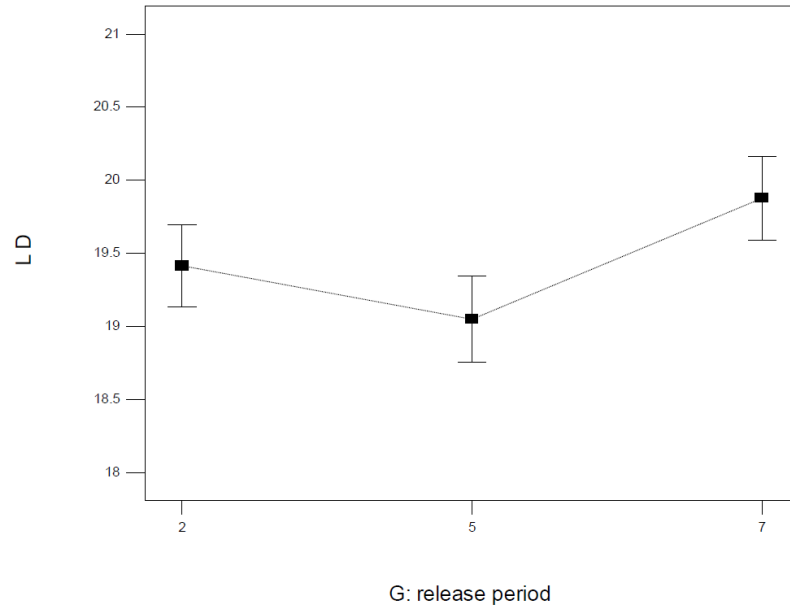


Figura 44 Effetto del periodo di rilascio sul LD. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

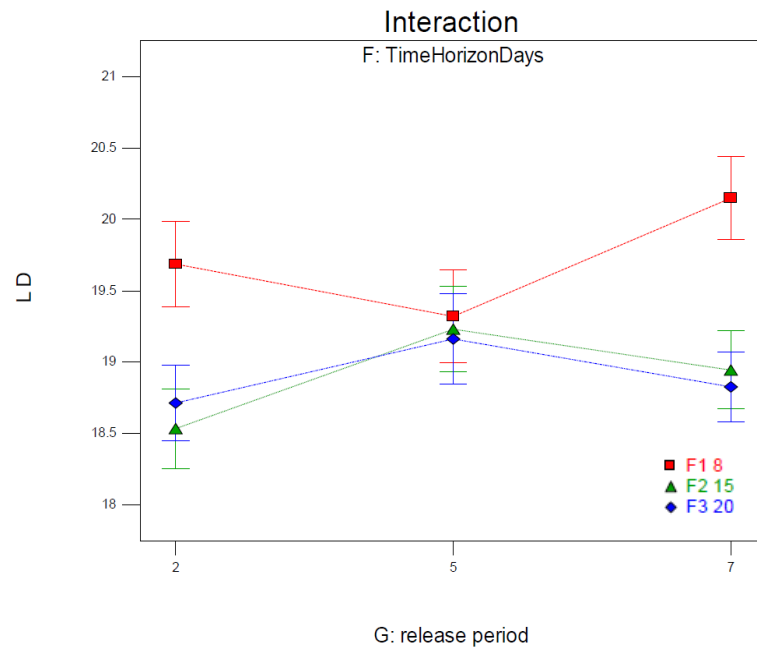


Figura 45 - Interazione tra periodo di rilascio e time horizon relativamente al LD Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

5.2.5 PTJ – Percentage of tardy job

La Tabella 27 riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa-out pari a 0,1. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 27 - Risultati dell'analisi di regressione per PTJ ($\alpha=0,1$).

Source	F- Value	p-value Prob > F
Model	36,77586	< 0.0001
A-Load accounting	1,408614	0.2395
B-Order pool sequence rule	2,580608	0.1130
C-Dispatching rules	2,104838	0.0401
D-Lot splitting	61,98316	< 0.0001
E-Release rule	3,945855	0.0241
F-Time Horizon	681,911	< 0.0001
G-Release period	2,623929	0.0801
H-Load Limit	0,981447	0.03070
AG	5,02529	0.0093
BE	2,449943	0.0941
BF	3,446154	0.0377
CF	4,478208	0.0002
DE	11,18228	< 0.0001
DF	15,03142	< 0.0001
EF	1,428248	0.2344
EG	5,262371	0.0010
EH	11,5537	< 0.0001
FG	5,044704	0.0013
FH	2,711855	0.0205
GH	1,734655	0.1267

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo (p-value = 0,024) sul PTJ che risulta minimo in corrispondenza di WLB3 e massimo per WUL (Figura 46).

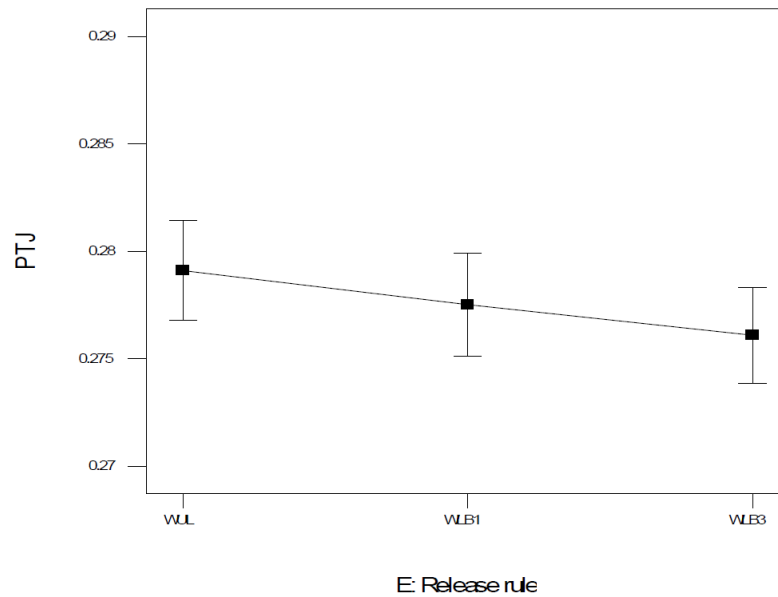


Figura 46 - Effetto delle regole di rilascio sul PTJ. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che regole di dispatching hanno un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} = 0,04$) sulla percentuale di job consegnati in ritardo (Figura 47).

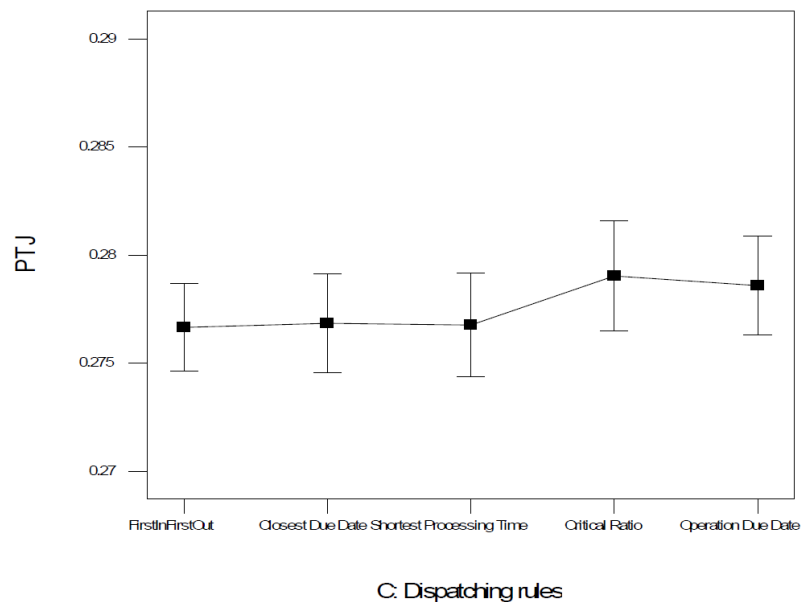


Figura 47 - Effetto delle regole di dispatching sul MT.

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul PTJ. In particolare come si evince dalla Figura 48 la percentuale di ordini terminati in ritardo si riduce quando lo split dei lotti è attivo.

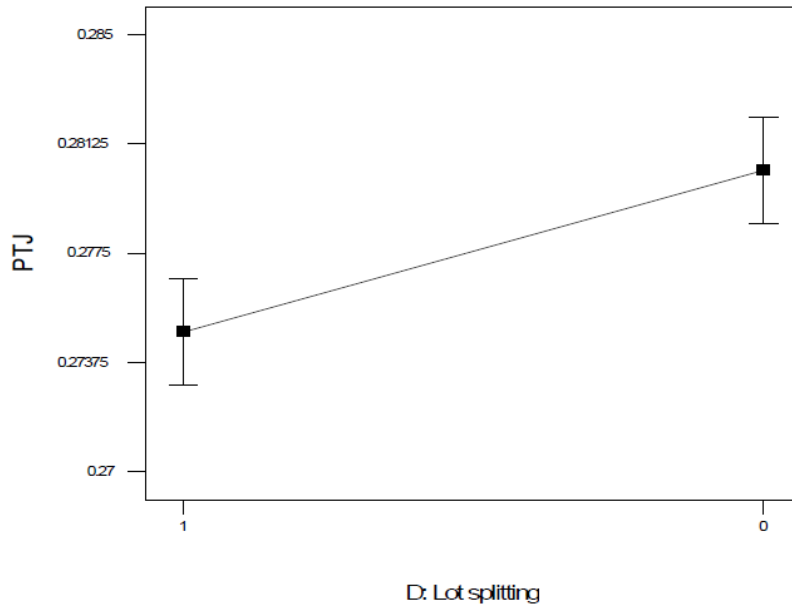


Figura 48 Effetto del lot splitting sul PTJ. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

5.2.6 MSU – Mean Shop Utilization

La Tabella 28 sotto riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa out pari a 0,1 relativamente all’MSU. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 28 - Risultati dell’analisi di regressione per MSU ($\alpha=0,1$).

Source	F - Value	p-value Prob > F
Model	44,96978	< 0,0001
B-Order pool sequence rule	5,716465	0,0197
C-Dispatching rules	1,118714	0,0452
D-Lot splitting	361,412	< 0,0001
E-Release rule	46,20401	< 0,0001
F-Time Horizon	809,2745	< 0,0001
H-Load Limit	1,472152	0,0302
AE	2,620794	0,0803
CD	4,798703	0,0019
CF	3,447729	0,0022
CH	2,669845	0,0055
DE	10,15546	0,0001
DF	31,81155	< 0,0001
DG	3,83295	0,0266
EF	8,548652	< 0,0001
EH	12,54907	< 0,0001
FH	3,24561	0,0074

L'analisi dei risultati sperimentali mostra che il limite di carico ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value}=0,0302$) sull'utilizzo medio delle risorse. In particolare all'aumentare del LL vi è un incremento meno che lineare del MSU (Figura 49). E' interessante notare come per un valore del limite di carico superiore a 140 il livello di utilizzo medio delle risorse aumenta di poco. Ricordiamo che un LL pari a 140 equivale ad avere nel reparto produttivo una quantità di lavoro rilasciato pari al 140% della capacità disponibile nel periodo di riferimento.

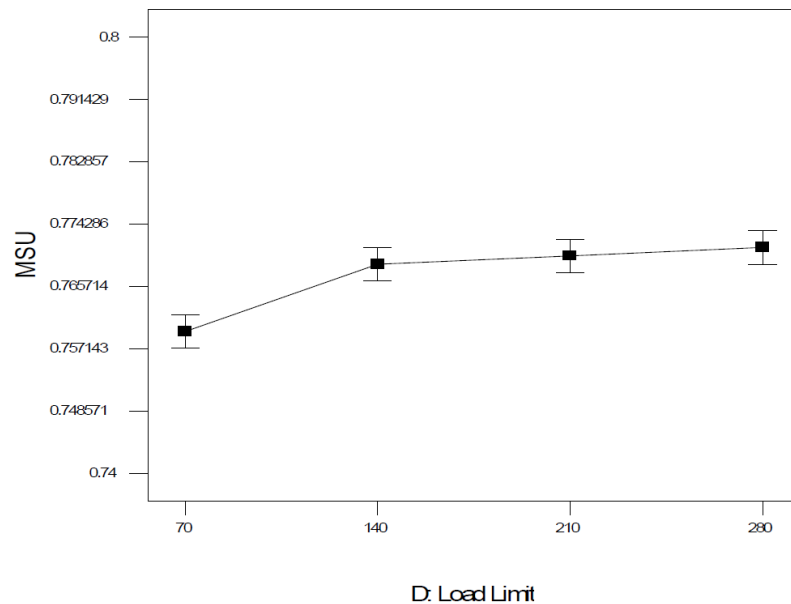


Figura 49 - Effetto del limite di carico sul MSU. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'interazione tra limite di carico e regola di rilascio risulta statisticamente significativa ($p\text{-value} < 0,0001$). In particolare, i metodi WLB1 e WLB2 sono più robusti alle variazioni del LL in termini di MSU (Figura 50). Una possibile interpretazione del risultato qui determinato può essere ricondotta al fatto che questi metodi appartengono alla classe di load balancing. E' interessante notare inoltre che in corrispondenza di WLB1 e WLB2 non vi sono miglioramenti significativi di MSU per limiti di carico superiori a 140 (Figura 50). Nel caso si implementi WUL, invece, si osserva un incremento significativo del MSU anche passando da un limite di carico di 140 a 210. Ciò avviene poiché WUL è più rigoroso, rispetto al load balancing, nel rispetto dei limiti di carico imposti.

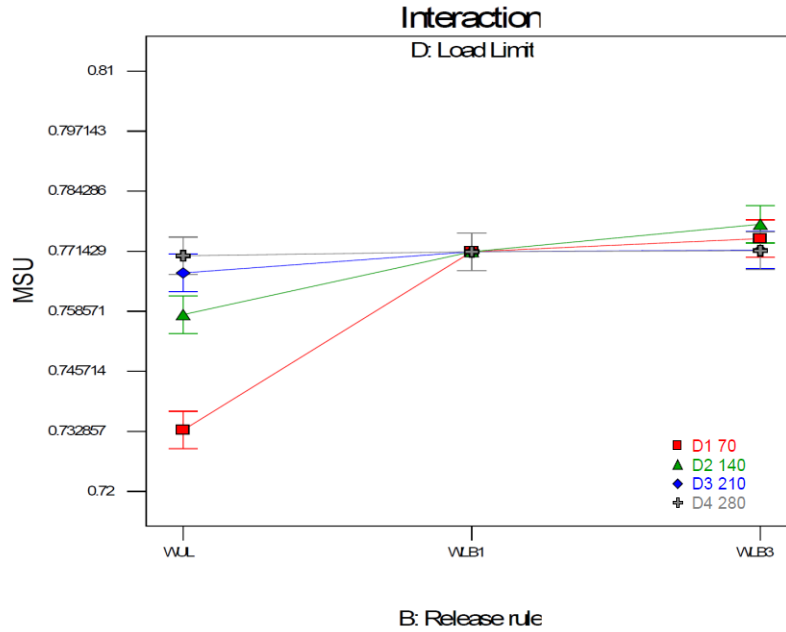


Figura 50 – Interazione tra regole di rilascio e limite di carico relativamente al MSU.

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio degli ordini hanno un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sull'utilizzo medio del reparto (MSU). Come intuibile i metodi appartenenti alla categoria di load balancing (WLB1 e WLB3) consentono di ottenere un MSU superiore rispetto al WUL (Figura 51). Il metodo WLB3 proposto da Fernandes e Silva (2008) ha riportato il valore dell'utilizzo medio maggiore.

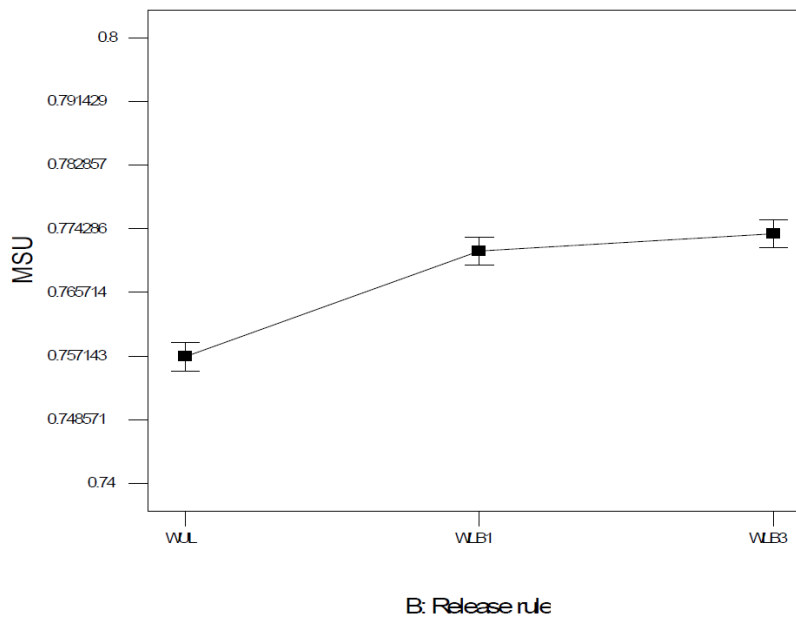


Figura 51 – Effetto delle regole di rilascio sull'MSU. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

5.2.7 MSFT – Mean Shop Flow Time

La Tabella 29 riporta i risultati della regressione backwards stepwise con alfa out pari a 0,1 relativamente al tempo di attraversamento medio del reparto. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 29 Risultati dell'analisi di regressione per l'MSFT ($\alpha=0,1$).

Source	F - Value	p-value Prob > F
Model	25,60344	< 0,0001
B-Order pool sequence rule	3,058844	0,0846
C-Dispatching rules	0,355346	0,04
D-Lot splitting	2,332535	0,1311
E-Release rule	249,1108	< 0,0001
F-Time Horizon	197,4011	< 0,0001
G-Release period	0,773351	0,4653
H-Load Limit	6,767956	0,0004
BH	2,378779	0,0769
CD	5,799775	0,0004
CF	2,962129	0,0064
CG	1,960487	0,0641
DE	15,69684	< 0,0001
DH	4,202913	0,0085
EF	15,95492	< 0,0001
EH	9,653879	< 0,0001
FH	3,812514	0,0024

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo (p-value < 0,0001) sul tempo di attraversamento medio del reparto (MSFT). L'MSU minore è stato ottenuto in corrispondenza della regola WUL (Figura 52). E' interessante notare come tali risultati siano complementari a quelli relativi al livello di utilizzo del reparto (MSU), dove la regola WUL ha ottenuto le prestazioni inferiori. I valori del livello di utilizzo medio del reparto del tempo di attraversamento medio sono direttamente proporzionale, come descritto dalla nota legge di Little. Le regole WLB1 e WLB3, orientate al conseguimento di un trade-off tra limite di carico e bilanciamento delle risorse, appaiono necessariamente più deboli nella limitazione del carico, determinando così prestazioni inferiori in termini di tempo di attraversamento del reparto (Figura 52).

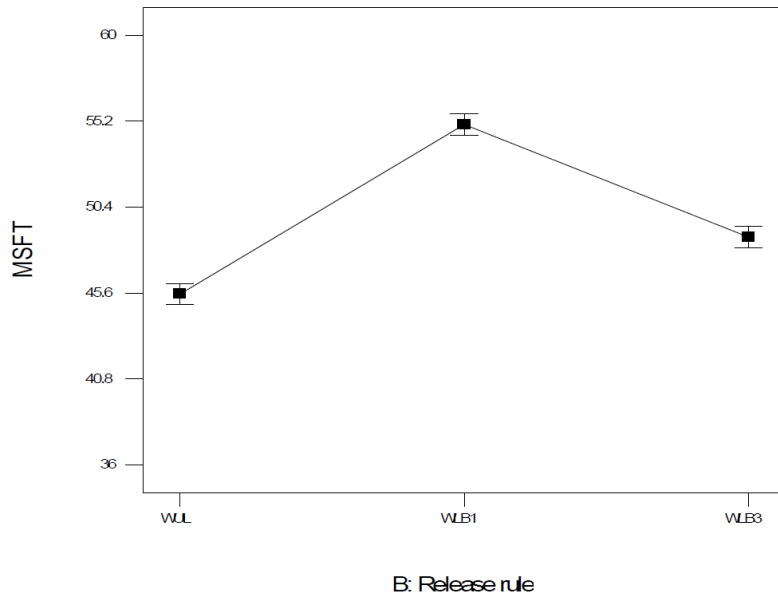


Figura 52 – Effetto delle regole di rilascio sull’MSFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L’analisi dei risultati sperimentali evidenzia un’interazione statisticamente significativa tra la regola di rilascio e time horizon (P-value <0,0001). Il tempo di attraversamento è minore in corrispondenza della regola WUL, mentre aumenta per WLB2 e WLB3. La differenza tra i valori di prestazione ottenuti dalle diverse regole aumenta all’aumentare del valore del time horizon. È interessante notare che in corrispondenza di un TH pari a 20 giorni, la regola WLB3 riporta il MSFT minore.

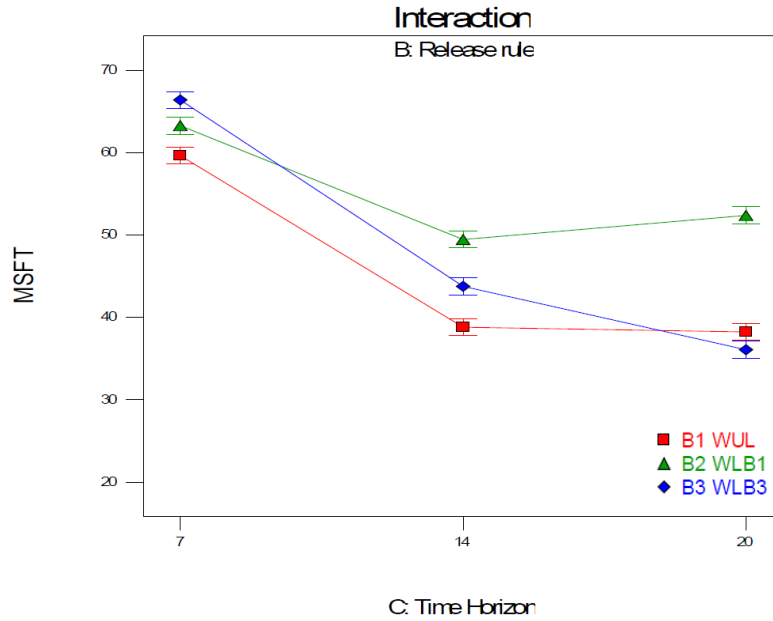


Figura 53 - Interazione tra time horizon e regole di rilascio relativamente al MSFT.

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che il time horizon ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul tempo di attraversamento medio del reparto. Mentre la riduzione del MSFT è notevole passando da 8 a 14 giorni, l'effetto diventa trascurabile passando da 14 a 20 giorni (Figura 54).

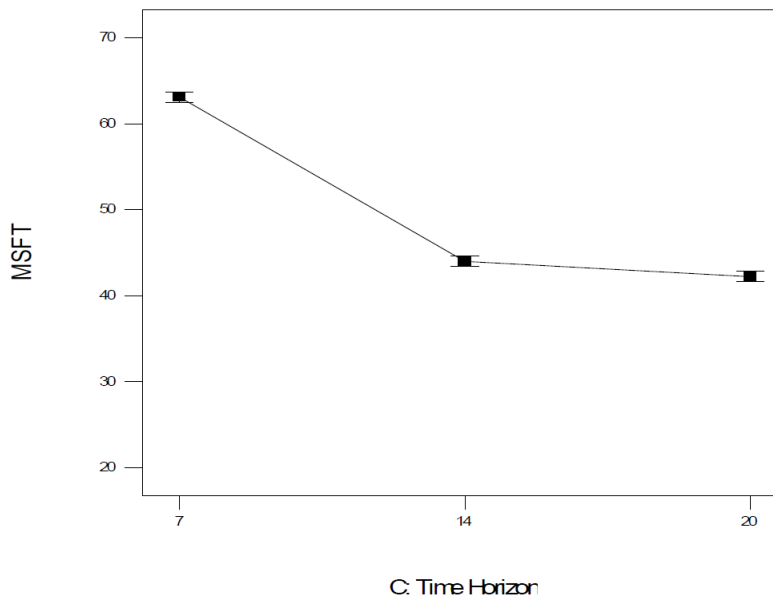


Figura 54 – Effetto del time horizon sul MSFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

Com'era intuibile, l'analisi dei dati sperimentali evidenzia che il limite di carico ha un effetto statisticamente significativo sul tempo di attraversamento medio del sistema (p-value = 0,0004). In particolare, al crescere del valore del limite di carico, il MSFT aumenta progressivamente (Figura 55). Questo è in accordo alla nota legge di Little.

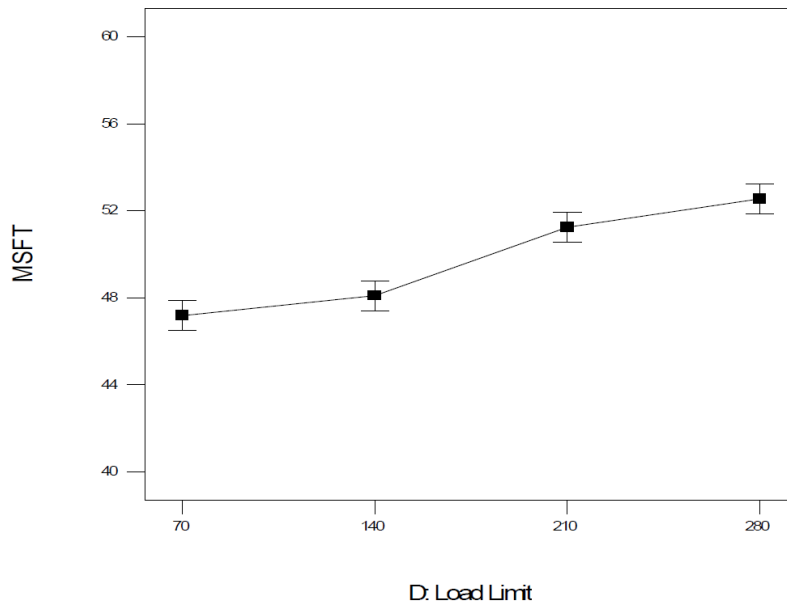


Figura 55 - Effetto del limite di carico sul MSFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei dati evidenzia che l'interazione tra la regola di rilascio e limite di carico è statisticamente significativa (P-value <0,0001). In particolare dalla Figura 56 si evince che, in corrispondenza delle regole WLB1 e WLB2, il valore del MSFT non dipende dal limite di carico, contrariamente a quanto invece avviene per il WUL per cui il tempo di attraversamento medio aumenta progressivamente all'aumentare del LL. In corrispondenza di WUL il tempo di attraversamento medio degli ordini dipende fortemente dal valore del limite di carico imposto; quindi una variazione del LL può indurre variazioni sostanziali nelle prestazioni del sistema. Questo risultato è imputabile ancora una volta al fatto che i metodi di rilascio appartenenti alla categoria di workload balancing consentono di oltrepassare di un certo valore percentuale il limite di carico imposto, al fine di ottenere un maggiore bilanciamento complessivo del sistema. Questo fatto diventa tanto più evidente tanto minore è il limite di carico imposto (Figura 56). Se da un lato la regola WUL registra la prestazione migliore in assoluto, in termini di tempo di attraversamento del sistema, in corrispondenza di un limite di carico pari a 70, dall'altro risulta essere nuovamente la regola più sensibile alla variazione del LL.

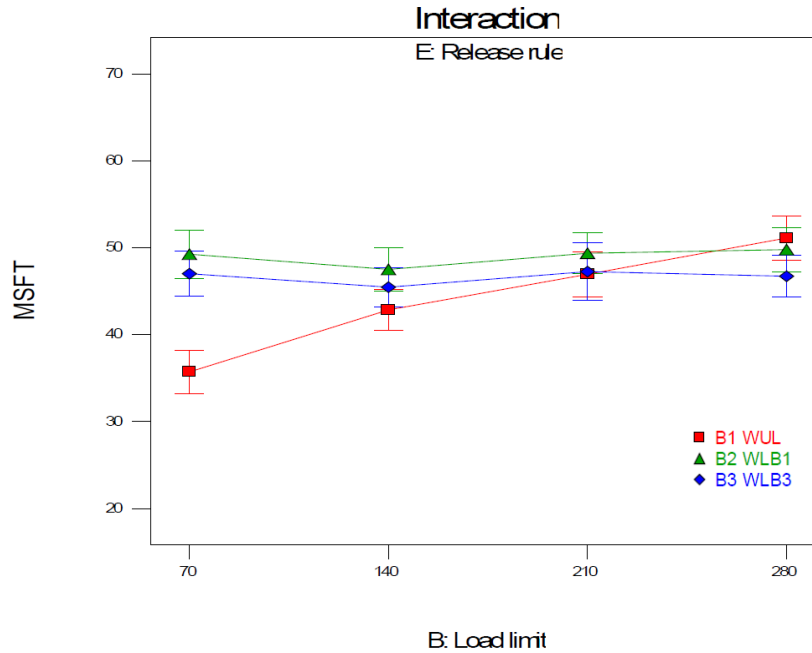


Figura 56 - Interazione tra limite di carico e regole di rilascio relativamente al MSFT.

L'analisi dei risultati evidenzia che le regole di dispatching hanno un effetto statisticamente significativo sul MSFT ($p\text{-value} < 0,04$).

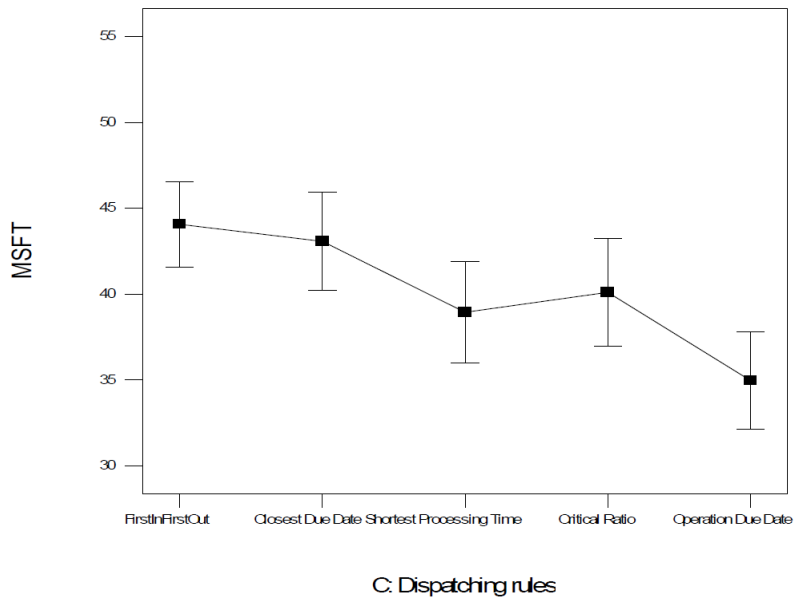


Figura 57 - Effetto delle regole di dispatching sul MSFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

In accordo con i risultati qui determinati, lo studio di Moreira ed Alves (2009) evidenzia che utilizzando la regola EDD, anziché FIFO è possibile ridurre il tempo medio che gli ordini

trascorrono nel sistema produttivo. Questo è discordante rispetto il risultato di Soempenberg *et al.* (2010) secondo cui la regola FIFO minimizza il MSFT.

5.2.8 MTFT – Mean Total Flow Time

La Tabella 30 riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa out pari a 0,1 relativamente al tempo di attraversamento medio del sistema. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 30 - Risultati dell'analisi di regressione per il MTFT ($\alpha=0,1$).

Source	F - Value	p-value Prob > F
A-Load accounting	1,813411	0,1832
B-Order pool sequence rule	1,966168	0,086
C-Dispatching rules	8,200031	< 0,0001
D-Lot splitting	1103,462	< 0,0001
E-Release rule	1055,796	< 0,0001
F-Time Horizon	179,319	< 0,0001
G-Release period	2,123627	0,1285
H-Load Limit	31,89092	< 0,0001
AE	7,473843	0,0013
BD	4,086364	0,0477
BE	10,80132	< 0,0001
BF	4,683442	0,0129
CD	8,816068	< 0,0001
CE	10,15667	< 0,0001
CF	6,87272	< 0,0001
DE	151,4733	< 0,0001
DF	32,49727	< 0,0001
DH	5,142158	0,0031
EF	43,04054	< 0,0001
EH	63,35276	< 0,0001
FG	19,57393	< 0,0001
FH	5,98098	< 0,0001

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo sul tempo di attraversamento medio complessivo del sistema (p-value < 0,0001). Ricordiamo che l'MTFT è dato dalla somma del MSFT e del tempo trascorso dagli ordini nel portafoglio. La Figura 58 riporta l'andamento del MTFT in funzione delle regole di rilascio. A differenza di quanto osservato per l'MSFT, nel caso del MTFT il metodo WUL fornisce le prestazioni migliori. Difatti, il tempo di attraversamento medio del sistema viene minimizzato in corrispondenza di WLB1.

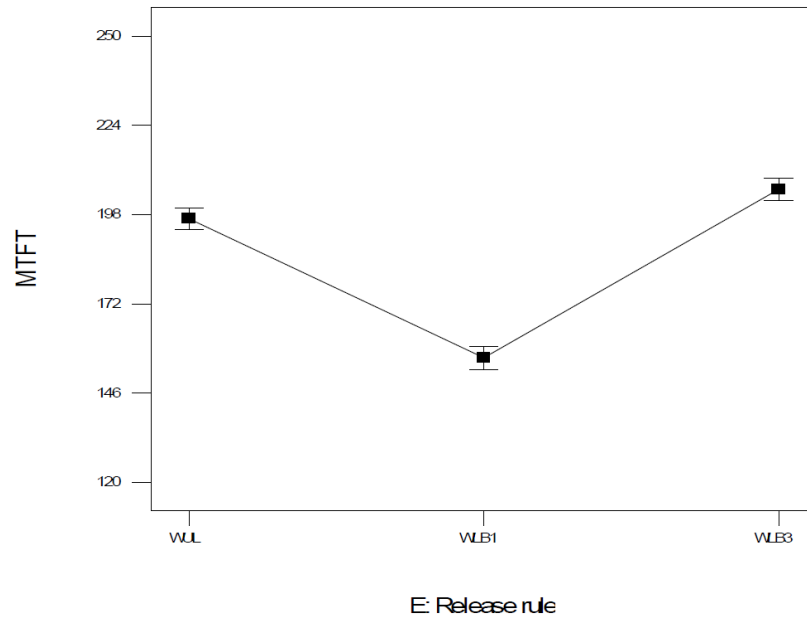


Figura 58 - Effetto delle regole di rilascio sul MTFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul MTFT. Quando il lot splitting è attivo il tempo di attraversamento medio del sistema si riduce notevolmente (Figura 59).

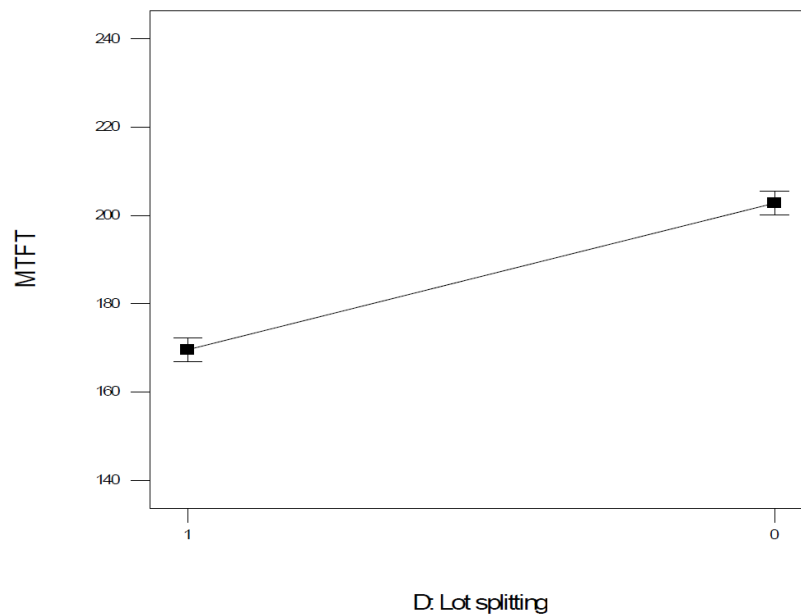


Figura 59 - Effetto del lot splitting sul MTFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati evidenzia che il time horizon ha un effetto statisticamente significativo sul MTFT ($p\text{-value} < 0,0001$). Il tempo medio che un ordine trascorre nel sistema

aumenta al crescere del TH. Una possibile interpretazione di tale risultato può essere ricondotta al fatto che, al crescere del TH, un numero sempre maggiore di ordini sono valutati nella fase di rilascio. In questo insieme di ordini sono presenti anche ordini di recente inserimento, che possono quindi passare avanti a quelli più datati. L'incremento di MTFT è notevole passando da un time horizon di 8 a 14, mentre è trascurabile passando da 14 a 20 giorni. Una possibile interpretazione di tale fenomeno può essere ricondotta a quanto segue. I job contenuti nel portafoglio sono ordinati secondo regole di priorità e quindi valutati di conseguenza per il rilascio. In presenza di un TH molto esteso, gli ordini con PRD o CR considerevolmente lontana hanno una probabilità pressoché nulla di essere considerati per il rilascio.

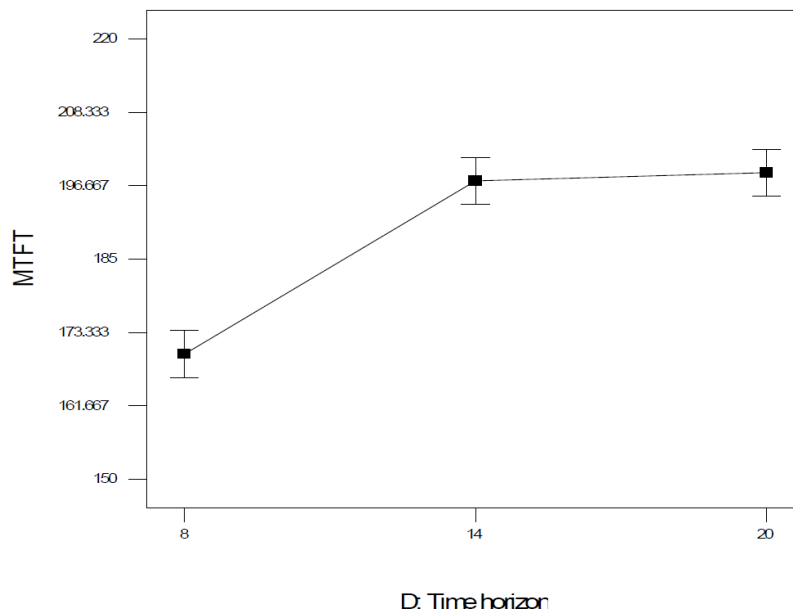


Figura 60 - Effetto delle time horizon sul MTFT. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

I risultati sperimentali evidenziano che l'interazione tra la regola di rilascio e time horizon è statisticamente significativa (P-value <0,0001). Dalla Figura 61 si evince che la regola WLB1 presenta un MTFT minore rispetto le altre de regole di rilascio per tutti i valori del time horizon considerati. Inoltre tutte e tre le regole di rilascio presentano l'MTFT minore in corrispondenza di un time limit pari a 8 giorni. Entrambe le regole appartenenti alla categoria di workload balancing sono superiori al WUL per un TH pari a 8 giorni. Il tempo medio di attraversamento del sistema aumenta considerevolmente in corrispondenza di WLB3 e di TH elevati. Questo fatto è legato alla natura del metodo WLB3, che per raggiungere un elevato

bilanciamento delle risorse, consente il superamento del limite di carico. Al crescere del TH vi è un numero sempre maggiore di ordini potenziali per il rilascio. Aumenta così la probabilità di trovare un ordine da rilasciare, anche meno urgente, che incrementi il livello medio di utilizzo delle risorse.

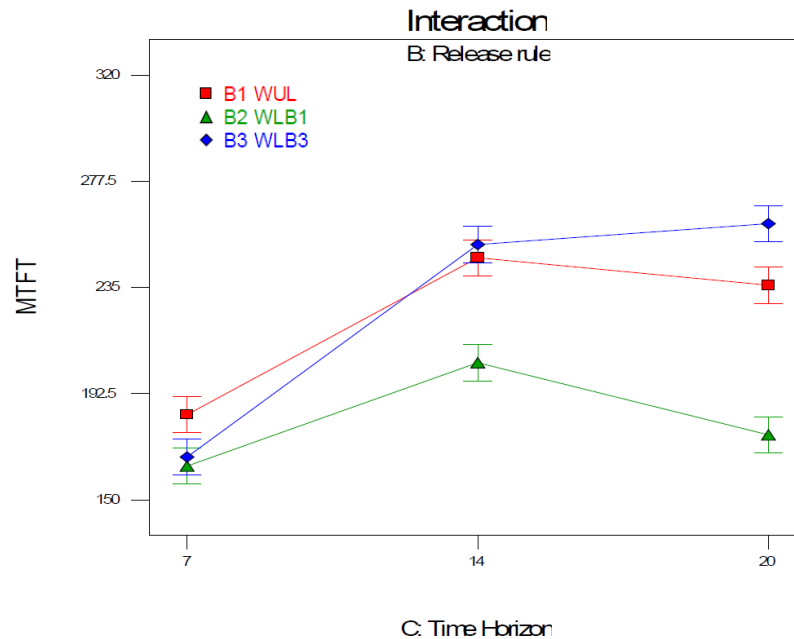


Figura 61 – Interazione tra time horizon e regole di rilascio relativamente al MTFT.

I risultati simulativi evidenziano che l'interazione tra la regola di rilascio e load limit è statisticamente significativa (P-value <0,0001). In particolare dalla Figura 62 si nota che la regola WUL è molto sensibile al limite di carico imposto. Al contrario le prestazioni di WLB3 e soprattutto WLB1 non sembrano essere legate al valore assunto dal limite di carico. Ancora una volta questo è imputabile alla natura dei metodi appartenenti alla categoria di load balancing (WLB1 e WLB3).

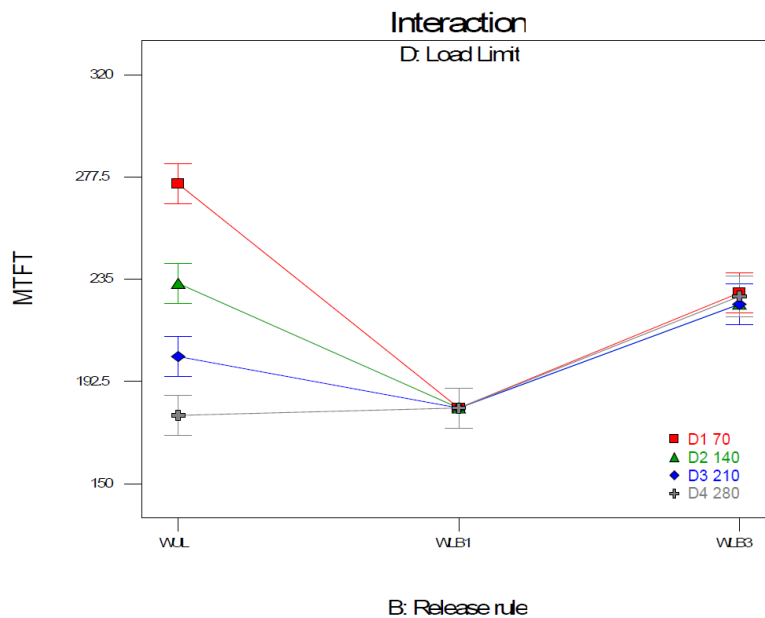


Figura 62 - Interazione tra time horizon e regole di rilascio relativamente al MTFT.

5.2.9 MSHW – Mean Shop WIP

La Tabella 31 sotto riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa out pari a 0,1 relativamente al livello di carico rilasciato in produzione. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 31 - Risultati dell'analisi di regressione per il MSHW ($\alpha=0,1$).

Source	F - Value	p-value Prob > F
Model	259,8542	< 0,0001
A-Load accounting	0,099287	0,7541
B-Order pool sequence rule	0,006771	0,9348
C-Dispatching rules	24,20974	< 0,0001
D-Lot splitting	731,5874	< 0,0001
E-Release rule	384,0107	< 0,0001
F-Time Horizon	5660,175	< 0,0001
G-Release period	1,693798	0,1946
H-Load Limit	22,78832	< 0,0001
AF	3,485006	0,0386
BF	3,598819	0,035
CE	5,372456	< 0,0001
CF	10,51829	< 0,0001
CG	4,734939	0,0003
DE	20,95928	< 0,0001
DF	32,69345	< 0,0001
EF	56,52698	< 0,0001
EH	22,36291	< 0,0001
FH	6,426511	< 0,0001
GH	4,52908	0,001

L'analisi dei risultati sperimentali ha evidenziato che il time horizon ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul livello medio del WIP del reparto. Le due grandezze variano in misura direttamente proporzionale: l'MSHW decresce al diminuire del TH (Figura 63). In corrispondenza di una finestra temporale più ampia, in fase di rilascio è possibile disporre di un numero maggiore di ordini potenzialmente rilasciabili. Aumenta quindi la probabilità di incontrare ordini, che, una volta rilasciati consentano di ottenere un buon bilanciamento del reparto e al contempo non inducano il superamento del limite di carico imposto per le risorse produttive. Ciò è vero soprattutto in corrispondenza delle regole WLB1 e WLB3.

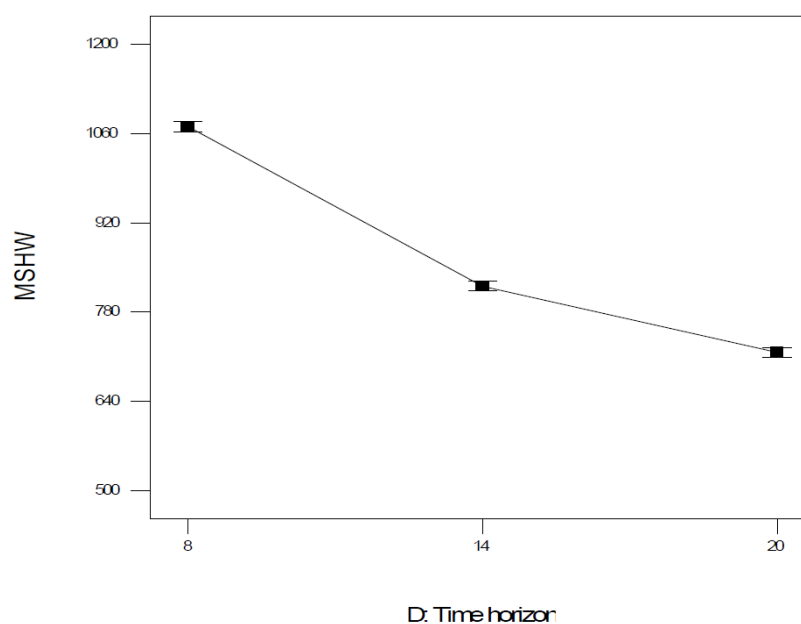


Figura 63 - Effetto delle time horizon sul MSHW. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei risultati sperimentali ha evidenziato che le regole di rilascio hanno un effetto significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul MSHW. Il MSHW è minore in corrispondenza di WUL e massimo in corrispondenza di WLB3 (Figura 64). WUL è più rigoroso nel limitare il carico, mentre ancora una volta WLB3 risulta il meno efficace.

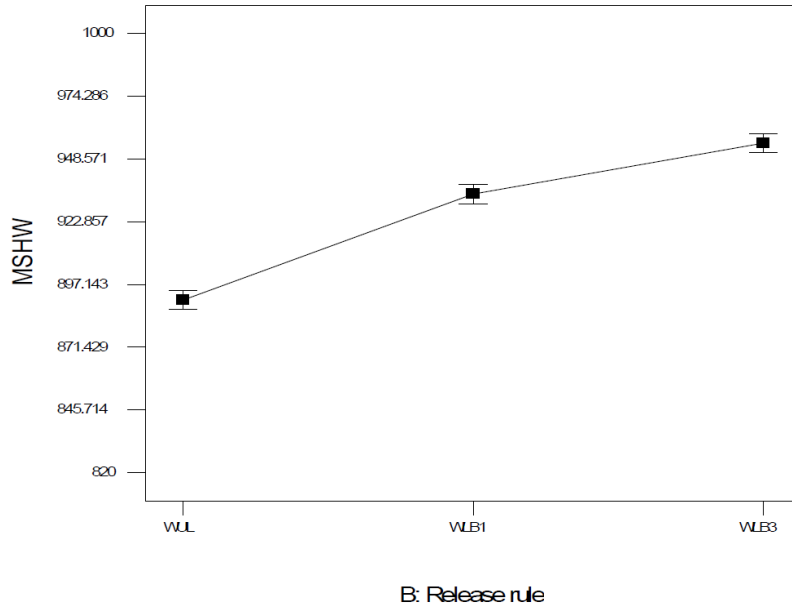


Figura 64 - Effetto delle release rule sul MSHW. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei dati evidenzia che il limite di carico ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul MSHW. Le due grandezze variano in misura direttamente proporzionale: al crescere del LL vi è un progressivo aumento del livello di WIP del reparto (Figura 65). Tale risultato è in linea con quanto ci si poteva spettare, tendo in considerazione le note relazioni che legano il WIP, il tempo di attraversamento e il livello di utilizzo.

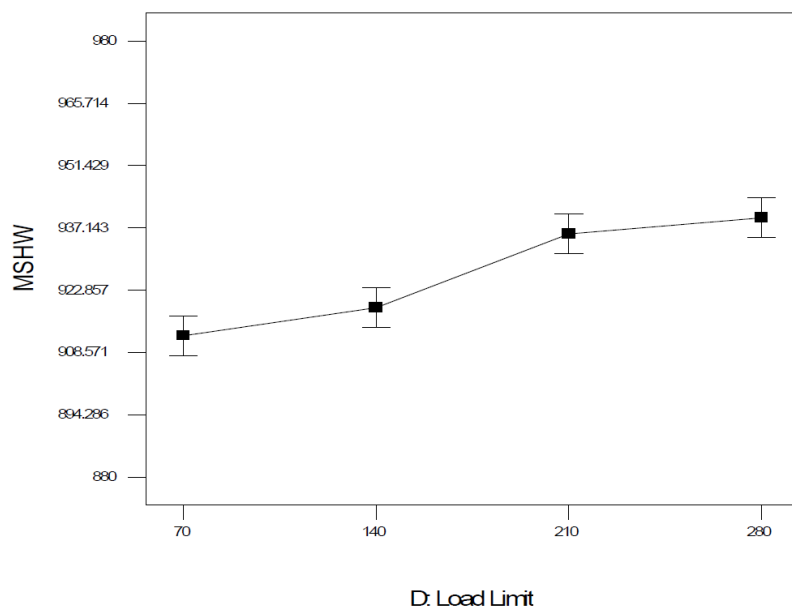


Figura 65 - Effetto delle limite di carico sul MSHW. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'interazione tra la regola di rilascio e load limit è statisticamente significativa (P-value <0,0001). La regola WLB3, pur riportando i risultati peggiori in termini di WIP, risulta essere robusta alla variazione del valore del limite di carico (Figura 66). Tale risultato è in accordo con quanto riportato relativamente al tempo di attraversamento medio del reparto, dove WLB3 registrava le prestazioni peggiori. Per valori ridotti del limite di carico (LL= 70 e 140) la regola WUL riporta il valore di MSHW minore.

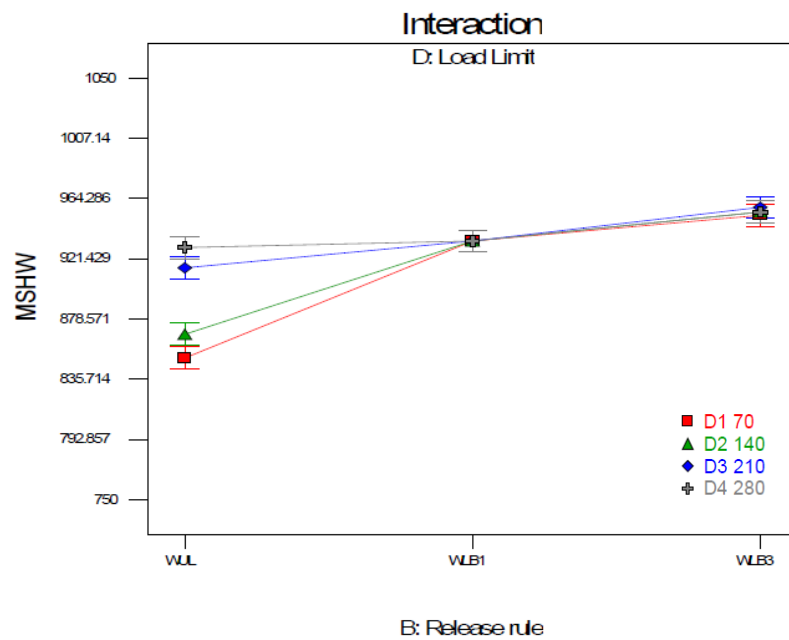


Figura 66 - Interazione tra limite di carico e regole di rilascio relativamente al MSHW.

5.2.10 MSYW – Mean System WIP

La Tabella 32 riporta i risultati della backwards stepwise regression con alfa out pari a 0,1 relativamente al livello di carico totale presente nel sistema. Il modello di regressione è statisticamente significativo (p- value < 0.0001).

Tabella 32 - Risultati dell'analisi di regressione per il MSYW ($\alpha=0,1$).

Source	F - Value	p-value Prob > F
Model	1192998	< 0,0001
A-Load accounting	5,192324	0,8471
B-Order pool sequence rule	170,5637	0,272
C-Dispatching rules	16628,55	< 0,0001
D-Lot splitting	367187,8	< 0,0001
E-Release rule	148603,8	< 0,0001
F-Time Horizon	29863,55	< 0,0001
G-Release period	477,1397	0,1886
H-Load Limit	305,0971	0,5356
AE	618,5161	0,1175
BF	1108,214	0,0244
BH	1493,386	0,0198
CD	2140,05	0,0082
CE	2486,799	0,0392
CF	15608,16	< 0,0001
CG	2295,255	0,0564
DE	2638,612	0,0003
DF	889,277	0,0486
EF	39276,91	< 0,0001
EH	10150,17	< 0,0001
FG	2423,899	0,0041
FH	2299,083	0,0212
GH	2713,292	0,0087

L'analisi dei dati sperimentali evidenzia che le regole di rilascio hanno un effetto statisticamente significativo (p-value < 0,0001) sul livello medio di carico totale del sistema (WIP in reparto più coda nel portafoglio ordini). Il MSYW è minimo per WUL mentre è massimo per WLB3 (Figura 67). Ancora una volta, la regola WLB3 si dimostra essere la meno efficace nel controllo del carico.

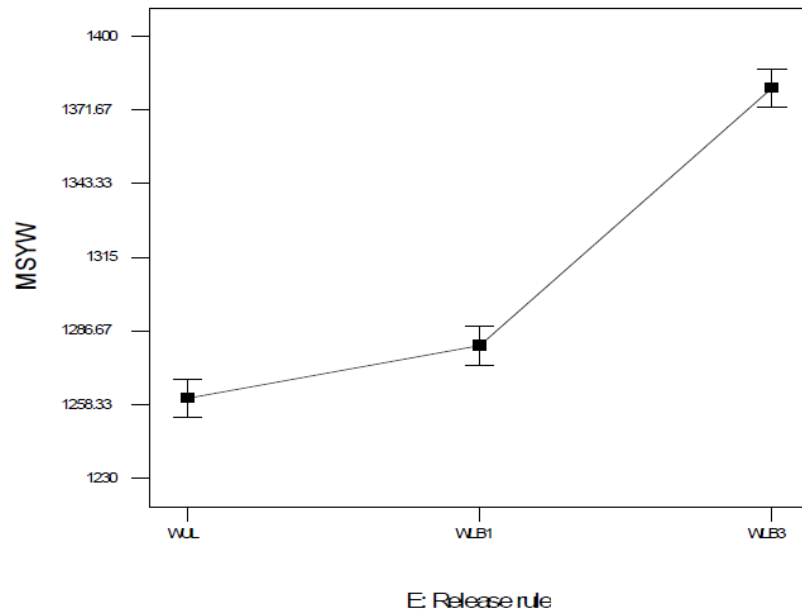


Figura 67 - Effetto delle regole di rilascio sul MSHW. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

L'analisi dei dati evidenzia che il lot splitting ha un effetto statisticamente significativo ($p\text{-value} < 0,0001$) sul MSYW. Anche in questo caso, quando la funzione di lot splitting è attiva il livello totale di carico del sistema si riduce notevolmente (Figura 68).

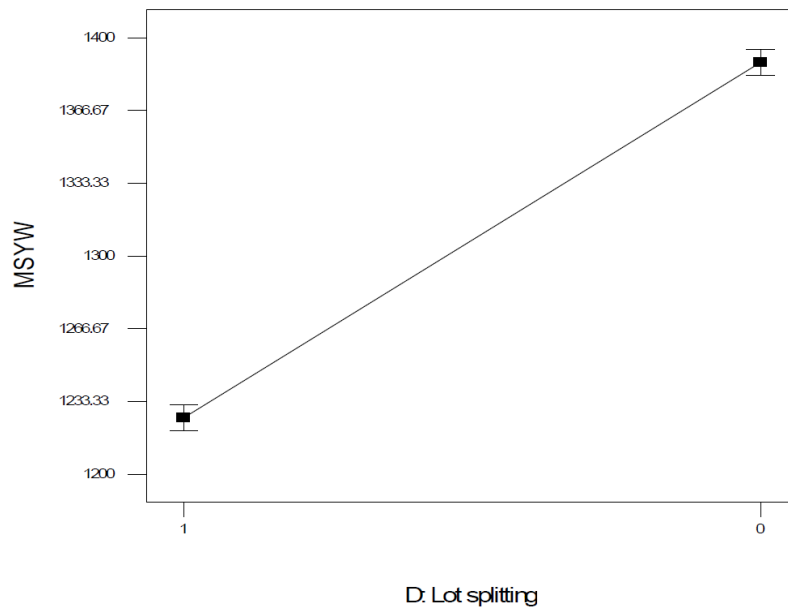


Figura 68 - Effetto del lot splitting sul MSYW. Tutti gli altri fattori sono impostati sul valore medio.

5.2.11 Considerazioni sulle regole di rilascio

La Figura 69 riportata in maniera schematica il ranking delle prestazioni ottenute dai metodi di rilascio, WUL, WLB1 e WLB3, relativamente agli indicatori di prestazione considerati in questo lavoro. La prima colonna della figura riporta le 10 risposte sperimentali, mentre i valori numerici indicano il ranking delle regole di rilascio. Il valore 1 rappresenta la prestazione migliore, il 3 la peggiore.

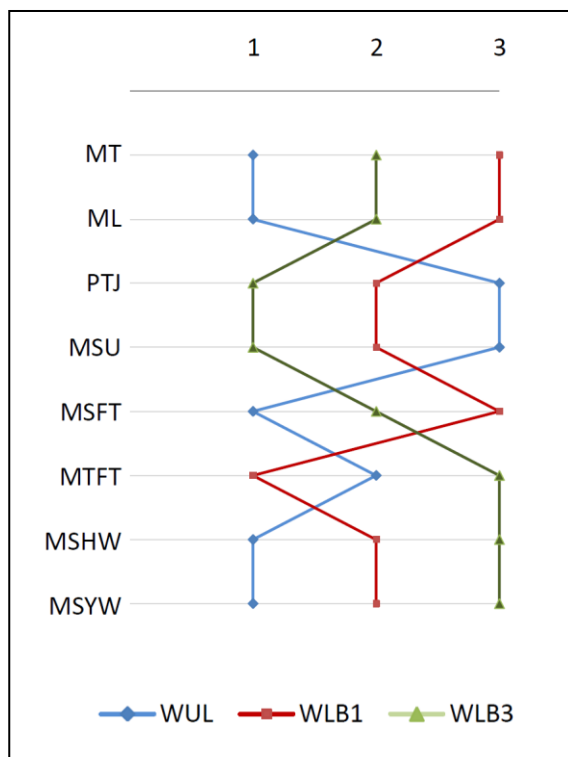


Figura 69 – Comparazione tra regole di rilascio.

Alla luce dei risultati sperimentali il metodo WUL è più efficace nel controllo del carico di lavoro, dimostrando prestazioni superiori in termini di tempo di attraversamento medio del reparto (MSFT), di tardiness medio (MT), lateness medio (ML) e di livello di work in process (MSHW e MSYW). Viceversa, i WLB1 e WLB3, appartenenti alla categoria di workload balancing, hanno riportato prestazioni superiori in termini di utilizzo medio delle risorse. Tuttavia l'impiego di WLB1 e WLB3 determina un sistema più robusto alla variazione dei valori di altri parametri di funzionamento come ad esempio il limite di carico. Come asserito da più autori, non esiste un metodo di rilascio che è superiore agli altri su tutti gli indicatori di prestazione.

5.3 Comparazione con WLB2

In questa sezione verrà presentato un confronto tra i risultati delle prestazioni ottenute impiegando i metodi WUL, WLB1, WLB3 e WLB2. Si ricorda che l'implementazione del metodo WLB2 ha richiesto lo sviluppo di un secondo piano sperimentale (riportato in appendice), in quanto questo prescinde dalla tipologia di regole di priorità imposte nel portafoglio ordini (vedi capitolo 4). Il confronto dei risultati sperimentali appartenenti a due piani differenti non ha quindi validità inferenziale, ma consente di ottenere alcune preziose indicazioni. La Tabella 33 riporta i risultati sperimentali ottenuti dai quattro metodi di rilascio, mantenendo tutti gli altri fattori ad un livello medio (design Expert8 presenta tale funzionalità).

Tabella 33 - Risultati sperimentali dei quattro metodi di rilascio (gli altri fattori sono mantenuti ad un livello medio).

Risposta sperimentale	Regola di rilascio			
	WUL	WLB1	WLB3	WLB2
MT	398	424	400	411
ML	362	380	365	372
TD	17,8	16,9	16,7	16,7
LD	19,8	19,2	18,1	18,9
PTJ	0,279	0,276	0,274	0,275
MSU	0,75	0,77	0,775	0,775
MSFT	456,3	560,5	493,1	560,5
MTFT	197,2	161,4	206,5	159,3
MSHW	888,4	928,2	956,5	920
MSYW	1265,1	1288,4	1381,3	1285,4

Il metodo WLB2, che rappresenta un'evoluzione del tutto originale del metodo WLB1 proposto da Cigolini e Portioli (2002), ha riportato prestazioni comparabili e talvolta superiori rispetto a WLB1 e WLB3 come ad esempio TD, MSU, MTFT, MSHW e MSYW (Tabella 33). Se confrontato direttamente con WUL, WLB2 evidenzia lo stesso comportamento di WLB1 e WLB3: WUL risulta più efficace nel controllo del carico e quindi nella limitazione del WIP e del tempo di attraversamento (Tabella 33). Nessun metodo testato è superiore agli altri in tutte le misure di prestazioni considerate. Tale risultato è in accordo con quanto evidenziato da Cigolini e Portioli (2002): *“by analyzing the results yielded by the different workload accounting over time policies (i.e. Probabilistic, Atemporal and Time Bucketing)*

coupled with the alternative workload control methods, it should first be pointed out that there is no workload control method performing better than the others under all tested conditions”.

WLB2 supera il metodo WLB1, da cui deriva, su tutti gli indicatori di prestazione considerati. Un’interpretazione del risultato qui determinato può essere ricondotta al fatto che l’algoritmo implementato in WLB2 consente di ottenere una minimizzazione più efficace dell’equazione di bilanciamento poiché valuta differenti set di ordini da rilasciare; incrementa così la probabilità di trovare un mix di ordini ottimale. Si ottiene dunque un migliore trade-off tra obiettivi contrastanti: una più stretta aderenza al valore imposto per il limite di carico da un lato, ed un maggiore tasso di utilizzo medio delle risorse dall’altro. Si può quindi concludere che WLB2 rappresenta un’evoluzione concreta e del tutto originale del metodo di rilascio proposto da Cigolini e Portioli (2002).

Come riportato nella parte iniziale di questo capitolo, l’analisi dei risultati sperimentali dimostra che la sequenza di valutazione degli ordini nel portafoglio (fattore “order pool sequence rules”) è statisticamente significativa rispetto a cinque degli indicatori di prestazione considerati (vedi Tabella 24). Ciò evidenzia la criticità legata alla definizione di tale parametro. WLB2 prescinde dalle regole di priorità impiegate nel portafoglio ordini. Per tale ragione l’implementazione di WLB2 come metodo di rilascio permette di ridurre i gradi di libertà legati al modello WLC senza tuttavia degradare le prestazioni globali del sistema. Addirittura, come affermato pocanzi, consente di separare le prestazioni ottenibili dall’applicazione del metodo originale di Cigolini e Portioli.

Capitolo 6 - Conclusioni

Nella letteratura specialistica diversi studi di tipo simulativo si sono occupati del tema del WLC, in particolare cercando di studiarne le dinamiche e le prestazioni al variare dei fattori ambientali e dei valori dei principali parametri di funzionamento. Ciò nonostante, la quasi totalità dei lavori adotta modelli simulativi molto semplici che difficilmente possono rappresentare adeguatamente sistemi manifatturieri concreti. Inoltre dall'analisi della letteratura non sono emersi lavori che affrontano in maniera estesa il tema dell'applicabilità del modello WLC e dell'effetto dei parametri di funzionamento sulle prestazioni del sistema in presenza di distinte base di prodotto e di cicli tecnologici complessi.

L'unicità ed il valore di questo lavoro deriva dalla completezza del modello adottato. Questa tesi ha esaminato diversi dei parametri costituenti il modello di WLC attraverso la simulazione di una struttura produttiva di tipo job shop appartenente a un'azienda manifatturiera locale. In particolare questo lavoro si è proposto di:

- approfondire le conoscenze teoriche di funzionamento di alcuni metodi e regole facenti parte del modello WLC in un sistema complesso, considerando integralmente la struttura di prodotto e dei cicli tecnologici e la distribuzione degli ordini cliente. In particolare sono state mantenute:
 - o la complessità dei flussi di materiale;
 - o la complessità di prodotto: distinta base profonda;
 - o la complessità nella distribuzione di arrivi degli ordini (dimensione e frequenza).
- valutare l'effetto e l'interazione dei vari parametri di funzionamento e delle differenti logiche di WLC definite all'interno del modello proposto su alcuni indicatori di prestazione operativi.
- Testare le prestazioni di un nuovo metodo di rilascio degli ordini (WLB2) facente parte della categoria nota come load balancing.

Le dimensioni del piano sperimentale sviluppato, in termini di numerosità dei fattori e dei livelli considerati, costituisce un ulteriore elemento di unicità. L'estensione del piano sperimentale ha consentito di valutare non solo gli effetti ma anche le diverse interazioni esistenti tra i parametri costituenti il modello WLC. Gli 8 fattori considerati sono:

- periodo di rilascio degli ordini,
- orizzonte temporale,
- regole di priorità del portafoglio ordini,
- metodo di workload accounting,
- limite di carico,
- metodo di rilascio del carico,
- lot splitting,
- regole di dispatching.

Al fine di ridurre drasticamente il numero di prove simulative si è proceduto alla definizione di due piani D-ottimali, utilizzando il software Design-Expert® 8. Sono stati testati quattro metodi di rilascio degli ordini in produzione. Il metodo WLB2 rappresenta un'evoluzione originale del metodo WLB1 proposto da Cigolini e Portioli (2002): l'algoritmo implementato consente di minimizzare l'equazione di bilanciamento prescindendo dal criterio di priorità adottato nel portafoglio ordini.

L'analisi di regressione dei risultati sperimentali ha evidenziato che il metodo di contabilizzazione dei carichi (*load accounting method*) non è statisticamente significativo per nessuno degli indicatori di prestazione considerati (con $\alpha=0,05$). In altre parole, gli indici di prestazioni del sistema considerati non dipendono dalla scelta del metodo di contabilizzazione del carico. Questo risultato è alquanto singolare poiché, negli ultimi anni, numerosi lavori hanno affrontato il tema del confronto delle prestazioni dal metodo probabilistico e di quello aggregato. Una possibile interpretazione del risultato qui determinato può essere ricondotta al fatto che in questo lavoro viene simulata una struttura produttiva che rappresenta fedelmente un sistema manifatturiero effettivo, quindi decisamente più complessa rispetto ai modelli impiegati dalla maggior parte degli studi presenti in letteratura. In particolare, la differenza di maggior rilievo rispetto agli altri lavori consiste nella struttura della distinta base di prodotto che è stata introdotta nel modello e che mantiene integralmente i legami esistenti tra i codici e i vari cicli tecnologici. Si può intuire quindi che la presenza di una distinta base profonda e complessa riduce notevolmente criticità legate alla scelta del metodo di contabilizzazione dei carichi.

L'analisi statistica dei risultati ha evidenziato che il periodo pianificazione è significativo solamente rispetto a due risposte sperimentali, ossia alla percentuale di job terminati in ritardo (PTJ) con un α pari a 0,1 e alla deviazione del lateness (LD) con α pari a 0,05. Tale risultato è in disaccordo con quanto riscontrato nel lavoro di Fernandes e Silva (2010) per cui il periodo di rilascio influenza il tempo di attraversamenti del sistema. Tuttavia è importante sottolineare che il periodo di rilascio, seppur non significativo come effetto principale, diventa significativo nelle interazioni con numerosi altri fattori. L'analisi dei risultati ha evidenziato che la regola che stabilisce la sequenza con cui vengono valutati gli ordini nel portafoglio è statisticamente significativa rispetto a cinque indicatori di prestazione considerati: MSU, LD, MSHT, MSYT e TD. Inoltre il lot splitting, successivo alla fase di rilascio, è risultato statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati; in particolare l'applicazione dello splitting dei lotti ne introduce un generale miglioramento. Dall'analisi dei risultati sperimentali si evince che le regole di rilascio degli ordini sono statisticamente significative per di tutti gli indici di prestazione considerati con un valore di α pari a 0,05. Questo fatto va ad evidenziare la criticità insita nella scelta del criterio per il rilascio degli ordini all'interno del modello di Workload Control. Il *time limit* è risultato statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati con un valore di α pari a 0,05. In letteratura, il time limit è noto essere uno dei parametri di funzionamento del WLC maggiormente critici. L'analisi dei dati sperimentali ha evidenziato che l'effetto del limite di carico è statisticamente significativo per tutti gli indicatori di prestazione considerati tranne che per MSYW. Le regole di dispatching hanno un effetto statisticamente significativo su ben 8 dei 10 indicatori di prestazione considerati. Tale risultato è in disaccordo con quanto riportato in diversi studi. Una possibile interpretazione del risultato qui determinato può essere ricondotta al fatto che la complessità introdotta della distinta base, in termini sia di legami tra codici, che di cicli e di flusso di materiali nel modello, rende indispensabile una gestione più evoluta delle priorità nell'avanzamento dei materiali rispetto al first-come-first-served.

L'analisi di regressione ha evidenziato l'esistenza di un numero considerevole di interazioni a due fattori significative. Questo risultato ha molteplici implicazioni. Da una parte il WLC risulta essere un sistema relativamente articolato quando viene implementato in un ambiente manifatturiero complesso. Inoltre la definizione dei valori ottimali dei parametri di funzionamento non è diretta poiché sussistono diverse interazioni reciproche tra i fattori: gli

effetti principali sono influenzati fortemente dalle interazioni esistenti. Per lo stesso motivo, l'analisi statistica degli effetti principali risulta decisamente complicata.

I risultati sperimentali hanno evidenziato che il metodo WUL, appartenente alla categoria di workload bounding, è più efficace nel controllo del carico e quindi nella limitazione del work in process e del tempo di attraversamento medio del sistema.

Viceversa, i metodi appartenenti alla categoria di workload balancing, ossia WLB1, WLB2 e WLB3 hanno conseguito prestazioni superiori, rispetto WUL, in termini di livello di utilizzo medio delle risorse. Inoltre l'impiego di questi metodi, in particolar modo WLB2 e WLB3, consente di ottenere un sistema più robusto alle variazioni dei valori degli altri parametri di funzionamento come ad esempio il limite di carico imposto.

Il metodo WLB2, che rappresenta un'evoluzione del tutto originale del metodo WLB1 proposto da Cigolini e Portioli (2002), ha riportato prestazioni superiori rispetto al metodo da cui esso deriva rispetto tutti gli indicatori di prestazione considerati. L'algoritmo implementato nel WLB2 consente di ottenere una minimizzazione più efficace dell'equazione di bilanciamento poiché valuta differenti set di ordini da rilasciare. Inoltre, poiché il metodo WLB2 prescinde dalle regole di priorità definite nel portafoglio ordini, consente di diminuire il grado di complessità del modello WLC, riducendone il numero di parametri di funzionamento.

6.1 Limiti della ricerca e sviluppi futuri

In questa sezione verranno elencati i principali limiti della ricerca ed i possibili sviluppi futuri. Al fine di non complicare oltremodo il modello di simulazione, si è deciso di considerare il tempo di set-up indipendente dalla sequenza di lavorazione: al tempo di lavorazione viene aggiunto un *extra time* prestabilito ogni qual volta viene richiesta un'operazione di set-up. Quest'assunzione, pur semplificando il modello dal punto di vista computazionale, non limita la validità dei risultati nella struttura manifatturiera considerata poiché è stato verificato che nel sistema produttivo in questione il tempo di set-up è pressoché indipendente dalla sequenza con cui vengono eseguite le operazioni. Tuttavia in molte realtà produttive questa condizione potrebbe venir meno, limitando la generalizzazione dei risultati qui ottenuti a configurazioni differenti.

Il modello di simulazione non comprende la funzione di variazione della capacità produttiva disponibile, come ad esempio lavoro straordinario e doppi turni, se richiesto. Tuttavia per ovviare a tale limite è stato definito un valore massimo del portafoglio ordini, oltre il quale gli ordini in ingresso sono stati posticipati.

La notevole estensione del piano fattoriale, derivante dalla numerosità dei fattori e dei livelli considerati, introduce alcune criticità. Se da un lato l'elevato numero di parametri consente di ottenere un quadro completo ed articolato sull'effetto che i valori da questi assunti hanno sugli indicatori di prestazione e sull'esistenza di interazioni reciproche, dall'altro questo limita la possibilità di un'analisi di dettaglio delle interazioni tra i fattori.

Uno sviluppo possibile di tale ricerca consiste nella simulazione di un sistema produttivo in cui il tempo di set-up è fortemente dipendente dalla sequenza di lavorazione. Un'estensione ulteriore consiste nella valutazione delle prestazioni del modello WLC e dei vari parametri al mutare del grado di variabilità interna al sistema, come ad esempio la distribuzione del tempo di guasto, ed esterna come ad esempio la distribuzione degli ordini. L'implementazione di piani sperimentali ridotti potrebbe inoltre consentire una valutazione più accurata e specifica di alcune determinate interazioni tra fattori.

Appendice A

Esempio del metodo WLB2

Supponiamo di avere un sistema formato da 4 centri di lavoro. La Tabella 34 riporta il carico iniziale al tempo zero e il limite di carico imposto per i centri.

Tabella 34 - Carico iniziale e il limite di carico imposto per i centri.

	Centro 1	Centro 2	Centro 3	Centro 4
Carico iniziale	50	20	100	70
Load limit	200	200	300	100

La Tabella 35 riporta il carico di lavoro previsto dal ciclo tecnologico degli ordini A, B e C.

Tabella 35 - Carico di lavoro degli ordini nelle risorse.

Ordine	Carico nel Centro 1	Carico nel Centro 2	Carico nel Centro 3	Carico nel Centro 4
A	20	100	100	30
B	40	50	60	50
C	10	80	-	20

Supponiamo che al tempo t gli ordini A, B e C siano rilasciabili poiché compresi nel *time limit*. In questo caso abbiamo $3! = 6$ sequenze possibili, ossia ABC, ACB, CAB, BAC, BCA, CBA.

Richiamando l'equazione di bilanciamento:

$$BE = \sum_i p_i * (LL_i - WL_i)^2$$

$$p_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } WL_i \geq LL_i \\ 1 & \text{if } WL_i < LL_i \end{cases}$$

Poniamo α_i , ossia la penalità legata al sovraccarico del centro i , pari ad 1. Inoltre per semplicità in questo esempio non viene applicato il *Load Conversion Algorithm*, ma tutti i carichi dovuti ad un'operazione sono imputati integralmente al centro di lavoro come previsto dal ciclo tecnologico. Il valore di BE al tempo zero è:

$$BE_0 \text{ (stato iniziale)} = (200-50)^2 + (200-20)^2 + (300-100)^2 + (100-70)^2 = 95800$$

Tra le 6 sequenze possibili ne vengono scelte 3 ($k=3$), ad esempio ABC, ACB e CAB

Sequenza 1: A,B,C

Calcolo i vari $BE_{1,x}$

$$BE_{1,2} \text{ (rilascio A)} = (200-70)^2 + (200-120)^2 + (300-200)^2 + (100-100)^2 = 33300$$

$$BE_{1,2} \text{ (rilascio A e poi B)} = (200-110)^2 + (200-170)^2 + (300-260)^2 + (100-150)^2 = 13100$$

$$BE_{1,33} \text{ (rilascio A, B e poi C)} = (200-120)^2 + (200-150)^2 + (300-260)^2 + (100-170)^2 = 15400$$

$BE_{1,2}$ è minore di $BE_{1,1}$ e $BE_{1,3}$, quindi considerando solo la sequenza 1 verrebbero rilasciati gli ordini A e B in sequenza.

Sequenza 2: A,C,B

$$BE_{2,1} \text{ (rilascio A)} = (200-70)^2 + (200-120)^2 + (300-200)^2 + (100-100)^2 = 33300$$

$$BE_{2,2} \text{ (rilascio A e poi C)} = (200-80)^2 + (200-200)^2 + (300-200)^2 + (100-120)^2 = 10800$$

$$BE_{2,3} \text{ (rilascio A, C e B)} = (200-120)^2 + (200-150)^2 + (300-260)^2 + (100-170)^2 = 15400$$

In questo caso $BE_{2,2}$ è minore di $BE_{2,1}$ e $BE_{2,3}$, quindi considerando solamente la sequenza 2, verrebbero rilasciati gli ordini A e C. Inoltre $BE_{2,2}$ (sequenza 2) è minore di $BE_{1,2}$ (sequenza 1), quindi al momento verrebbero rilasciati gli ordini A e C.

Sequenza 3: C,A,B

$$BE_{3,1} \text{ (rilascio C)} = (200-60)^2 + (200-100)^2 + (300-100)^2 + (100-90)^2 = 69700$$

$$BE_{3,2} \text{ (rilascio C e A)} = (200-80)^2 + (200-200)^2 + (300-200)^2 + (100-120)^2 = 10800$$

$$BE_{3,3} \text{ (rilascio C, A e B)} = (200-120)^2 + (200-150)^2 + (300-260)^2 + (100-170)^2 = 15400$$

In questo caso $BE_{3,2}$ è minore di $BE_{3,1}$ e $BE_{3,3}$, quindi considerando solamente la sequenza 3, verrebbero rilasciati gli ordini C e A. Inoltre $BE_{2,2}$ (sequenza 2) ha lo stesso valore di $BE_{3,2}$ (sequenza 3). In questo semplice esempio verrebbero rilasciati gli ordini C e A (sequenza 3), oppure A e C (dalla sequenza 2).

Esempio di applicazione del BI

Consideriamo un reparto produttivo costituito da 4 centri di lavoro M1, M2, M3 e M4 e tre ordini urgenti candidati per il rilascio J_1 , J_2 e J_3 . Supponiamo inoltre che vi siano degli ordini già rilasciati in coda presso i centri (workload iniziale). La Tabella 36 riporta i carichi iniziali e il carico di lavoro che ogni ordine determina nei centri interessati dal ciclo.

Tabella 36 – Carichi iniziali e carico di lavoro che ogni ordine determina nei centri interessati dal ciclo tecnologico (i carichi sono espressi in ore di lavoro).

	Centri di lavoro			
	M1	M2	M3	M4
Workload iniziale	20	30	40	15
Ordine 1 (J_1)	20	10	-	25
Ordine 2 (J_2)	10	15	5	20
Ordine 3 (J_3)	30	5	10	15

Nel lavoro di Fernandes e Silva (2008) il carico di lavoro diretto derivante dal rilascio di un ordine viene calcolato applicando l'algoritmo di conversione utilizzato da Wiendahl (1995); tuttavia per facilitarne la comprensione nella prima parte dell'esempio questo non verrà applicato: il carico diretto non viene moltiplicato per la relativa probabilità, ma è considerato integralmente. All'istante t del rilascio, vengono calcolati i BI degli ordini urgenti (quelli compresi nel time limit). Nel caso in esame:

$$J1: IB_{1,t} = [(20+20)+(30+10)+(40+0)+(15+25)]/(4*40) = 1$$

$$J2: IB_{2,t} = [(20+10)+(30+15)+(40+5)+(15+20)]/(4*45) = 0,86$$

$$J3: IB_{3,t} = [(20+30)+(30+5)+(40+10)+(15+15)]/(4*50) = 0,825$$

Viene rilasciato l'ordine che presenta il BI maggiore, in questo caso l'ordine J_1 ($IB_{1,t}=1$), se il limite di carico massimo imposto (LL) non viene superato di una determinata percentuale x .

Complichiamo ora l'esempio introducendo il Load Conversion Algorithm (Wiendahl, 1995): il carico di lavoro che l'ordine genera per in ogni risorsa visitata viene moltiplicato per la probabilità che questo ha di raggiungere il centro durante il periodo di pianificazione. La Tabella 37 riporta i fattori di conversione dei centri di lavoro.

Tabella 37 – Fattori di conversione ottenuti con il load conversion algorithm

	Centri di lavoro			
	M1	M2	M3	M4
Fattore di conversione	0.5	0.5	0.5	0.5

Considerando i cicli di lavoro degli ordini riportati in Tabella 38, i coefficienti di conversione in Tabella 39 e i tempi di lavorazione in Tabella 36 è possibile stimare il carico di lavoro diretto previsto per ogni centro di lavoro dovuto al rilascio dell'ordine *i* (Tabella 39).

Tabella 38 – Sequenza di lavorazione degli ordini nei centri di lavoro

Ciclo di lavoro	Centri di lavoro			
	M1	M2	M3	M4
Ordine 1 (J1)	1	2	-	3
Ordine 2 (J2)	1	3	4	2
Ordine 3 (J3)	1	4	2	3

Tabella 39 – Stima del carico diretto (ore)

	Centri di lavoro			
	M1	M2	M3	M4
Workload iniziale	20	30	40	15
Ordine 1 (J1)	20	10*0,5=5	-	25*0,5*0,5=6,25
Ordine 2 (J2)	10	15*0,5*0,5=3,75	5*0,5*0,5*0,5=0,625	20*0,5=10
Ordine 3 (J3)	30	5*0,5*0,5*0,5=0,625	10*0,5=5	15*0,5*0,5=3,75

Ad esempio il carico di lavoro diretto previsto imputabile al rilascio dell'ordine J_1 è pari a 20 ore nel centro 1, 5 nel centro 2 e 6,25 nel centro 4. Quindi, all'istante di rilascio t gli indici di bilanciamento relativi agli ordini considerati assumono i seguenti valori:

$$J_1: IB_{1,t} = [(20+20)+(30+5)+(40+0)+(15+6,5)]/(4*40) = 0,85$$

$$J_2: IB_{2,t} = [(20+10)+(30+3,75)+(40+0,625)+(15+10)]/(4*40,625) = 0,77$$

$$J_3: IB_{3,t} = [(20+30)+(30+0,625)+(40+5)+(15+3,75)]/(4*50) = 0,72$$

Anche in questo caso viene rilasciato l'ordine 1 poiché presenta il BI maggiore (0,85). La Tabella 40 riporta la situazione successiva al rilascio dell'ordine 1.

Tabella 40 – Situazione successiva al rilascio dell'ordine 1

	Centri di lavoro			
	M1	M2	M3	M4
Workload iniziale	40	35	40	21,25
Ordine 2	10	$15*0,5*0,5=3,75$	$5*0,5*0,5*0,5=0,625$	$20*0,5=10$
Ordine 3	30	$5*0,5*0,5*0,5=0,625$	$10*0,5=5$	$15*0,5*0,5=3,75$

Il procedimento termina quando il carico diretto previsto supera il limite di carico (LL) di una data percentuale x . Se ad esempio $LL=100$ e $x=10\%$, il procedimento termina non appena la stima del carico diretto raggiunge 110 ore.

Appendice B

Piani simulativi

Tabella 41 – Piano simulativo senza WLB2

Run	load accounting method	Order pool rules	Dispatching rules	Lot splitting	Release workload control method	Time limit	Release period	Load Limit
1	Aggregate	Planned Release Date	Critical Ratio	0	WLB1	20	8	140
2	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	1	WLB3	14	5	70
3	Aggregate	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WLB3	8	5	70
4	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	14	8	140
5	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WUL	20	8	140
6	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WUL	14	2	280
7	Aggregate	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WLB3	14	2	210
8	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	8	140
9	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	210
10	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	8	70
11	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	5	140
12	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	280
13	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	14	2	70
14	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WLB3	14	5	140
15	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	140
16	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WUL	20	8	140
17	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WUL	8	5	280
18	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB3	20	8	140
19	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	2	140
20	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB1	20	2	140
21	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB3	20	8	140
22	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB1	20	8	70
23	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WLB3	14	8	70
24	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WUL	20	8	140
25	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	8	210
26	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	1	WLB3	14	5	70
27	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WUL	8	2	70
28	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	1	WUL	14	2	70
29	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	2	140
30	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	5	140
31	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	210
32	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB3	20	8	140
33	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	14	8	140
34	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	8	210
35	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	70
36	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	20	8	210
37	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WLB1	20	5	280
38	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	8	140
39	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	1	WLB3	20	2	70
40	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	8	8	140
41	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	8	140
42	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	8	280
43	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	70
44	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	5	140
45	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	8	140
46	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	8	210
47	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WLB3	14	5	210
48	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	1	WLB1	20	8	140
49	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	1	WUL	8	2	210
50	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	8	280
51	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	8	70
52	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WUL	20	8	140
53	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	8	70
54	Load Conversion	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	140
55	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	8	210

56	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	8	210
57	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	8	280
58	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WUL	20	2	210
59	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	210
60	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	210
61	Aggregate	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WUL	14	5	140
62	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	0	WLB3	8	5	210
63	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	280
64	Load Conversion	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB1	20	8	140
65	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	8	140
66	Load Conversion	Planned Release Date	Critical Ratio	1	WUL	8	2	280
67	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	8	8	140
68	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	8	70
69	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	8	8	140
70	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WLB3	14	8	280
71	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	140
72	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	5	140
73	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	8	8	140
74	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WLB3	8	2	280
75	Load Conversion	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	8	140
76	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	1	WLB1	20	8	140
77	Load Conversion	Planned Release Date	FirstInFirstOut	1	WLB3	8	5	70
78	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	70
79	Aggregate	Planned Release Date	Operation Due Date	0	WLB1	20	8	140
80	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WUL	20	2	140
81	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	2	140
82	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WLB1	8	8	210
83	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	0	WUL	14	5	280
84	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB3	20	8	140
85	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	14	2	140
86	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	14	8	140
87	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	8	140
88	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	20	5	140
89	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	140
90	Load Conversion	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	20	8	140
91	Load Conversion	Planned Release Date	Shortest Processing Time	1	WLB3	14	5	210
92	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	1	WLB1	20	8	140
93	Load Conversion	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB3	14	2	210
94	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	8	210
95	Load Conversion	Planned Release Date	FirstInFirstOut	1	WLB3	14	2	280
96	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	8	280
97	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	14	8	140
98	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	8	8	140
99	Load Conversion	Critical Ratio	Shortest Processing Time	1	WUL	8	2	70
100	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	2	140
101	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	8	280
102	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	8	140
103	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	8	70
104	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	5	140
105	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WLB1	8	8	140
106	Load Conversion	Critical Ratio	Closest Due Date	1	WLB3	8	2	210
107	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	1	WLB1	20	8	140
108	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	140
109	Aggregate	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB1	14	8	140
110	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WUL	8	2	70
111	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	8	140
112	Aggregate	Planned Release Date	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	8	140
113	Load Conversion	Critical Ratio	Shortest Processing Time	1	WUL	14	5	280
114	Aggregate	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	5	140
115	Aggregate	Critical Ratio	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	8	210
116	Load Conversion	Planned Release Date	Shortest Processing Time	0	WUL	8	2	70
117	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	1	WUL	20	8	140
118	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	2	140
119	Load Conversion	Critical Ratio	Critical Ratio	0	WLB1	20	8	140
120	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	280
121	Load Conversion	Critical Ratio	Closest Due Date	0	WLB3	8	5	280
122	Load Conversion	Planned Release Date	Closest Due Date	1	WLB1	14	2	70

123	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WUL	20	8	140
124	Load Conversion	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	8	280
125	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB3	20	8	140
126	Aggregate	Critical Ratio	Operation Due Date	0	WLB1	8	8	280
127	Aggregate	Planned Release Date	Shortest Processing Time	1	WUL	8	5	210
128	Aggregate	Critical Ratio	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	8	70
129	Aggregate	Planned Release Date	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	8	140
130	Aggregate	Planned Release Date	Closest Due Date	0	WLB1	20	8	140
131	Load Conversion	Planned Release Date	Operation Due Date	1	WUL	14	5	210

Tabella 42 - Piamo simulativo con solo WLB2

Run	load accounting method	Dispatching rules	Lot splitting	Time limit	Release period	Load Limit
1	Aggregate	Closest Due Date	1	14	5	280
2	Load Conversion	Closest Due Date	1	8	8	280
3	Aggregate	Critical Ratio	1	20	5	140
4	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	8	2	280
5	Load Conversion	Operation Due Date	1	14	5	70
6	Load Conversion	Critical Ratio	1	20	5	210
7	Aggregate	FirstInFirstOut	1	14	5	70
8	Load Conversion	Closest Due Date	1	14	8	70
9	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	14	8	280
10	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	14	2	210
11	Aggregate	Shortest Processing Time	0	8	8	140
12	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	14	2	280
13	Aggregate	Shortest Processing Time	1	20	8	140
14	Aggregate	Shortest Processing Time	0	20	2	280
15	Aggregate	Critical Ratio	1	20	2	280
16	Aggregate	Operation Due Date	1	20	5	210
17	Load Conversion	Operation Due Date	0	8	5	210
18	Aggregate	Operation Due Date	1	20	8	140
19	Aggregate	FirstInFirstOut	0	8	2	210
20	Aggregate	Closest Due Date	1	20	8	70
21	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	8	5	140
22	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	8	5	210
23	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	20	5	280
24	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	20	8	210
25	Aggregate	Shortest Processing Time	1	8	2	210
26	Aggregate	Critical Ratio	1	14	8	210
27	Aggregate	Critical Ratio	0	14	8	70
28	Load Conversion	Closest Due Date	1	8	2	210
29	Aggregate	FirstInFirstOut	1	8	8	140
30	Aggregate	Critical Ratio	0	14	5	210
31	Load Conversion	Operation Due Date	1	14	8	140
32	Load Conversion	Closest Due Date	0	8	5	70
33	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	20	5	70
34	Aggregate	Closest Due Date	0	14	2	210
35	Load Conversion	Closest Due Date	0	14	2	70
36	Aggregate	Shortest Processing Time	1	14	2	70
37	Aggregate	FirstInFirstOut	1	20	8	210
38	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	8	2	140
39	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	20	2	280
40	Load Conversion	Closest Due Date	1	20	2	140
41	Aggregate	Operation Due Date	0	14	8	210
42	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	14	2	140
43	Load Conversion	Closest Due Date	0	20	5	280
44	Load Conversion	Operation Due Date	1	8	8	210
45	Aggregate	Shortest Processing Time	0	14	5	210
46	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	14	5	70
47	Aggregate	Operation Due Date	1	8	2	140
48	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	2	210
49	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	8	5	70
50	Load Conversion	Critical Ratio	0	8	5	140
51	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	8	280

52	Aggregate	Operation Due Date	1	8	8	280
53	Load Conversion	Closest Due Date	0	14	5	140
54	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	8	8	70
55	Load Conversion	Critical Ratio	1	14	5	280
56	Load Conversion	Closest Due Date	0	8	8	140
57	Aggregate	Critical Ratio	0	20	2	210
58	Aggregate	FirstInFirstOut	0	14	8	140
59	Load Conversion	Closest Due Date	0	20	8	210
60	Load Conversion	Critical Ratio	0	8	8	210
61	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	20	2	140
62	Aggregate	Closest Due Date	0	8	2	280
63	Aggregate	FirstInFirstOut	1	14	8	280
64	Aggregate	FirstInFirstOut	0	20	8	70
65	Aggregate	Operation Due Date	0	20	2	70
66	Aggregate	Operation Due Date	0	8	5	140
67	Aggregate	Critical Ratio	0	8	2	70
68	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	8	8	280
69	Aggregate	Closest Due Date	0	20	5	140
70	Aggregate	Critical Ratio	0	14	2	140
71	Aggregate	Closest Due Date	1	8	8	210
72	Load Conversion	Critical Ratio	1	8	8	140
73	Load Conversion	Operation Due Date	0	8	8	70
74	Aggregate	Operation Due Date	1	14	2	210
75	Load Conversion	Critical Ratio	1	14	2	70
76	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	5	140
77	Aggregate	FirstInFirstOut	0	8	5	280
78	Aggregate	Operation Due Date	0	14	2	280
79	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	20	5	140
80	Aggregate	Shortest Processing Time	1	8	5	70
81	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	20	5	210
82	Aggregate	Critical Ratio	0	20	8	280
83	Aggregate	Closest Due Date	0	14	8	70
84	Load Conversion	Critical Ratio	0	20	8	70
85	Aggregate	Critical Ratio	1	8	5	280
86	Aggregate	FirstInFirstOut	1	20	2	70

Appendice C – Tabelle del database aziendale

Ordini cliente

ITEM	QUANTITY	INSERTDATE
SV081364	1	01-gen-08
SV081381	1	02-gen-08
SV080479	1	02-gen-08
SV060875	2	02-gen-08
SV060876	2	02-gen-08
SV061196	4	02-gen-08
101633010001M	5	02-gen-08
13000901M0013	5	02-gen-08
13001001M0013	5	02-gen-08
13001101M0013	5	02-gen-08
SV081276	1	03-gen-08
SV081237	1	03-gen-08
SV081346	1	03-gen-08
10172801M0267	1	03-gen-08
10136801M0079	2	03-gen-08
10137201M0079	3	03-gen-08
10124501M0126	5	03-gen-08
10137101M0079	5	03-gen-08
10124701M0267	10	03-gen-08
101264010001M	60	03-gen-08
23000001M0374	99	03-gen-08
23000001M0374	100	03-gen-08
A-P850008030	135	03-gen-08
A-P850027510	140	03-gen-08
A-P850053510	188	03-gen-08
A-P850047510	196	03-gen-08
A-P850048030	200	03-gen-08
SV081230	1	05-gen-08
SV081236	1	05-gen-08
101026010001M	20	05-gen-08
SV080450	1	06-gen-08
101489010001M	5	06-gen-08
15105301M0306	5	06-gen-08
10133701M0267	10	08-gen-08
101293010001M	80	08-gen-08
A-P850028030	300	08-gen-08
A-P850012510	576	08-gen-08
A-P850020510	882	10-gen-08
430189010	1	12-gen-08
430191010	1	12-gen-08
430202010	1	12-gen-08
SV080121	1	12-gen-08
SV080308	1	12-gen-08
SV080361	1	12-gen-08
SV080446	1	12-gen-08
SV080526	1	12-gen-08
13001801M0013	4	12-gen-08
101386890001M	7	12-gen-08
SV080156	8	12-gen-08
SV080159	8	12-gen-08
SV080158	12	12-gen-08
110054010001M	14	12-gen-08
23000001M0374	200	12-gen-08
15101001M0126	4	14-gen-08
15101501M0126	5	14-gen-08
101029010001M	10	14-gen-08
101042010001M	20	14-gen-08
101044010001M	19	15-gen-08
101263010001M	55	16-gen-08
A-P850021510	180	16-gen-08

SV071154	1	17-gen-08
SV080288	1	17-gen-08
10132901M0114	2	17-gen-08
10132901M0114	3	17-gen-08
SV080412	8	17-gen-08
SV080413	22	17-gen-08
SV080451	1	18-gen-08
10135901M0114	5	18-gen-08
101453010001M	10	18-gen-08
101455010001M	10	18-gen-08
10135801M0114	14	18-gen-08
101456010001M	20	18-gen-08
101405010001M	30	18-gen-08
SV080503	1	19-gen-08
A-P850045510	111	19-gen-08
A-P850048030	120	19-gen-08
101634010001M	1	21-gen-08
101419010001M	10	21-gen-08
101418010001M	14	21-gen-08
101085010001M	20	21-gen-08
10111001M0013	20	22-gen-08
SV080525	1	23-gen-08
101642010001M	3	23-gen-08
SV080481	62	23-gen-08
SV080243	1	24-gen-08
SV080246	1	24-gen-08
SV080247	1	24-gen-08
SV080491	1	24-gen-08
101401010001M	60	24-gen-08
SV080479	1	25-gen-08
101633010001M	5	28-gen-08
SV060875	2	31-gen-08
SV060876	2	31-gen-08
SV061196	4	31-gen-08
13000901M0013	5	31-gen-08
13001001M0013	5	31-gen-08
13001101M0013	5	31-gen-08
101644010001M	1	02-feb-08
10131301M0080	5	02-feb-08
10117701M0080	10	02-feb-08
10130801M0080	10	02-feb-08
10130901M0080	10	02-feb-08
23000001M0374	200	02-feb-08
10155301M0335	5	03-feb-08
10155401M0335	5	03-feb-08
101234010001M	10	03-feb-08
101233010001M	15	03-feb-08
101401010001M	53	03-feb-08
101636010001M	1	04-feb-08
151072010001M	1	04-feb-08
SV080537	1	04-feb-08
SV080542	1	04-feb-08
SV080593	1	04-feb-08
151076010001M	2	04-feb-08
10102601M0190	4	04-feb-08
10111701M0013	5	04-feb-08
10177201M0013	5	04-feb-08
10177301M0013	5	04-feb-08
10177301M0013	5	04-feb-08
10111701M0013	10	04-feb-08
15105501M0306	4	05-feb-08
10107701M0306	5	05-feb-08
10107801M0306	10	05-feb-08
101055010001M	15	05-feb-08
10124901M0267	30	05-feb-08
101455010001M	45	06-feb-08
A-P850027510	140	06-feb-08

A-P850053510	188	06-feb-08
A-P850047510	196	06-feb-08
A-P850008030	135	08-feb-08
A-P850048030	200	08-feb-08
101264010001M	60	09-feb-08
SV081237	1	10-feb-08
SV081346	1	10-feb-08
10124501M0126	5	11-feb-08
10138201M0079	1	12-feb-08
10136801M0079	2	12-feb-08
10138101M0079	2	12-feb-08
10137201M0079	3	12-feb-08
10137101M0079	5	12-feb-08
10124701M0267	10	12-feb-08
10174801M0013	15	12-feb-08
101456010001M	60	12-feb-08
A-P850064510	100	12-feb-08
101029010001M	4	13-feb-08
151040000001M	5	13-feb-08
A-P850067030	126	13-feb-08
A-P850066030	156	13-feb-08
101025010001M	25	14-feb-08
101401010001M	54	16-feb-08
151059000001M	2	19-feb-08
151061000001M	2	19-feb-08
151058000001M	3	19-feb-08
101399010001M	13	20-feb-08
101026010001M	10	24-feb-08
101029010001M	10	24-feb-08
15102701M0267	1	27-feb-08
101484010001M	7	02-mar-08
101488010001M	7	02-mar-08
23000012M0374	75	02-mar-08
110195010001M	10	04-mar-08
101158010001M	10	05-mar-08
101157010001M	5	06-mar-08
10154801M0013	20	06-mar-08
101042010001M	23	07-mar-08
101279010001M	15	16-mar-08
101264010001M	60	16-mar-08
SV080260	1	17-mar-08
SV080261	1	17-mar-08
10170101M0267	1	18-mar-08
10170601M0267	1	18-mar-08
10172801M0267	1	18-mar-08
10173101M0267	1	18-mar-08
10174501M0267	1	18-mar-08
SV070172	5	19-mar-08
101346010001M	3	20-mar-08
101629010001M	4	20-mar-08
101347010001M	5	20-mar-08
101348010001M	5	20-mar-08
10137201M0079	2	24-mar-08
10105801M0030	5	24-mar-08
10106801M0030	10	24-mar-08
101263010001M	2	25-mar-08
151079010001M	2	25-mar-08
42005201M0013	20	25-mar-08
4100069502108	19	26-mar-08
10117701M0080	10	27-mar-08
SV080420	1	28-mar-08
4100069501108	35	28-mar-08
10134201M0079	4	30-mar-08
10134301M0079	6	30-mar-08
10108301M0126	5	31-mar-08
10108401M0126	5	31-mar-08
101232010001M	5	31-mar-08

101234010001M	5	31-mar-08
10108301M0126	10	31-mar-08
101233010001M	25	31-mar-08
10135901M0114	1	01-apr-08
101418010001M	1	01-apr-08
SV080372	1	01-apr-08
SV080422	1	01-apr-08
101449010001M	5	01-apr-08
11002301M0267	6	01-apr-08
15103101M0013	8	01-apr-08
11002201M0267	22	01-apr-08
10124901M0267	30	01-apr-08
10146501M0267	30	01-apr-08
151009010001M	44	01-apr-08
A-P850007511	153	02-apr-08
101085010001M	1	03-apr-08
10151901M0126	5	03-apr-08
10162201M0267	5	03-apr-08
10121801M0091	10	03-apr-08
10151801M0126	15	03-apr-08
SV070172	5	04-apr-08
10156101M0174	10	04-apr-08
SV080157	30	04-apr-08
10107701M0306	5	06-apr-08
10107801M0306	5	06-apr-08
101489010001M	5	06-apr-08
15105301M0306	5	06-apr-08
SV080450	1	07-apr-08
10133701M0267	10	08-apr-08
101293010001M	80	08-apr-08
A-P850012510	576	08-apr-08
A-P850028030	300	09-apr-08
A-P850019510	882	09-apr-08
A-P850019510	882	10-apr-08
A-P850020510	882	10-apr-08
430189010	1	11-apr-08
430191010	1	11-apr-08
430202010	1	11-apr-08
SV080121	1	11-apr-08
SV080308	1	11-apr-08
SV080361	1	11-apr-08
SV080446	1	11-apr-08
SV080526	1	11-apr-08
13001801M0013	4	11-apr-08
101386890001M	7	11-apr-08
SV080156	8	11-apr-08
SV080159	8	11-apr-08
SV080158	12	11-apr-08
110054010001M	14	11-apr-08
23000001M0374	200	11-apr-08
15101001M0126	4	13-apr-08
15101501M0126	5	13-apr-08
101029010001M	10	13-apr-08
101042010001M	20	13-apr-08
101044010001M	19	14-apr-08
101263010001M	55	15-apr-08
A-P850021510	180	15-apr-08
SV071154	1	16-apr-08
SV080288	1	16-apr-08
10132901M0114	2	16-apr-08
10132901M0114	3	16-apr-08
SV080412	8	16-apr-08
SV080413	22	16-apr-08
SV080451	1	17-apr-08
10135901M0114	5	17-apr-08
101453010001M	10	17-apr-08
101455010001M	10	17-apr-08

10135801M0114	14	17-apr-08
101456010001M	20	17-apr-08
101405010001M	30	17-apr-08
SV080503	1	18-apr-08
A-P850045510	111	18-apr-08
A-P850048030	120	18-apr-08
101634010001M	1	20-apr-08
101419010001M	10	20-apr-08
101418010001M	14	20-apr-08
101085010001M	20	20-apr-08
10111001M0013	20	21-apr-08
SV080525	1	22-apr-08
101642010001M	3	22-apr-08
SV080481	62	22-apr-08
SV080243	1	23-apr-08
SV080246	1	23-apr-08
SV080247	1	23-apr-08
SV080491	1	23-apr-08
101401010001M	60	23-apr-08
SV080479	1	24-apr-08
101633010001M	5	27-apr-08
SV060875	2	30-apr-08
SV060876	2	30-apr-08
SV061196	4	30-apr-08
13000901M0013	5	30-apr-08
13001001M0013	5	30-apr-08
13001101M0013	5	30-apr-08
101644010001M	1	04-mag-08
10131301M0080	5	04-mag-08
10117701M0080	10	04-mag-08
10130801M0080	10	04-mag-08
10130901M0080	10	04-mag-08
23000001M0374	200	04-mag-08
10155301M0335	5	05-mag-08
10155401M0335	5	05-mag-08
101234010001M	10	05-mag-08
101233010001M	15	05-mag-08
101401010001M	53	05-mag-08
101636010001M	1	06-mag-08
151072010001M	1	06-mag-08
SV080537	1	06-mag-08
SV080542	1	06-mag-08
SV080593	1	06-mag-08
151076010001M	2	06-mag-08
10102601M0190	4	06-mag-08
10111701M0013	5	06-mag-08
10177201M0013	5	06-mag-08
10177301M0013	5	06-mag-08
10177301M0013	5	06-mag-08
10111701M0013	10	06-mag-08
15105501M0306	4	07-mag-08
10107701M0306	5	07-mag-08
10107801M0306	10	07-mag-08
101055010001M	15	07-mag-08
10124901M0267	30	07-mag-08
101455010001M	45	08-mag-08
A-P850027510	140	08-mag-08
A-P850053510	188	08-mag-08
A-P850047510	196	08-mag-08
A-P850008030	135	10-mag-08
A-P850048030	200	10-mag-08
101629010001M	1	11-mag-08
101264010001M	60	11-mag-08
SV080553	1	12-mag-08
101044890001M	8	12-mag-08
10121901M0091	10	12-mag-08
101453010001M	10	12-mag-08

A-P850054030	147	12-mag-08
A-P850052510	150	12-mag-08
A-P850025510	200	12-mag-08
A-P850028030	200	12-mag-08
A-P850007511	459	12-mag-08
10135801M0114	2	13-mag-08
10135901M0114	2	13-mag-08
10135901M0114	3	13-mag-08
10135801M0114	10	13-mag-08
10174801M0013	15	13-mag-08
A-P850046510	225	13-mag-08
A-P850024510	384	13-mag-08
101295010001M	1	14-mag-08
SV00000098835	1	14-mag-08
SV080511	1	14-mag-08
SV080515	1	14-mag-08
SV080616	1	14-mag-08
23000012M0374	4	14-mag-08
10108401M0126	5	14-mag-08
10126901M0088	5	14-mag-08
10132901M0114	5	14-mag-08
11008801M0126	5	14-mag-08
101264010001M	8	14-mag-08
23000001M0374	9	14-mag-08
10108301M0126	10	14-mag-08
151037000001M	15	14-mag-08
101044010001M	30	14-mag-08
101456010001M	50	14-mag-08
A-P850014511	154	14-mag-08
A-P850012510	1728	14-mag-08
SV080554	1	15-mag-08
SV080574	1	15-mag-08
SV080596	1	15-mag-08
151079010001M	3	15-mag-08
101454010001M	1	16-mag-08
101457010001M	15	16-mag-08
23000012M0374	50	16-mag-08
101293010001M	61	16-mag-08
A-P850009511	140	16-mag-08
SV070215	8	19-mag-08
10151901M0126	10	19-mag-08
10151801M0126	20	19-mag-08
A-P850019510	410	19-mag-08
SV080627	1	20-mag-08
10133701M0267	10	20-mag-08
10149901M0190	10	20-mag-08
101294010001M	15	20-mag-08
101373010001M	16	20-mag-08
A-P850045510	210	20-mag-08
10124501M0126	5	21-mag-08
101395010001M	5	21-mag-08
101394010001M	7	21-mag-08
101406010001M	10	21-mag-08
101405010001M	20	21-mag-08
A-P850010511	30	21-mag-08
10106901M0030	5	22-mag-08
10106801M0030	10	22-mag-08
101265010001M	20	22-mag-08
101263010001M	46	22-mag-08
A-P850021510	94	22-mag-08
SV080615	1	23-mag-08
101042010001M	25	24-mag-08
101633010001M	116	25-mag-08
101123010001M	10	26-mag-08
101672010001M	15	26-mag-08
10137201M0079	1	27-mag-08
10138101M0079	1	27-mag-08

10137001M0079	2	27-mag-08
10137001M0079	2	27-mag-08
10137101M0079	4	27-mag-08
101366010001M	19	27-mag-08
101264010001M	42	27-mag-08
A-P850020510	528	27-mag-08
101473010001M	10	28-mag-08
101085010001M	15	28-mag-08
101367010001M	14	29-mag-08
A-P850053510	94	29-mag-08
A-P850047510	196	29-mag-08
SV080561	1	30-mag-08
SV080562	1	30-mag-08
SV080563	1	30-mag-08
10132901M0114	3	30-mag-08
10132901M0114	9	30-mag-08
A-P850013510	270	30-mag-08
A-P850007511	459	30-mag-08
10140801M0373	1	02-giu-08
10173401M0267	1	02-giu-08
SV080668	1	03-giu-08
SV080669	1	03-giu-08
SV080714	1	03-giu-08
10101401M0383	10	03-giu-08
A-P850025510	100	03-giu-08
101233010001M	1	04-giu-08
101258010001M	1	04-giu-08
10141601M0373	1	04-giu-08
SV070675	2	04-giu-08
101489010001M	6	04-giu-08
101488010001M	8	04-giu-08
SV061458	10	04-giu-08
151008010001M	15	04-giu-08
15108101M0013	15	04-giu-08
151003000001M	16	04-giu-08
A-P850012510	1152	04-giu-08
10107701M0306	5	05-giu-08
15105401M0306	5	05-giu-08
15105601M0306	5	05-giu-08
10107801M0306	10	05-giu-08
15105301M0306	10	05-giu-08
101044890001M	15	05-giu-08
101028010001M	17	05-giu-08
A-P850046510	225	06-giu-08
101292010001M	10	08-giu-08
10154801M0013	15	09-giu-08
A-P850021510	40	09-giu-08
A-P850052510	50	09-giu-08
A-P850024510	256	09-giu-08
SV080635	1	10-giu-08
SV080639	1	10-giu-08
SV080640	1	10-giu-08
SV080698	1	10-giu-08
SV060875	2	10-giu-08
SV060876	2	10-giu-08
SV061196	2	10-giu-08
151071010001M	3	10-giu-08
SV061195	3	10-giu-08
SV080612	3	10-giu-08
101265010001M	4	10-giu-08
151069000001M	9	10-giu-08
10124901M0267	30	10-giu-08
A-P850028030	50	10-giu-08
A-P850008030	90	10-giu-08
A-P850054030	98	10-giu-08
101641010001M	1	11-giu-08
SV070842	1	11-giu-08

10108301M0126	5	11-giu-08
101232010001M	5	11-giu-08
10105801M0030	10	11-giu-08
10105901M0030	10	11-giu-08
10106901M0030	10	11-giu-08
10130901M0080	10	11-giu-08
10147601M0272	10	11-giu-08
10174801M0013	15	11-giu-08
10106801M0030	20	11-giu-08
10151801M0126	20	11-giu-08
SV080716	1	12-giu-08
SV080779	1	12-giu-08
10155301M0335	4	12-giu-08
10121601M0091	5	12-giu-08
10121901M0091	5	12-giu-08
10155401M0335	7	12-giu-08
10121801M0091	10	12-giu-08
101374010001M	10	12-giu-08
10151901M0126	10	12-giu-08
101293010001M	52	12-giu-08
151069000001M	1	13-giu-08
SV080612	1	13-giu-08
SV080683	1	13-giu-08
SV080737	1	13-giu-08
SV080780	1	13-giu-08
SV080815	1	13-giu-08
SV080613	5	13-giu-08
A-P850014511	154	13-giu-08
10135901M0114	2	15-giu-08
10135801M0114	8	15-giu-08
10135801M0114	10	15-giu-08
10135901M0114	10	15-giu-08
SV080612	1	16-giu-08
SV080781	1	16-giu-08
110054010001M	20	16-giu-08
101457010001M	21	16-giu-08
101455010001M	46	16-giu-08
A-P850048030	240	16-giu-08
101456010001M	53	17-giu-08
101393010001M	1	18-giu-08
SV080713	1	18-giu-08
SV080798	1	18-giu-08
101405010001M	2	18-giu-08
10111701M0013	5	18-giu-08
10111701M0013	5	18-giu-08
10111701M0013	5	18-giu-08
10126901M0088	5	18-giu-08
10135901M0114	5	18-giu-08
10177401M0013	5	18-giu-08
15101101M0126	5	18-giu-08
15101801M0126	5	18-giu-08
101065010001M	20	18-giu-08
101055010001M	1	19-giu-08
SV080849	2	19-giu-08
101385010001M	16	19-giu-08
A-P850011510	552	19-giu-08
SV080847	1	20-giu-08
SV080848	1	20-giu-08
10127101M0088	5	20-giu-08
A-P850010511	21	22-giu-08
A-P850009511	80	22-giu-08
SV080721	1	23-giu-08
101265010001M	10	23-giu-08
101263010001M	35	23-giu-08
23000001M0374	168	23-giu-08
A-P850045510	252	23-giu-08
101287010001M	10	24-giu-08

101293010001M	50	24-giu-08
SV080845	1	25-giu-08
SV080846	1	25-giu-08
101454010001M	3	25-giu-08
10111801M0013	5	25-giu-08
10111801M0013	5	25-giu-08
11005301M0126	5	25-giu-08
101453010001M	6	25-giu-08
11008901M0126	7	25-giu-08
101043010001M	12	26-giu-08
101025010001M	27	26-giu-08
SV080805	1	27-giu-08
101055010001M	8	29-giu-08
101399010001M	14	29-giu-08
101401010001M	70	29-giu-08
11002301M0267	4	30-giu-08
110195010001M	10	30-giu-08
11002201M0267	14	30-giu-08
10170101M0267	1	01-lug-08
10170101M0267	1	01-lug-08
151071010001M	1	01-lug-08
151080010001M	1	01-lug-08
SV00000098835	1	01-lug-08
SV080739	1	01-lug-08
SV080743	1	01-lug-08
SV080793	1	01-lug-08
SV080829	1	01-lug-08
151072010001M	3	01-lug-08
10111001M0013	5	01-lug-08
151058000001M	5	01-lug-08
151051010001M	7	01-lug-08
101034010001M	8	01-lug-08
10111001M0013	10	01-lug-08
101459010001M	10	01-lug-08
151050010001M	10	01-lug-08
151060000001M	11	01-lug-08
420044010001M	20	01-lug-08
151024010001M	40	01-lug-08
151009010001M	44	01-lug-08
A-P850008030	90	01-lug-08
A-P850028030	250	01-lug-08
A-P850015510	256	01-lug-08
A-P850027510	280	01-lug-08
A-P850047510	392	01-lug-08
101407010001M	4	02-lug-08
101405010001M	28	02-lug-08
151003000001M	35	02-lug-08
A-P850007511	459	02-lug-08
10154401M0190	2	03-lug-08
10154401M0190	2	03-lug-08
10154601M0190	2	03-lug-08
10154701M0190	2	03-lug-08
10154701M0190	2	03-lug-08
15105501M0306	3	03-lug-08
101257010001M	5	03-lug-08
101347010001M	5	03-lug-08
101455010001M	5	03-lug-08
101457010001M	5	03-lug-08
101292010001M	6	03-lug-08
15105401M0306	7	03-lug-08
10107701M0306	10	03-lug-08
10107801M0306	10	03-lug-08
101456010001M	10	03-lug-08
15105301M0306	15	03-lug-08
A-P850046510	375	03-lug-08
10124701M0267	10	04-lug-08
10124901M0267	14	04-lug-08

10146501M0267	20	04-lug-08
101293010001M	68	04-lug-08
A-P850048030	80	05-lug-08
A-P850048030	360	05-lug-08
101258010001M	1	07-lug-08
10136801M0079	1	07-lug-08
10137201M0079	1	07-lug-08
SV080880	1	07-lug-08
10137001M0079	2	07-lug-08
10137201M0079	2	07-lug-08
10136801M0079	4	07-lug-08
10137101M0079	4	07-lug-08
10177301M0013	5	07-lug-08
10177401M0013	5	07-lug-08
11017501M0079	10	07-lug-08
A-P850025510	100	07-lug-08
101395010001M	2	08-lug-08
101394010001M	10	08-lug-08
A-P850046510	75	08-lug-08
A-P850024510	512	08-lug-08
101629010001M	1	09-lug-08
SV060279	1	09-lug-08
SV061516	1	09-lug-08
101264010001M	3	09-lug-08
101284010001M	4	09-lug-08
10140901M0373	4	09-lug-08
13000901M0013	4	09-lug-08
101348010001M	5	09-lug-08
13001001M0013	5	09-lug-08
13001101M0013	5	09-lug-08
10140801M0373	10	09-lug-08
101345010001M	13	09-lug-08
151041000001M	17	09-lug-08
A-P850011510	552	09-lug-08
101454010001M	3	10-lug-08
10108401M0126	5	11-lug-08
101232010001M	5	11-lug-08
10141601M0373	5	11-lug-08
10108301M0126	10	11-lug-08
101055010001M	15	11-lug-08
101234010001M	15	11-lug-08
101233010001M	20	11-lug-08
101457010001M	30	11-lug-08
A-P850020510	882	11-lug-08
10126601M0088	5	13-lug-08
SV080799	1	14-lug-08
10135901M0114	2	14-lug-08
10135901M0114	4	14-lug-08
10135901M0114	5	14-lug-08
10135801M0114	12	14-lug-08
10135801M0114	12	14-lug-08
A-P850020510	328	14-lug-08
101292010001M	2	15-lug-08
101485010001M	4	15-lug-08
10156201M0174	5	15-lug-08
10156101M0174	10	15-lug-08
101288010001M	21	15-lug-08
101455010001M	30	15-lug-08
101456010001M	55	15-lug-08
10151901M0126	10	16-lug-08
10151801M0126	20	16-lug-08
101042010001M	20	17-lug-08
101044010001M	20	17-lug-08
A-P850009511	120	17-lug-08
A-P850045510	390	17-lug-08
A-P850012510	408	17-lug-08
SV080968	1	18-lug-08

10132901M0114	4	18-lug-08
10124501M0126	5	18-lug-08
10125001M0126	5	18-lug-08
10132901M0114	5	18-lug-08
A-P850045510	66	18-lug-08
A-P850028030	100	18-lug-08
A-P850021510	120	18-lug-08
A-P850027510	140	18-lug-08
SV080926	1	21-lug-08
SV080977	1	21-lug-08
10152801M0190	2	21-lug-08
10152801M0190	2	21-lug-08
101399010001M	16	21-lug-08
101401010001M	50	21-lug-08
SV080865	1	22-lug-08
10104801M0301	4	22-lug-08
10177301M0013	5	22-lug-08
SV080614	5	22-lug-08
151025010001M	7	22-lug-08
10135801M0114	8	22-lug-08
101293010001M	50	22-lug-08
101660010001M	2	23-lug-08
15102701M0267	2	23-lug-08
10133901M0267	3	23-lug-08
10129901M0391	6	23-lug-08
101264010001M	82	23-lug-08
101042890001M	15	24-lug-08
101085010001M	15	24-lug-08
101263010001M	34	24-lug-08
101026010001M	1	25-lug-08
101028010001M	2	25-lug-08
101044890001M	2	25-lug-08
151072010001M	2	25-lug-08
101366890001M	5	25-lug-08
101484010001M	5	25-lug-08
101488010001M	5	25-lug-08
101489010001M	5	25-lug-08
SV080835	5	25-lug-08
SV080836	5	25-lug-08
151071010001M	6	25-lug-08
151048000001M	9	25-lug-08
101366010001M	22	28-lug-08
10109401M0091	1	29-lug-08
SV060875	2	30-lug-08
SV060875	2	30-lug-08
SV060876	2	30-lug-08
SV060876	2	30-lug-08
13000901M0013	5	30-lug-08
13001701M0013	5	30-lug-08
10141601M0373	2	31-lug-08
13001201M0013	4	29-ago-08
13001001M0013	5	29-ago-08
13001801M0013	5	29-ago-08
10117701M0080	9	29-ago-08
10124901M0267	15	29-ago-08
10124901M0267	30	29-ago-08
SV080949	1	01-set-08
10133701M0267	10	01-set-08
10133801M0267	10	01-set-08
101287010001M	24	01-set-08
101544010001M	2	02-set-08
101545010001M	2	02-set-08
10135801M0114	4	02-set-08
10154401M0190	4	02-set-08
10154601M0190	4	02-set-08
10127701M0080	5	02-set-08
11017101M0080	5	02-set-08

11017301M0080	5	02-set-08
10127601M0080	10	02-set-08
11017201M0080	10	02-set-08
15108201M0013	14	02-set-08
101044890001M	15	02-set-08
101025010001M	17	02-set-08
10108401M0126	5	03-set-08
101232010001M	5	03-set-08
101257010001M	9	03-set-08
10101401M0383	10	03-set-08
10130801M0080	10	03-set-08
101234010001M	14	03-set-08
101385010001M	14	03-set-08
10108301M0126	15	03-set-08
101233010001M	30	03-set-08
A-P850007511	306	03-set-08
SV081038	2	04-set-08
101065010001M	4	04-set-08
10121601M0091	5	04-set-08
10135901M0114	5	04-set-08
SV081037	6	04-set-08
10135801M0114	8	04-set-08
10121801M0091	10	04-set-08
10121901M0091	10	04-set-08
10135801M0114	10	04-set-08
A-P850025510	100	04-set-08
A-P850046510	150	04-set-08
101455010001M	35	05-set-08
101457010001M	35	05-set-08
101456010001M	65	05-set-08
23000001M0374	250	05-set-08
SV081043	2	08-set-08
15101801M0126	4	08-set-08
15101501M0126	5	08-set-08
11008901M0126	8	08-set-08
101026010001M	14	08-set-08
101028010001M	15	08-set-08
A-P850008030	90	08-set-08
SV080954	1	09-set-08
SV080955	1	09-set-08
SV081042	1	09-set-08
101085010001M	2	09-set-08
SV061196	2	09-set-08
101355010001M	3	09-set-08
151084010001M	3	09-set-08
SV061195	4	09-set-08
101608010001M	5	09-set-08
101264010001M	8	09-set-08
101386010001M	12	09-set-08
110054010001M	14	09-set-08
A-P850028030	100	09-set-08
151080010001M	1	10-set-08
101645010001M	2	10-set-08
101646010001M	3	10-set-08
101647010001M	3	10-set-08
10111701M0013	5	10-set-08
10111701M0013	5	10-set-08
10111801M0013	5	10-set-08
10177301M0013	5	10-set-08
10177401M0013	5	10-set-08
10177401M0013	5	10-set-08
101363010001M	14	10-set-08
110081010001M	14	10-set-08
10151801M0126	15	10-set-08
10154801M0013	15	10-set-08
A-P850048030	160	10-set-08
SV080983	1	11-set-08

10141401M0373	3	11-set-08
101529010001M	3	11-set-08
101292010001M	5	11-set-08
101293010001M	80	11-set-08
A-P850027510	140	11-set-08
A-P850047510	196	11-set-08
A-P850024510	256	11-set-08
101042010001M	10	12-set-08
SV080159	16	12-set-08
SV080916	1	15-set-08
SV081114	1	15-set-08
101528010001M	2	15-set-08
10111001M0013	10	15-set-08
10151901M0126	10	15-set-08
10151801M0126	20	15-set-08
10170201M0267	1	16-set-08
10171101M0267	1	16-set-08
10172701M0267	1	16-set-08
SV081029	1	16-set-08
10107801M0306	3	16-set-08
15105501M0306	3	16-set-08
10125001M0126	5	16-set-08
15105401M0306	5	16-set-08
101025010001M	7	16-set-08
10107701M0306	8	16-set-08
15105301M0306	8	16-set-08
10174701M0013	15	16-set-08
SV081054	1	17-set-08
SV080981	2	17-set-08
10177301M0013	5	17-set-08
101406010001M	15	17-set-08
101405010001M	25	17-set-08
101401010001M	90	17-set-08
SV081124	5	18-set-08
101258010001M	2	19-set-08
101257010001M	4	19-set-08
101455010001M	10	19-set-08
101457010001M	10	19-set-08
101065010001M	15	19-set-08
11002201M0267	17	19-set-08
101065010001M	20	19-set-08
10135801M0114	20	19-set-08
101456010001M	25	19-set-08
SV081026	1	22-set-08
SV081127	1	22-set-08
101055010001M	10	22-set-08
101366010001M	17	22-set-08
A-P850011510	552	22-set-08
10156201M0174	6	23-set-08
10156101M0174	8	23-set-08
101330010001M	20	23-set-08
A-P850045510	132	23-set-08
SV081001	1	24-set-08
101264010001M	42	24-set-08
101263010001M	50	24-set-08
A-P850019510	1764	24-set-08
SV081062	1	25-set-08
101386010001M	3	25-set-08
151049010001M	15	25-set-08
A-P850009511	30	25-set-08
A-P850020510	1764	25-set-08
101385890001M	1	26-set-08
101487010001M	1	26-set-08
A-P850021510	20	26-set-08
151073010001M	1	29-set-08
SV080997	1	29-set-08
101642010001M	3	29-set-08

101347010001M	5	29-set-08
101348010001M	5	29-set-08
101345010001M	10	29-set-08
151003000001M	15	29-set-08
101632010001M	1	30-set-08
101671010001M	1	30-set-08
SV081072	1	30-set-08
SV081154	1	30-set-08
SV081174	1	30-set-08
SV081176	1	30-set-08
101293010001M	13	30-set-08
SV081200	1	01-ott-08
SV081200	4	01-ott-08
10126901M0088	5	01-ott-08
13001101M0013	5	01-ott-08
10124901M0267	10	01-ott-08
101085010001M	15	01-ott-08
10111001M0013	15	01-ott-08
101263010001M	24	01-ott-08
10124901M0267	30	01-ott-08
A-P850007511	306	01-ott-08
SV081042	4	02-ott-08
SV081039	5	02-ott-08
SV081040	5	02-ott-08
SV081041	5	02-ott-08
101418010001M	8	02-ott-08
SV081038	8	02-ott-08
10111701M0013	10	02-ott-08
10111801M0013	10	02-ott-08
SV081037	34	02-ott-08
A-P850053510	94	02-ott-08
A-P850027510	140	02-ott-08
101385890001M	3	03-ott-08
10146501M0267	10	03-ott-08
A-P850020510	1764	03-ott-08
A-P850019510	2646	03-ott-08
11002301M0267	6	04-ott-08
101455010001M	35	06-ott-08
101457010001M	35	06-ott-08
101456010001M	65	06-ott-08
SV080537	1	07-ott-08
10135901M0114	2	07-ott-08
10135901M0114	4	07-ott-08
101284010001M	5	07-ott-08
101283010001M	6	07-ott-08
10135801M0114	6	07-ott-08
10135801M0114	8	07-ott-08
10135801M0114	14	07-ott-08
A-P850046510	75	07-ott-08
101042890001M	15	08-ott-08
101042010001M	18	08-ott-08
101044010001M	19	08-ott-08
SV061310	1	09-ott-08
SV081112	1	09-ott-08
10103901M0306	2	09-ott-08
10107701M0306	5	09-ott-08
10134201M0079	5	09-ott-08
10134301M0079	5	09-ott-08
15105401M0306	5	09-ott-08
10107801M0306	10	09-ott-08
A-P850025510	300	09-ott-08
101401010001M	60	10-ott-08
SV081043	3	13-ott-08
101234010001M	5	13-ott-08
10105801M0030	10	13-ott-08
10106801M0030	10	13-ott-08
10106901M0030	10	13-ott-08

101550010001M	10	13-ott-08
101233010001M	25	13-ott-08
101418010001M	1	14-ott-08
SV081184	1	14-ott-08
SV081191	1	14-ott-08
SV081210	1	14-ott-08
SV081211	1	14-ott-08
SV081252	1	14-ott-08
SV081190	2	14-ott-08
10108401M0126	5	14-ott-08
11009101M0013	9	14-ott-08
10108301M0126	10	14-ott-08
10130901M0080	10	14-ott-08
101374010001M	11	14-ott-08
110054010001M	15	14-ott-08
A-P850054030	98	14-ott-08
SV081111	1	15-ott-08
SV081238	1	15-ott-08
101027010001M	8	15-ott-08
10151801M0126	10	15-ott-08
10151901M0126	10	15-ott-08
101044890001M	11	15-ott-08
101055010001M	12	15-ott-08
101363010001M	15	15-ott-08
101373010001M	18	15-ott-08
101263010001M	26	15-ott-08
10141401M0373	1	16-ott-08
101293010001M	77	16-ott-08
A-P850024510	128	16-ott-08
10124401M0373	1	17-ott-08
SV081262	2	17-ott-08
A-P850028030	200	17-ott-08
SV061516	1	20-ott-08
SV081212	1	20-ott-08
10121801M0091	10	20-ott-08
10109601M0091	1	21-ott-08
101486010001M	1	21-ott-08
SV081280	1	21-ott-08
SV081314	1	21-ott-08
SV081315	1	21-ott-08
SV081316	1	21-ott-08
101387010001M	5	21-ott-08
10156101M0174	5	21-ott-08
11002301M0267	5	21-ott-08
11002301M0267	5	21-ott-08
101405010001M	15	21-ott-08
10141401M0373	1	22-ott-08
101295010001M	3	22-ott-08
101043010001M	10	22-ott-08
101294010001M	20	22-ott-08
A-P850052510	140	22-ott-08
SV080835	5	23-ott-08
SV080836	5	23-ott-08
A-P850045510	15	23-ott-08
A-P850021510	90	23-ott-08
SV081263	1	24-ott-08
SV081335	1	24-ott-08
101458010001M	10	24-ott-08
23000001M0374	108	24-ott-08
10154801M0013	15	27-ott-08
SV081302	1	28-ott-08
151034000001M	3	28-ott-08
10104601M0267	5	28-ott-08
10175501M0347	5	28-ott-08
10175401M0347	20	28-ott-08
10175301M0347	25	28-ott-08
151072010001M	1	29-ott-08

151074010001M	1	29-ott-08
SV081306	1	29-ott-08
SV081364	1	29-ott-08
SV081381	1	29-ott-08
10156201M0174	5	29-ott-08
151048000001M	6	29-ott-08
101264010001M	11	29-ott-08
101472010001M	15	29-ott-08
151024010001M	41	29-ott-08
SV081276	1	30-ott-08
10172801M0267	1	31-ott-08
SV081230	1	31-ott-08
23000001M0374	99	31-ott-08
23000001M0374	100	31-ott-08
SV081236	1	03-nov-08
SV081237	1	03-nov-08
SV081346	1	03-nov-08
101026010001M	20	03-nov-08
10138201M0079	1	04-nov-08
SV080537	1	04-nov-08
10136801M0079	2	04-nov-08
10138101M0079	2	04-nov-08
10137201M0079	3	04-nov-08
10124501M0126	5	04-nov-08
10137101M0079	5	04-nov-08
10124701M0267	10	04-nov-08
10174801M0013	15	04-nov-08
101456010001M	60	04-nov-08
A-P850064510	100	04-nov-08
A-P850067030	126	04-nov-08
A-P850066030	156	04-nov-08
101406010001M	20	05-nov-08
101406010001M	20	05-nov-08
10124901M0267	30	05-nov-08
A-P850070510	874	05-nov-08
SV081414	1	06-nov-08
101385010001M	6	06-nov-08
101386010001M	6	06-nov-08
15108101M0013	15	06-nov-08
A-P850068510	180	06-nov-08
A-P850069510	180	06-nov-08
10126901M0088	5	07-nov-08
10127101M0088	5	07-nov-08
101034010001M	14	07-nov-08
10151801M0126	20	07-nov-08
101293010001M	56	10-nov-08
101488010001M	8	11-nov-08
101028010001M	10	11-nov-08
101294010001M	15	11-nov-08
A-P850065510	70	11-nov-08
101455010001M	25	12-nov-08
101457010001M	25	12-nov-08
10101701M0376	1	13-nov-08
10141601M0373	1	13-nov-08
SV081425	1	13-nov-08
SV081448	1	13-nov-08
SV081486	2	13-nov-08
101092010001M	5	13-nov-08
10135901M0114	5	13-nov-08
11008901M0126	7	13-nov-08
10135801M0114	24	13-nov-08
SV081474	1	14-nov-08
151080010001M	3	14-nov-08
101279010001M	7	14-nov-08
101263010001M	47	14-nov-08
101264010001M	49	14-nov-08
A-P850072510	1372	14-nov-08

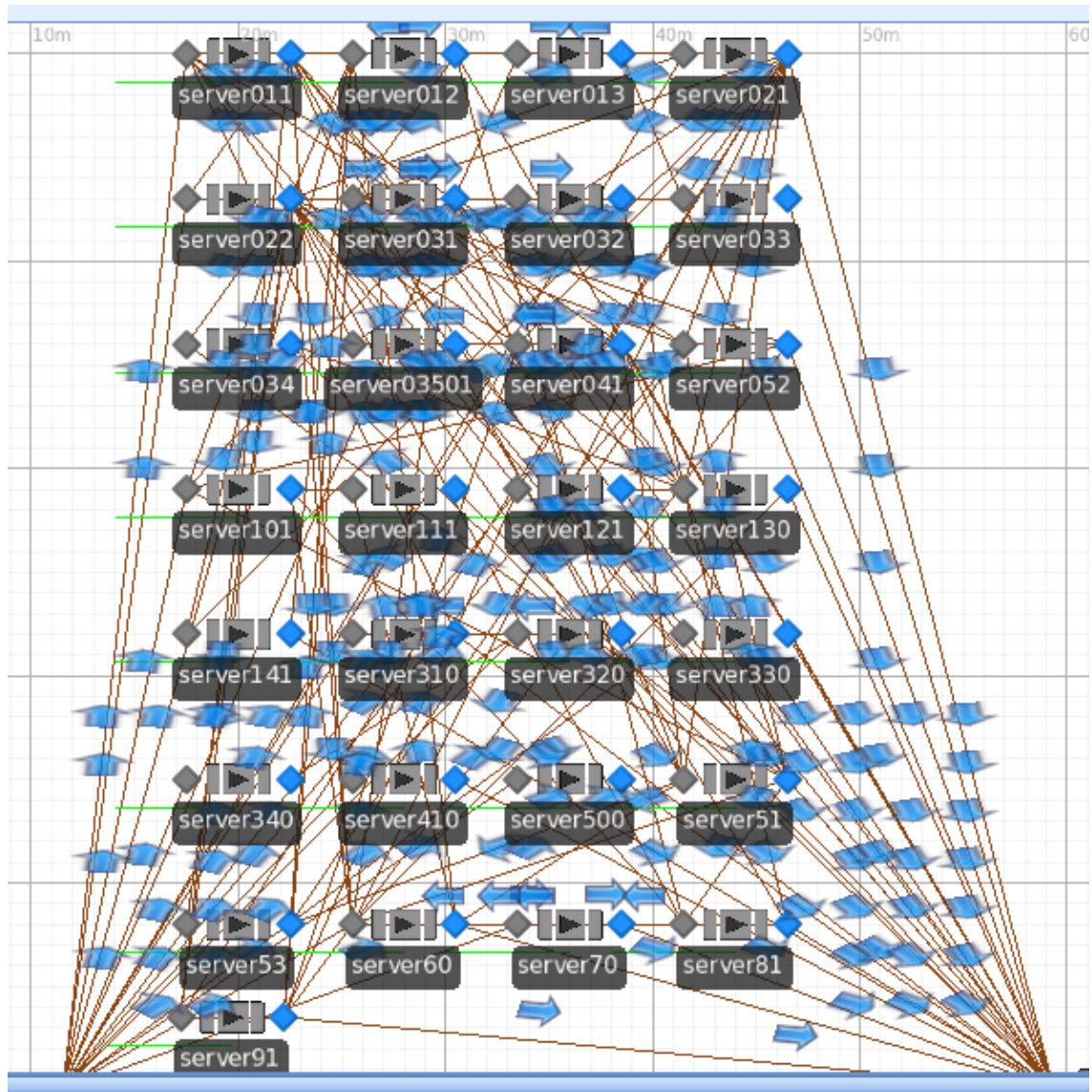
SV081392	1	17-nov-08
SV081393	1	17-nov-08
101232010001M	5	17-nov-08
10106801M0030	10	17-nov-08
11002301M0267	10	17-nov-08
SV081422	1	18-nov-08
10155301M0335	5	18-nov-08
10155401M0335	5	18-nov-08
101042010001M	30	18-nov-08
101362010001M	7	19-nov-08
101065010001M	29	19-nov-08
SV081399	1	20-nov-08
A-P850047510	196	20-nov-08
SV081349	1	21-nov-08
101385010001M	10	21-nov-08
SV081200	13	21-nov-08
SV081429	1	24-nov-08
A-P850019510	882	25-nov-08
A-P850020510	1764	25-nov-08
SV081434	1	26-nov-08
SV081457	1	26-nov-08
SV081483	1	26-nov-08
A-P850048030	160	26-nov-08
SV080865	1	27-nov-08
10104801M0301	4	27-nov-08
10177301M0013	5	27-nov-08
SV080614	5	27-nov-08
151025010001M	7	27-nov-08
10135801M0114	8	27-nov-08
101293010001M	50	27-nov-08
101264010001M	82	27-nov-08
A-P850045510	171	27-nov-08
101660010001M	2	28-nov-08
15102701M0267	2	28-nov-08
10133901M0267	3	28-nov-08
10129901M0391	6	28-nov-08
101042890001M	15	28-nov-08
101085010001M	15	28-nov-08
4100069502108	24	28-nov-08
101263010001M	34	28-nov-08
A-P850046510	75	28-nov-08
A-P850007511	153	28-nov-08
SV081346	1	01-dic-08
10138201M0079	1	02-dic-08
10136801M0079	2	02-dic-08
10138101M0079	2	02-dic-08
10137201M0079	3	02-dic-08
10124501M0126	5	02-dic-08
10137101M0079	5	02-dic-08
10124701M0267	10	02-dic-08
10174801M0013	15	02-dic-08
101456010001M	60	02-dic-08
SV080420	1	03-dic-08
10134201M0079	4	03-dic-08
10108301M0126	5	03-dic-08
10108401M0126	5	03-dic-08
101232010001M	5	03-dic-08
101234010001M	5	03-dic-08
10134301M0079	6	03-dic-08
10108301M0126	10	03-dic-08
101233010001M	25	03-dic-08
10135901M0114	1	04-dic-08
101418010001M	1	04-dic-08
SV080372	1	04-dic-08
SV080422	1	04-dic-08
101449010001M	5	04-dic-08
11002301M0267	6	04-dic-08

15103101M0013	8	04-dic-08
11002201M0267	22	04-dic-08
10124901M0267	30	04-dic-08
10146501M0267	30	04-dic-08
151009010001M	44	04-dic-08
101455010001M	35	05-dic-08
101457010001M	35	05-dic-08
101456010001M	65	05-dic-08
SV080537	1	06-dic-08
10135901M0114	2	06-dic-08
10135901M0114	4	06-dic-08
101284010001M	5	06-dic-08
101283010001M	6	06-dic-08
10135801M0114	6	06-dic-08
10135801M0114	8	06-dic-08
10135801M0114	14	06-dic-08
101042890001M	15	06-dic-08
101042010001M	18	06-dic-08
101044010001M	19	06-dic-08
A-P850046510	75	06-dic-08
10103901M0306	2	08-dic-08
SV061310	1	09-dic-08
SV081112	1	09-dic-08
10107701M0306	5	09-dic-08
10134201M0079	5	09-dic-08
10134301M0079	5	09-dic-08
15105401M0306	5	09-dic-08
10107801M0306	10	09-dic-08
101401010001M	60	09-dic-08
A-P850025510	300	09-dic-08
SV081043	3	12-dic-08
101234010001M	5	12-dic-08
10105801M0030	10	12-dic-08
10106801M0030	10	12-dic-08
10106901M0030	10	12-dic-08
101550010001M	10	12-dic-08
101233010001M	25	12-dic-08
101418010001M	1	13-dic-08
SV081184	1	13-dic-08
SV081191	1	13-dic-08
SV081210	1	13-dic-08
SV081211	1	13-dic-08
SV081252	1	13-dic-08
SV081190	2	13-dic-08
10108401M0126	5	13-dic-08
11009101M0013	9	13-dic-08
10108301M0126	10	13-dic-08
10130901M0080	10	13-dic-08
101374010001M	11	13-dic-08
110054010001M	15	13-dic-08
A-P850054030	98	13-dic-08
SV081111	1	14-dic-08
SV081238	1	14-dic-08
101027010001M	8	14-dic-08
10151801M0126	10	14-dic-08
10151901M0126	10	14-dic-08
101044890001M	11	14-dic-08
101055010001M	12	14-dic-08
101363010001M	15	14-dic-08
101373010001M	18	14-dic-08
101263010001M	26	14-dic-08
10141401M0373	1	15-dic-08
101293010001M	77	15-dic-08
A-P850024510	128	15-dic-08
10124401M0373	1	16-dic-08
SV081262	2	16-dic-08
A-P850028030	200	16-dic-08

SV061516	1	19-dic-08
SV081212	1	19-dic-08
10121801M0091	10	19-dic-08
10109601M0091	1	20-dic-08
101486010001M	1	20-dic-08
SV081280	1	20-dic-08
SV081314	1	20-dic-08
SV081315	1	20-dic-08
SV081316	1	20-dic-08
101387010001M	5	20-dic-08
10156101M0174	5	20-dic-08
11002301M0267	5	20-dic-08
11002301M0267	5	20-dic-08
101405010001M	15	20-dic-08
10141401M0373	1	21-dic-08
101295010001M	3	21-dic-08
101043010001M	10	21-dic-08
101294010001M	20	21-dic-08
A-P850052510	140	21-dic-08
SV080835	5	22-dic-08
SV080836	5	22-dic-08
A-P850045510	15	22-dic-08
A-P850021510	90	22-dic-08
SV081263	1	23-dic-08
SV081335	1	23-dic-08
101458010001M	10	23-dic-08
23000001M0374	108	23-dic-08
SV081302	1	27-dic-08
151034000001M	3	27-dic-08
10104601M0267	5	27-dic-08
10175501M0347	5	27-dic-08
10154801M0013	15	27-dic-08
10175401M0347	20	27-dic-08
10175301M0347	25	27-dic-08
151072010001M	1	28-dic-08
151074010001M	1	28-dic-08
SV081306	1	28-dic-08
SV081364	1	28-dic-08
SV081381	1	28-dic-08
10156201M0174	5	28-dic-08
151048000001M	6	28-dic-08
101264010001M	11	28-dic-08
101472010001M	15	28-dic-08
151024010001M	41	28-dic-08
SV081276	1	29-dic-08
10172801M0267	1	30-dic-08
23000001M0374	100	30-dic-08

Struttura del sistema produttivo

Tabella 43 - Centri di lavoro, struttura del sistema produttivo e routings.



Appendice D

Risultati sperimentali del piano 1

Tabella 44 – Risultati sperimentali del piano simulativo senza WLB2.

Run	Load accounting method	Order pool rules	Dispatching rules	Lot splitting	Release workload control method	Time limit	Release period	Load Limit	MT	TD	ML	LD	PT	MSU	MSFT	MTFT	MSHW	MSYW
1	Aggregato	PRD	Critical Ratio	0	WLB1	20	7	180	344,584	20,7415	325,81	23,4109	0,261611	0,756408	48,4885	476,045	874,327	1672,34
2	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	1	WLB3	15	5	100	379,601	14,1301	358,062	15,5301	0,266514	0,765114	54,0383	347,958	868,03	1433,43
3	Aggregato	PRD	Operation Due Date	1	WLB3	8	5	100	508,228	15,2747	505,246	15,7659	0,291928	0,770781	219,657	547,69	1001,65	1300,64
4	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	15	7	180	358,044	19,8136	352,129	21,776	0,263552	0,77052	57,3254	464,442	935,734	1565,09
5	Aggregato	CR	Closest Due Date	0	WUL	20	7	180	359,691	19,0238	309,233	21,5042	0,267942	0,714918	39,428	262,155	708,887	1396,97
6	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WUL	15	2	320	407,687	14,1553	366,446	15,5138	0,275476	0,728226	43,9066	134,635	770,491	1159,21
7	Aggregato	PRD	Operation Due Date	1	WLB3	15	2	260	407,416	13,5849	376,843	14,9958	0,288965	0,744603	49,6292	216,943	818,402	1301,35
8	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	7	180	352,815	18,1775	297,619	20,8786	0,254	0,753366	44,0674	237,842	732,535	1385,47
9	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	260	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
10	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	7	100	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
11	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	5	180	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
12	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	320	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
13	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB1	15	2	100	393,152	19,8136	354,553	21,776	0,263552	0,744985	45,2692	193,702	823,208	1295,65
14	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WLB3	15	5	180	377,792	13,2086	344,15	14,6565	0,280322	0,750986	51,1075	210,276	802,704	1289,71
15	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	180	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
16	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WUL	20	7	180	359,691	19,0238	309,233	21,5042	0,267942	0,714918	39,428	262,155	708,887	1396,97
17	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WUL	8	5	320	464,7	15,2028	446,347	15,7373	0,297248	0,768378	58,5266	164,248	1005,85	1238,82
18	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB3	20	7	180	327,61	16,8455	263,911	20,2123	0,263484	0,725721	31,6798	251,81	717,78	1406,18
19	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	2	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
20	Aggregato	CR	Closest Due Date	0	WLB1	20	2	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
21	Aggregato	CR	Closest Due Date	0	WLB3	20	7	180	327,61	16,8455	263,911	20,2123	0,263484	0,725721	31,6798	251,81	717,78	1406,18
22	Aggregato	CR	Closest Due Date	0	WLB1	20	7	100	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
23	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WLB3	15	7	100	378,781	13,7081	346,798	15,0329	0,29581	0,757886	43,3421	250,444	796,798	1306,25
24	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WUL	20	7	180	359,691	19,0238	309,233	21,5042	0,267942	0,714918	39,428	262,155	708,887	1396,97
25	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	7	260	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
26	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	1	WLB3	15	5	100	408,354	14,1301	378,857	15,5301	0,266514	0,740644	44,3784	236,377	797,82	1302,58
27	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WUL	8	2	100	466,955	15,799	453,826	16,2558	0,294419	0,772626	47,2798	188,091	930,308	1208,03
28	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	1	WUL	15	2	100	367,839	12,4887	322,716	14,0673	0,277701	0,709297	38,222	174,624	646,605	1106,45
29	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	2	180	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
30	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	5	180	340,373	16,9682	291,074	19,8386	0,255422	0,751791	39,9765	266,049	740,058	1410,97
31	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	260	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
32	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB3	20	7	180	327,61	16,8455	263,911	20,2123	0,263484	0,725721	31,6798	251,81	717,78	1406,18
33	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	15	7	180	396,862	18,9697	372,894	20,535	0,283218	0,754039	42,2395	247,103	784,916	1319,98

34	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	7	260	416,778	20,9886	382,368	22,7542	0,274023	0,759861	50,1318	193,17	833,334	1311,82
35	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	100	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
36	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB1	20	7	260	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
37	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WLB1	20	5	320	398,94	13,7248	339,526	15,5866	0,24938	0,719976	46,3321	133,082	714,664	1202,31
38	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	7	180	339,63	16,8568	274,286	20,3545	0,258654	0,748232	39,8267	259,492	761,438	1451,01
39	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	1	WLB3	20	2	100	339,522	11,6664	278,172	14,0435	0,25393	0,718043	39,3358	217,346	703,231	1317,28
40	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	8	7	180	460,545	20,9434	444,708	21,7844	0,313901	0,810761	64,4514	175,223	1233,55	1484,15
41	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	7	180	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
42	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	7	320	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
43	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	100	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
44	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	5	180	416,778	20,9886	382,368	22,7542	0,274023	0,759861	50,1318	193,17	833,334	1311,82
45	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	7	180	416,778	20,9886	382,368	22,7542	0,274023	0,759861	50,1318	193,17	833,334	1311,82
46	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	7	260	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
47	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WLB3	15	5	260	377,792	13,2086	344,15	14,6565	0,274483	0,750986	51,1075	210,276	802,704	1289,71
48	Aggregato	CR	Operation Due Date	1	WLB1	20	7	180	395,575	13,6803	335,843	15,537	0,248758	0,720385	46,725	132,913	713,496	1197,93
49	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	1	WUL	8	2	260	465,305	15,2106	447,029	15,7483	0,297248	0,768018	58,6108	164,513	1005,81	1239,72
50	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	7	320	416,778	20,9886	382,368	22,7542	0,274023	0,759861	50,1318	193,17	833,334	1311,82
51	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	7	100	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
52	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WUL	20	7	180	359,691	19,0238	309,233	21,5042	0,267942	0,714891	39,4026	262,055	708,966	1397,05
53	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	7	100	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
54	Load Conversion	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	180	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
55	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	7	260	388,352	19,492	322,189	22,3786	0,272906	0,736809	46,5399	204,215	742,309	1351,37
56	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	7	260	472,698	22,2125	457,702	22,8763	0,299774	0,800395	64,4771	168,606	1225,12	1489,96
57	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	7	320	420,125	20,9016	348,418	23,95	0,249038	0,759693	50,6493	175,159	785,936	1344,3
58	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WUL	20	2	260	400,358	13,7524	342,075	15,5958	0,252392	0,718199	46,506	134,153	712,032	1202,21
59	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	260	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756944	50,5369	182,816	781,634	1338,31
60	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	260	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
61	Aggregato	PRD	Closest Due Date	1	WUL	15	5	180	408,054	14,2028	364,789	15,6031	0,258876	0,727974	43,7223	137,28	758,282	1152,44
62	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	0	WLB3	8	5	260	454,359	21,9166	442,922	22,6374	0,315402	0,794451	50,0321	182,126	1113,39	1394,18
63	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	320	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
64	Load Conversion	CR	Closest Due Date	0	WLB1	20	7	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
65	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	7	180	416,635	20,9518	381,91	22,7777	0,282243	0,763872	49,1744	196,324	819,421	1300,24
66	Load Conversion	PRD	Critical Ratio	1	WUL	8	2	320	464,7	15,2028	446,347	15,7373	0,297248	0,768378	58,5266	164,248	1005,85	1238,82
67	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB1	8	7	180	460,545	20,9434	444,708	21,7844	0,313901	0,810761	64,4514	175,223	1233,55	1484,15
68	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	7	100	356,935	18,7929	298,752	21,9381	0,291094	0,705072	27,7517	274,046	648,22	1356,61
69	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	8	7	180	448,544	21,3097	436,654	21,9073	0,308197	0,786668	60,9221	204,508	1144,15	1449,76
70	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WLB3	15	7	320	377,792	13,2086	344,15	14,6565	0,274483	0,750986	51,1075	210,276	802,704	1289,71
71	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	5	180	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
72	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	5	180	351,972	18,3538	299,87	20,9144	0,247291	0,752265	41,0482	240,146	704,661	1355,71
73	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	8	7	180	460,545	20,9434	444,708	21,7844	0,313901	0,810761	64,4514	175,223	1233,55	1484,15
74	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WLB3	8	2	320	425,175	15,5398	407,578	16,0912	0,294314	0,795643	47,394	161,673	896,046	1131,1
75	Load Conversion	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	7	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
76	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	1	WLB1	20	7	180	395,575	13,6803	335,843	15,537	0,248758	0,720385	46,725	132,913	713,496	1197,93
77	Load Conversion	PRD	FirstInFirstOut	1	WLB3	8	5	100	469,498	15,7038	454,839	16,2334	0,29033	0,773632	50,8062	162,973	968,234	1213,61
78	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	100	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
79	Aggregato	PRD	Operation Due Date	0	WLB1	20	7	180	416,439	20,7415	355,464	23,4109	0,261611	0,741589	47,4815	202,353	788,608	1374,92

80	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WUL	20	2	180	351,972	18,3538	299,87	20,9144	0,247291	0,752265	41,0482	240,146	704,661	1355,71
81	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	2	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
82	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WLB1	8	7	260	464,351	15,1879	445,679	15,7272	0,287855	0,76906	58,3202	163,41	1006,3	1237,49
83	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	0	WUL	15	5	320	398,152	19,5965	361,913	21,5433	0,268518	0,752507	44,6029	203,231	816,948	1302,54
84	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB3	20	7	180	338,532	11,721	290,275	14,031	0,276744	0,722123	39,7176	235,913	656,552	1285,03
85	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	15	2	180	416,778	20,9886	382,368	22,7542	0,274023	0,759861	50,1318	193,17	833,334	1311,82
86	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	15	7	180	393,755	13,7055	349,841	15,0808	0,280315	0,734216	43,0732	133,791	725,852	1112,25
87	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	7	180	357,901	17,3309	305,294	20,5902	0,26187	0,745049	40,3775	307,381	752,235	1460,32
88	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB1	20	5	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
89	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	180	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
90	Load Conversion	CR	Operation Due Date	0	WLB1	20	7	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
91	Load Conversion	PRD	Shortest Processing Time	1	WLB3	15	5	260	377,792	13,2086	344,15	14,6565	0,274483	0,750986	51,1075	210,276	802,704	1289,71
92	Aggregato	CR	Closest Due Date	1	WLB1	20	7	180	395,575	13,6803	335,843	15,537	0,248758	0,720385	46,725	132,913	713,496	1197,93
93	Load Conversion	CR	Operation Due Date	0	WLB3	15	2	260	371,225	17,8411	348,546	19,6825	0,2891	0,768613	51,9761	254,211	916,992	1481,14
94	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	7	260	340,373	16,9682	291,074	19,8386	0,255422	0,751791	39,9765	266,049	740,058	1410,97
95	Load Conversion	PRD	FirstInFirstOut	1	WLB3	15	2	320	400,338	13,8991	377,157	15,3144	0,291036	0,72726	52,8776	272,491	885,187	1401,3
96	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	7	320	387,308	13,2249	326,533	15,0897	0,244851	0,726231	49,4739	135,64	660,805	1140,76
97	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	15	7	180	393,152	19,8136	354,553	21,776	0,263552	0,744985	45,2692	193,702	823,208	1295,65
98	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	8	7	180	463,731	22,4307	449,528	23,0827	0,317209	0,793647	62,8839	171,384	1200,06	1469
99	Load Conversion	CR	Shortest Processing Time	1	WUL	8	2	100	443,574	15,0349	427,404	15,5374	0,290993	0,767389	52,1486	172,843	973,851	1240,88
100	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	2	180	472,698	22,2125	457,702	22,8763	0,299774	0,800395	64,4771	168,606	1225,12	1489,96
101	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	7	320	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
102	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	1	WLB1	20	7	180	390,577	13,3521	329,636	15,2688	0,255086	0,730527	50,2797	133,172	676,872	1155,59
103	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	7	100	340,373	16,9682	291,074	19,8386	0,255422	0,751791	39,9765	266,049	740,058	1410,97
104	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	5	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
105	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WLB1	8	7	180	457,842	15,9139	441,6	16,4156	0,291193	0,777814	61,3084	167,381	999,525	1237,55
106	Load Conversion	CR	Closest Due Date	1	WLB3	8	2	260	445,29	15,4645	432,071	15,9474	0,290949	0,773183	48,4171	150,877	881,304	1120,1
107	Aggregato	CR	Critical Ratio	1	WLB1	20	7	180	395,575	13,6803	335,843	15,537	0,248758	0,720385	46,725	132,913	713,496	1197,93
108	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	180	407,716	20,6621	339,768	23,5162	0,253588	0,742739	48,4635	188,23	771,81	1336,18
109	Aggregato	CR	Closest Due Date	0	WLB1	15	7	180	393,152	19,8136	354,553	21,776	0,263552	0,744985	45,2692	193,702	823,208	1295,65
110	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WUL	8	2	100	466,955	15,799	453,826	16,2558	0,295172	0,772626	47,2798	188,091	930,308	1208,03
111	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	7	180	472,698	22,2125	457,702	22,8763	0,299774	0,800395	64,4771	168,606	1225,12	1489,96
112	Aggregato	PRD	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	7	180	416,439	20,7415	355,464	23,4109	0,261611	0,741589	47,4815	202,353	788,608	1374,92
113	Load Conversion	CR	Shortest Processing Time	1	WUL	15	5	320	407,667	14,1163	366,175	15,4746	0,275417	0,728297	43,7638	134,513	770,204	1159,1
114	Aggregato	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	5	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
115	Aggregato	CR	Shortest Processing Time	0	WLB1	20	7	260	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
116	Load Conversion	PRD	Shortest Processing Time	0	WUL	8	2	100	439,393	21,5204	431,555	21,9993	0,305991	0,795514	49,1972	245,294	1024,71	1370,68
117	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	1	WUL	20	7	180	386,271	13,1895	323,504	15,1052	0,24	0,722433	49,1298	139,641	642,027	1132,8
118	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB3	20	2	180	340,373	16,9682	291,074	19,8386	0,255422	0,751791	39,9765	266,049	740,058	1410,97
119	Load Conversion	CR	Critical Ratio	0	WLB1	20	7	180	418,386	20,6989	353,697	23,5034	0,265403	0,740135	47,0817	192,715	779,765	1362,92
120	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	2	320	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
121	Load Conversion	CR	Closest Due Date	0	WLB3	8	5	320	466,704	22,1309	453,666	22,8006	0,303196	0,797042	61,0871	187,881	1169,06	1433,35
122	Load Conversion	PRD	Closest Due Date	1	WLB1	15	2	100	407,687	14,1553	366,529	15,5115	0,27486	0,728281	43,886	134,572	771,221	1159,24
123	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WUL	20	7	180	332,42	18,0578	274,649	20,7048	0,253827	0,751572	41,6349	239,594	685,509	1336,5
124	Load Conversion	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	20	7	320	419,607	21,0014	351,125	23,8594	0,259952	0,756955	50,5344	182,808	781,567	1338,24
125	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB3	20	7	180	327,61	16,8455	263,911	20,2123	0,263484	0,725721	31,6798	251,81	717,78	1406,18

126	Aggregato	CR	Operation Due Date	0	WLB1	8	7	320	460,545	20,9434	444,708	21,7844	0,313901	0,810761	64,4514	175,223	1233,55	1484,15
127	Aggregato	PRD	Shortest Processing Time	1	WUL	8	5	260	465,305	15,2106	447,029	15,7483	0,297248	0,768018	58,6108	164,513	1005,81	1239,72
128	Aggregato	CR	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	7	100	472,698	22,2125	457,702	22,8763	0,299774	0,800395	64,4771	168,606	1225,12	1489,96
129	Aggregato	PRD	FirstInFirstOut	0	WLB1	8	7	180	486,595	21,919	471,41	22,6343	0,311521	0,813178	68,1362	169,555	1208,4	1463,22
130	Aggregato	PRD	Closest Due Date	0	WLB1	20	7	180	416,439	20,7415	355,464	23,4109	0,261611	0,741589	47,4815	202,353	788,608	1374,92
131	Load Conversion	PRD	Operation Due Date	1	WUL	15	5	260	408,228	14,1417	366,524	15,5056	0,27444	0,726739	43,6568	137,092	760,897	1155,65

Risultati sperimentali del piano 2

Tabella 45 – Risultati sperimentali del piano con solo WLB2

Run	load accounting method	Dispatching rules	Lot splitting	Time limit	Release period	Load Limit	MT	TD	ML	LD	PT	MSU	MSFT	MTFT	MSHW	MSYW
1	Aggregato	Closest Due Date	1	14	5	280	427,746	26,1578	392,109	26,5005	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
2	Load Conversion	Closest Due Date	1	8	8	280	453,61	27,1895	433,539	28,2571	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
3	Aggregato	Critical Ratio	1	20	5	140	404,734	13,6946	341,965	15,5765	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
4	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	8	2	280	487,679	18,272	474,76	18,9	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
5	Load Conversion	Operation Due Date	1	14	5	70	427,746	13,6946	392,109	15,5765	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
6	Load Conversion	Critical Ratio	1	20	5	210	404,734	14,1733	341,965	15,4934	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
7	Aggregato	FirstInFirstOut	1	14	5	70	398,474	21,8038	359,461	22,4377	0,68192	0,737759	45,9315	153,324	728,87	1107,75
8	Load Conversion	Closest Due Date	1	14	8	70	427,746	19,9774	392,109	21,8285	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
9	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	14	8	280	390,98	19,8191	352,825	21,718	0,689977	0,782818	45,7313	178,888	864,12	1312,48
10	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	14	2	210	417,719	15,557	383,17	16,1424	0,719626	0,762584	49,5702	198,579	854,942	1299,97
11	Aggregato	Shortest Processing Time	0	8	8	140	487,679	21,8038	474,76	22,4377	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
12	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	14	2	280	398,474	19,7623	359,461	21,6913	0,68192	0,737759	45,9315	153,324	728,87	1107,75
13	Aggregato	Shortest Processing Time	1	20	8	140	404,734	21,8038	341,965	22,4377	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
14	Aggregato	Shortest Processing Time	0	20	2	280	393,639	15,3443	330,99	15,8847	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
15	Aggregato	Critical Ratio	1	20	2	280	404,734	20,8051	341,965	23,4482	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
16	Aggregato	Operation Due Date	1	20	5	210	404,734	13,6678	341,965	15,0577	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
17	Load Conversion	Operation Due Date	0	8	5	210	487,679	22,5193	474,76	23,332	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
18	Aggregato	Operation Due Date	1	20	8	140	404,734	14,3872	341,965	16,2086	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
19	Aggregato	FirstInFirstOut	0	8	2	210	481,725	20,0358	471,123	21,8846	0,770642	0,803543	66,0123	171,494	1189,02	1456,48
20	Aggregato	Closest Due Date	1	20	8	70	404,734	20,6583	341,965	23,5129	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
21	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	8	5	140	453,61	19,9774	433,539	21,8285	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
22	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	14	5	210	427,746	19,7623	392,109	21,6913	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
23	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	20	5	280	404,734	12,9421	341,965	14,9436	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
24	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	20	8	210	394,579	22,4041	332,273	22,9701	0,64218	0,75113	49,1023	177,188	811,815	1388,12
25	Aggregato	Shortest Processing Time	1	8	2	210	453,61	21,8038	433,539	22,4377	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
26	Aggregato	Critical Ratio	1	14	8	210	427,746	19,8191	392,109	21,718	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
27	Aggregato	Critical Ratio	0	14	8	70	390,92	20,6897	353,42	23,5076	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
28	Load Conversion	Closest Due Date	1	8	2	210	453,61	21,8038	433,539	22,4377	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
29	Aggregato	FirstInFirstOut	1	8	8	140	467,598	20,7761	450,235	23,4382	0,724915	0,78721	59,6395	160,434	1006,54	1237,01
30	Aggregato	Critical Ratio	0	14	5	210	390,92	15,5569	353,42	16,1418	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
31	Load Conversion	Operation Due Date	1	14	8	140	427,746	20,7761	392,109	23,4382	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
32	Load Conversion	Closest Due Date	0	8	5	70	487,679	13,6678	474,76	15,0577	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
33	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	20	5	70	404,734	14,0396	341,965	15,3654	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78
34	Aggregato	Closest Due Date	0	14	2	210	390,92	14,1733	353,42	15,4934	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
35	Load Conversion	Closest Due Date	0	14	2	70	390,98	19,9774	352,825	21,8285	0,689977	0,782818	45,7313	178,888	864,12	1312,48
36	Aggregato	Shortest Processing Time	1	14	2	70	427,746	13,6946	392,109	15,5765	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
37	Aggregato	FirstInFirstOut	1	20	8	210	394,316	22,0082	333,38	22,6322	0,644752	0,728179	50,2296	130,105	684,277	1152,53
38	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	8	2	140	481,725	22,4907	471,123	23,3067	0,770642	0,803543	66,0123	171,494	1189,02	1456,48
39	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	20	2	280	408,277	20,6897	334,32	23,5076	0,635492	0,755707	50,3803	163,186	795,651	1338,98
40	Load Conversion	Closest Due Date	1	20	2	140	404,734	20,0358	341,965	21,8846	0,631461	0,730583	45,9647	128,474	747,21	1228,78

41	Aggregato	Operation Due Date	0	14	8	210	390,92	20,7147	353,42	23,5791	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
42	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	14	2	140	427,746	20,6055	392,109	22,4149	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
43	Load Conversion	Closest Due Date	0	20	5	280	393,597	19,8191	331,048	21,718	0,648585	0,749165	48,9064	176,857	808,535	1387,8
44	Load Conversion	Operation Due Date	1	8	8	210	453,61	22,4907	433,539	23,3067	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
45	Aggregato	Shortest Processing Time	0	14	5	210	390,92	15,557	353,42	16,1424	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
46	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	14	5	70	390,98	20,6583	352,825	23,5129	0,689977	0,782818	45,7313	178,888	864,12	1312,48
47	Aggregato	Operation Due Date	1	8	2	140	453,61	15,557	433,539	16,1424	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
48	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	2	210	393,597	20,0358	331,048	21,8846	0,648585	0,749165	48,9064	176,857	808,535	1387,8
49	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	8	5	70	467,598	15,557	450,235	16,1424	0,724915	0,78721	59,6395	160,434	1006,54	1237,01
50	Load Conversion	Critical Ratio	0	8	5	140	487,679	12,9421	474,76	14,9436	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
51	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	8	280	393,597	20,6897	331,048	23,5076	0,648585	0,749165	48,9064	176,857	808,535	1387,8
52	Aggregato	Operation Due Date	1	8	8	280	453,61	22,0082	433,539	22,6322	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
53	Load Conversion	Closest Due Date	0	14	5	140	390,98	21,0003	352,825	23,862	0,689977	0,782818	45,7313	178,888	864,12	1312,48
54	Load Conversion	Shortest Processing Time	1	8	8	70	453,61	13,6946	433,539	15,5765	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
55	Load Conversion	Critical Ratio	1	14	5	280	427,746	20,8221	392,109	22,6513	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
56	Load Conversion	Closest Due Date	0	8	8	140	487,679	20,6897	474,76	23,5084	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
57	Aggregato	Critical Ratio	0	20	2	210	393,639	13,6946	330,99	15,5765	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
58	Aggregato	FirstInFirstOut	0	14	8	140	417,949	20,815	384,145	22,6349	0,716628	0,763687	49,5638	196,524	855,969	1300,01
59	Load Conversion	Closest Due Date	0	20	8	210	394,579	22,4041	332,273	22,9701	0,64218	0,75113	49,1023	177,188	811,815	1388,12
60	Load Conversion	Critical Ratio	0	8	8	210	487,679	22,5193	474,76	23,332	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
61	Load Conversion	Shortest Processing Time	0	20	2	140	393,597	20,6897	331,048	23,5076	0,648585	0,749165	48,9064	176,857	808,535	1387,8
62	Aggregato	Closest Due Date	0	8	2	280	487,679	15,557	474,76	16,1424	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
63	Aggregato	FirstInFirstOut	1	14	8	280	398,474	14,0396	359,461	15,3654	0,68192	0,737759	45,9315	153,324	728,87	1107,75
64	Aggregato	FirstInFirstOut	0	20	8	70	408,277	15,8237	334,32	16,454	0,635492	0,755707	50,3803	163,186	795,651	1338,98
65	Aggregato	Operation Due Date	0	20	2	70	393,639	14,1733	330,99	15,4934	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
66	Aggregato	Operation Due Date	0	8	5	140	487,679	15,3443	474,76	15,8847	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
67	Aggregato	Critical Ratio	0	8	2	70	487,679	20,8051	474,76	23,4482	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
68	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	8	8	280	481,725	15,8237	471,123	16,454	0,770642	0,803543	66,0123	171,494	1189,02	1456,48
69	Aggregato	Closest Due Date	0	20	5	140	393,639	14,3872	330,99	16,2086	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
70	Aggregato	Critical Ratio	0	14	2	140	390,92	14,0396	353,42	15,3654	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
71	Aggregato	Closest Due Date	1	8	8	210	453,61	13,6946	433,539	15,5765	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
72	Load Conversion	Critical Ratio	1	8	8	140	453,61	21,8038	433,539	22,4377	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
73	Load Conversion	Operation Due Date	0	8	8	70	487,679	14,0396	474,76	15,3654	0,769575	0,81522	59,6187	182,731	1171,16	1445,41
74	Aggregato	Operation Due Date	1	14	2	210	427,746	14,3872	392,109	16,2086	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
75	Load Conversion	Critical Ratio	1	14	2	70	427,746	13,6946	392,109	15,5765	0,704128	0,732463	45,6776	129,126	796,74	1154,79
76	Load Conversion	Operation Due Date	0	20	5	140	393,597	14,1733	331,048	15,4934	0,648585	0,749165	48,9064	176,857	808,535	1387,8
77	Aggregato	FirstInFirstOut	0	8	5	280	481,725	20,7761	471,123	23,4382	0,770642	0,803543	66,0123	171,494	1189,02	1456,48
78	Aggregato	Operation Due Date	0	14	2	280	390,92	14,3872	353,42	16,2086	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
79	Load Conversion	FirstInFirstOut	1	20	5	140	394,316	15,557	333,38	16,1424	0,644752	0,728179	50,2296	130,105	684,277	1152,53
80	Aggregato	Shortest Processing Time	1	8	5	70	453,61	13,6946	433,539	15,5765	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
81	Load Conversion	FirstInFirstOut	0	20	5	210	408,277	19,7623	334,32	21,6913	0,635492	0,755707	50,3803	163,186	795,651	1338,98
82	Aggregato	Critical Ratio	0	20	8	280	393,639	21,8038	330,99	22,4377	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
83	Aggregato	Closest Due Date	0	14	8	70	390,92	13,6274	353,42	15,0062	0,687646	0,784803	45,7331	178,965	865,49	1312,84
84	Load Conversion	Critical Ratio	0	20	8	70	393,639	13,6946	330,99	15,5765	0,643026	0,755204	49,3162	176,215	811,85	1388,2
85	Aggregato	Critical Ratio	1	8	5	280	453,61	15,8237	433,539	16,454	0,732948	0,760689	50,827	138,427	963,993	1179,74
86	Aggregato	FirstInFirstOut	1	20	2	70	394,316	20,6583	333,38	23,5129	0,644752	0,728179	50,2296	130,105	684,277	1152,53

Bibliografia

Ackerman, S.S. (1963). Even-flow, a scheduling method for reducing lateness in job shops. *Journal of Management Technology*, 3(1), 20-32.

Adam, N., & Surkis, J. (1977). A comparison of capacity planning techniques in a job shop control system. *Management Science*, 23(9), 1011-1015.

Ahmed, I., & Fisher, W.W. (1992). Due-date Assignment, Job Order Release, and Sequencing Interaction in Job Shop Scheduling. *Decision Sciences*, 23(3), 633 – 647.

Allahverdi, A., Gupta, J.N.D., & Aldowaisan, T. (1999). A review of scheduling research involving setup consideration. *Omega, International Journal of Management Science*, (27), 219-239.

Baker, K.R. (1984). The effects of input control in a simple scheduling model. *Journal of Operations Management*, 4(2), 99-112.

Bechte, W. (1988). Controlling Manufacturing Lead Time and Work-in-Process Inventory by means of Load-Oriented Order Release. *American Production and Inventory Control Society 25th Annual conference Proceedings*, 67-72.

Bechte, W. (1988). Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research*, 26(3), 375 – 395.

Bechte, W. (1988). Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research*, 26 (3) 375-395.

Bechte, W. (1994). Load oriented manufacturing control just in time production for job shops, *Production Planning and Control*, 5(3), 292-307.

Bechte, W. (1994). Load-oriented manufacturing control, just-in-time production for job shops. *Production Planning and Control*, 5(3), 292-307.

Bergamaschi, D., Cigolini, R., Perona, M., & Portioli, A. (1997). Order review and release strategies in a job shop environment: a review and a classification. *International Journal of Production Research*, 35(2), 399 - 420.

Bertrand, J. W. M., and Wortmann, J. C. (1981). *Production Control and Information Systems for Component-Manufacturing Shops*. Dissertation.

Bertrand, J.W.M. (1983). The use of workload information to control job lateness in controlled and uncontrolled release production systems. *Journal of Operations Management*, 3(2), 79-92.

Bertrand, J.W.M., & Van Ooijen, H.P.G. (2002). Workload based order release and productivity: a missing link. *Production Planning & Control*, 13(7), 665-678.

Blackstone, J.H., Phillips, D.T., & Hogg, G.L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), 27-45.

Bobrowski, P.M. (1989). Implementing a loading heuristic in a discrete release job shop. *International Journal of Production Research*, 27(11)

Bobrowski, P.M., & Park, P.S. (1989) Work release strategies in a dual resource constrained job shop. *Omega*, 17(2), 177-188.

Bragg, D.J., Duplaga, E.A., & Watts, C.A. (1999). The effects of partial order release and component reservation on inventory and customer service performance in an MRP environment. *International Journal of Production Research*, 37(3), 523-538.

Breithaupt, J.W., Land, J. Nyhuis, P., 2002. The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release. *Production Planning and Control*, 13 (7), 625-638.

Breithaupt, J.W., Land, M., & Nyhuis, P. (2002). The workload control concept: theory and practical extensions of load oriented order release. *Production Planning & Control*, 13(7), 625-638.

Brown, J., & Davies, B.J. (1984). The phased release of batches into a job shop. *International Journal of Operations & Production Management*, 4(4), 16-27.

Chan, F.T.S., Humphreys, P., & Lu, T.H. (2001). Order release mechanisms in supply chain management: a simulation approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics*, 31(2), 124-139.

Chung, H.Y. (2005). Sequencing shop floor operations: a practical approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), 531-541.

Cigolini, R., & Portioli-Staudacher, A. (2002). An experimental investigation on workload limiting methods within ORR policies in a job shop environment. *Production Planning & Control*, 13(7), 602-613.

Cigolini, R., Perona, M., & Portioli, A. (1998). Comparison of Order Review and Release techniques in a dynamic and uncertain job shop environment. *International Journal of Production Research*, 36(11), 2931 – 2951.

Deane, R.H., & Moodie, C.L. (1972). A dispatching methodology for balancing workload assignments in a job shop production facility. *AIIE Transactions*, 4(4), 277-283.

Dominic, P.D., Kaliyamoorthy, S., & Kumar, M.S. (2004). Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24, 70-75.

Enns, S.T. (1995). An economic approach to job shop performance analysis. *International Journal of Production Economics*, 38, 117-131.

Enns, S.T. (1998). Lead time selection and the behavior of work flow in job shops. *European Journal of Operational Research*, 109, 122-136.

Enns, S.T. (2000). Evaluating shop floor input control using rapid modeling. *International Journal of Production Economics*, 63, 229-241.

Enns, S.T., & Prongue Costa, M. (2002). The Effectiveness of input control based on aggregate versus bottleneck work loads. *Production Planning & Control*, 13(7), 614-624.

Fernandes, N.O., Carmo-Silva, S. (2006). Generic POLCA - A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 104 (1), 74-84.

Flynn, B.B., & Jacobs, F.R. (1986). A simulation comparison of group technology with traditional job shop manufacturing. *International Journal of Production Research*, 24(5), 1171-1192.

Francesco Gentile, K.J. Rogers (2009). Order Release and Dispatching in a Sequence Dependent Job Shop, PICMET 2009 Proceedings, August 2-6, Portland, Oregon USA.

Fredendall, L. D., & Melnyk S.A. (1995). Assessing the impact of reducing demand variance through improved planning on the performance of a dual resource constrained job shop. *International Journal of Production Research*, 33(6), 1521 – 1534.

Gaalman, G., & Perona, M. (2002). Editorial Workload control in job shops: an introduction to the special issue. *Production Planning & Control*, 13(7), 563-567.

Graves, R.J., & Milne, R.J. (1997). A new method for order release. *Production Planning & Control*, 8(4), 332-342.

Graves, R.J., Konopka, J.M., & Milne, R.J. (1995). Literature review of material flow control mechanisms. *Production Planning & Control*, 6(5), 395-403.

Gronalt, M. (2002). Work order release and input sequencing for a printed circuit board assembly cell. *Production Planning & Control*, 13(7), 591-601.

Groover, M.P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc., 1987.

Gupta, A.K., & Sivakumar, A.I. (2006). Job shop scheduling techniques in semiconductor manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, 1163-1169.

Gupta, A.K., & Sivakumar, A.I. (2006). Job shop scheduling techniques in semiconductor manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, 1163-1169.

Haskose, A., Kingsman, B.G., & Worthington, D. (2004). Performance analysis of make-to-order manufacturing systems under different workload control regimes. *International Journal of Production Economics*, 90, 169-186.

Hendry, L. C. (1989). *A decision support system to manage delivery and manufacturing lead times in make-to-order companies*. PhD. thesis, University of Lancaster, UK.

Hendry, L. C., and Kingsman, B. G. (1993). Customer enquiry management: part of a hierarchical system to control lead times in make-to-order Companies. *Journal of the Operational Research Society*, 44(1), 61-70.

Hendry, L.C. & Wong S.K. (1994). Alternative order release mechanisms: a comparison by simulation. *International Journal of Production Research*, 32(12), 2827 -2842.

Hendry, L.C. (1998). Applying world class manufacturing to make-to-order companies: problems and solutions. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(11), 1086-1100.

Hendry, L.C. and Kingsman, B.G., (1991). A decision support system for job release in make to order companies, *International Journal of Operations and Production Management*, 11(6), 6-16.

Hendry, L.C. and Wong S.K. (1994). Alternative order release mechanisms: A comparison by simulation, *International Journal of Production Research*, 32(12), 2827-2842.

Hendry, L.C., & Kingsman, B. (1991). A decision support system for job release in make-to-order companies. *International Journal of Operations & Production Management*, 11(6), 6-16.

Hendry, L.C., & Kingsman, B.G. (1991). Job release: part of a hierarchical system to manage manufacturing lead times in make-to-order companies. *The Journal of Operational Research Society*, 42(10), 871-883.

Hendry, L.C., et al. (2008). Investigating implementation issues for workload control (WLC): A comparative case study analysis. *International Journal of Production Economics*, 112, 452-469.

Hendry, L.C., Kingsman, B.G., & Cheung, P. (1998). The effect of workload control (WLC) on performance in make-to-order companies. *Journal of Operations Management*, 16, 63-75.

Henrich, P., et al. (2004). Reducing feedback requirements of workload control. *International Journal of Production Research*, 42 (24), 5235-5252.

Henrich, P., Land, M., & Gaalman, G. (2004). Exploring applicability of the workload control concept. *International Journal of Production Economics*, 90, 187-198.

Henrich, P., Land, M., & Gaalman, G. (2006). Grouping machines for effective workload control. *International Journal of Production Economics*, 104, 125-142.

Henrich, P., Land, M., Gaalman, G., & Van Der Zee, D.J. (2004). Reducing feedback requirements of workload control. *International Journal of Production Research*, 42(24), 5235-5252.

HOPP, W. J., and SPEARMAN, M. L.(1991). Throughput of a constant work in progress manufacturing line subject to failures. *International Journal of Production Research*, 29, 635-655.

Hopp, W.J., & Spearman M.L. *Factory Physics*. New York, NY: Irwin/McGraw Hill, 1996.

Igel, M. (1981). Experiences with job shop planning. *International Journal of Production Research*, 19(2), 153-164.

Irastorza, J. C., and Deane, R. H. (1974). A loading and balancing methodology for job shop control. *AIIE Transactions*, 6(4), 302-307.

Irastoza, J.C., & Deane, R.H. (1974). A Loading and Balancing Methodology for Job Shop Control. *AIIE Transactions*, 6(4), 302 – 307.

Jacobs, F.R., & Bragg, D.J. (1988). Repetitive lots: flow-time reductions through sequencing and dynamic batch sizing. *Decision Sciences*, 19, 281- 294.

Kanet, J.J. (1988). Load–limited order release in job shop scheduling systems. *Journal of Operations Management*, 7(3), 44-58.

Kim, S.C., & Bobrowski, P.M. (1994). Impact of sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance. *International Journal of Production Research*, 32(7), 1503-1520.

Kim, S.C., & Bobrowski, P.M. (1995). Evaluating order release mechanisms in a job shop with sequence-dependent setup times. *Production and Operations Management*, 4(2), 163-180.

Kim, S.C., & Bobrowski, P.M. (1997). Scheduling jobs with uncertain setup times and sequence dependency. *Omega, International Journal of management Science*, 25(4), 437-447.

Kingsman, B. (2000). Modeling input-output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. *International Journal of Production Economics*, 68, 73-93.

Kingsman, B. G., Tatsiopoulos, I. P., and Hendry, L. C. (1989). A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. *European Journal of Operational Research*, 40(2), 196-209.

Kingsman, B., & Hendry, L. (2002). The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in make-to order companies. *Production Planning & Control*, 13(7), 579-590.

Land, M. (2006). Parameters and sensitivity in workload control. *International Journal of Production Economics*, 104 (2), 625-638.

Land, M. (2009). Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control. *International Journal of Production Economics*, 117, 97–103.

Land, M. and Gaalman, G. (1998). The performance of workload control concepts in job shops: Improving the release method. *International Journal of Production Economics*, 56–57 (20), 347–364.

Land, M., & Gaalman, G. (1996). Workload control concepts in job shops a critical assessment. *International Journal of Production Economics*, 46-47, 535-548.

Law, A.M. and Kelton, W.D. (2000). Simulation modelling and analysis, 3rd ed. New York: McGraw-Hill.

Legrande, E. (1963). The development of a factory simulation using actual operating data. *Journal of Management Technology*, 3(1), 1-19.

Malhotra, M.,K., Jensen, J.B., & Philipoom, P.R. (1994). Management of Vital Customer Priorities in Job Shop Manufacturing Environments. *Decision Sciences*, 25(5/6), 711 – 735.

Mckay, K.N., & Buzacott, J.A. (2000). The application of computerized production control systems in job shop environments. *Computers in Industry*, 42, 79-97.

Melnyk, S. A., Tan, K.C., Denzler, D.R., & Fredendall, L. (1994). Evaluating variance control, order review/release and dispatching: a regression analysis. *International Journal of Production Research*, 32(5), 1045 - 1061.

Melnyk, S.A., & Carter, P.L. (1987). Shop Floor Control: Principles and Practices and Case Studies. APICS, Falls Church, VA.

Melnyk, S.A., & Ragatz, G.L. (1988). Order Review/Release and its Impact on the Shop Floor. *Production and Inventory Management*, (Second Quarter), 13 – 17.

Melnyk, S.A., & Ragatz, G.L. (1989). Order review/release: research issues and perspectives. *International Journal of Production Research*, 27(7), 1081 – 1096.

Melnyk, S.A., Ragatz, G.L., & Fredendall, L. (1991). Load smoothing by the planning and order review/release systems: a simulation experiment. *Journal of Operations Management*, 10(4), 512-523.

Melnyk, S.A. and Ragatz, G.L. (1989). Order review/release systems: Research issues and perspectives. *International Journal of Production Research*, 27 (7), 1081–1096.

Missbauer, H. (1997). Order release and sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Economics*, 49, 131-143.

Missbauer, H. (2002). Aggregate order release planning for time-varying demand. *International Journal of Production Research*, 40(3), 699-718.

Missbauer, H. (2002). Lot sizing in workload control systems. *Production Planning & Control*, 13(7), 649-664.

Missbauer, H. (2009). Models of the transient behaviour of production units to optimize the aggregate material flow. *International Journal of Production Economics*, 118 (2), 387-397.

Nandi, A. and Rogers, P. (2003). Behaviour of an order release mechanism in a make-to-order manufacturing system with selected order acceptance. In: 2003 winter simulation conference, 1251–1259.

Newman, W.R., & Maffei, M.J. (1999). Managing the job shop: simulating the effects of flexibility, order release mechanisms and sequencing rules. *Integrated Manufacturing Systems*, 10(5), 266-275.

Nicholson, T.A.J., & Pullen, R.D. (1971). A practical control system for optimizing production schedules. *International Journal of Production Research*, 9(2), 219-227.

Onur, L., & Fabrycky, W.J. (1987). An input/output control system for the dynamic job shop. *IIE Transactions*, 88 – 97.

Oosterman, B., Land, M., & Gaalman, G. (2000). The influence of shop characteristics on workload control. *International Journal of Production Economics*, 68, 107-119.

Park, P. S., & Salegna, G.J. (1995). Load smoothing with feedback in a bottleneck job shop. *International Journal of Production Research*, 33(6), 1549 – 1568.

Park, P.S., & Bobrowski, P.M. (1989). Job release and labor flexibility in a dual resource constrained job shop. *Journal of Operations management*, 8(3), 230-249.

Perona, M., & Portioli, A. (1998). The impact of parameters setting in load oriented manufacturing control. *International Journal of Production Economics*, 55, 133-142.

Perona, M., and Portioli, A. (1996). An enhanced loading model for the probabilistic workload control under workload imbalance. *Production Planning & Control*, 7(1), 68-78.

Petroni, A. (2002). Critical factors of MRP implementation in small and medium-sized firms. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(3), 329-348.

Philipoom, P.R., & Fry, T.D. (1992). Capacity-based order review/release strategies to improve manufacturing performance. *International Journal of Production Research*, 30(11), 2559-2572.

Philipoom, P.R., & Fry, T.D. (1999). Order review/release in absence of adherence to formal scheduling policies. *Journal of Operations Management*, 17, 327 – 342.

Philipoom, P.R., Malhotra, M.K., & Jensen, J.B. (1993). An Evaluation of Capacity Sensitive Order Review and Release Procedures in Job Shops. *Decision Sciences*, 24(6), 1109-1133.

Plossl, G. W. (1988). Throughput time control. *International Journal of Production Research*, 26(3), 493-499.

Plossl, G.W., & Wight, O.W. (1973). Capacity Planning and Control. *Production and Inventory Management Journal*. 14(3), 31-67.

Portioli, A. Proposal and evaluation of new load oriented algorithms for shortterm production planning in a job shop environment (in Italian). PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1991.

Pritsker, A.B. (1986). *Introduction to Simulation and SLAM II*. West Lafayette, IN: John Wiley Sons Inc.

Ragatz, G.L. & Mabert, V.A. (1984). A comparison of two order release mechanisms. *Proceedings of the Decision Science Institute*, 391-393.

Ragatz, G.L., & Mabert, V.A. (1988). An evaluation of order release mechanisms in a job shop environment. *Decision Sciences*, (19), 167 – 189.

Rahman, S. (1998). Theory of constraints a review of the philosophy and its applications. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336-355.

Ramam, N. (1995). Input control in job shops. *IIE Transactions*, 27, 201 – 209.

Roderick, L.M., Phillips, D.T., & Hogg, G.L. (1990). CONWIP: A pull alternative to Kanban. *International Journal of Production Research*. 28(5), 879 – 894.

Roderick, L.M., Phillips, D.T., & Hogg, G.L. (1992). A comparison of order release strategies in production control systems. *International Journal of Production Research*, 30(3), 611 – 626.

Rosario Moreira, M., & Alves, R. (2006). A new input-output control order release mechanism: how workload control improves manufacturing operations in a job shop. Faculdade De Economia Working Papers, Research Paper Series - n°107, April 2006, 1-19.

Russell, G.R., & Fry, T.D. (1997). Order review/release and lot splitting in drum-buffer-rop. *International Journal of Production Research*, 35(3), 827- 845.

Sabuncuoglu, I., & Karapinar, H.Y. (1999). Analysis of order review/release problems in production systems. *International Journal of Production Economics*, 62, 259-279.

Sandman, W.E., & Hays, J.P. (1980). How to win productivity in Manufacturing, Yellow Book of Pennsylvania.

Scudder, G.D., & Hoffmann, T.R. (1989). The use of value-based priorities when early shipments are forbidden. *International Journal of Production Research*, 27(2), 353-369.

Sellers, D.W. (1996). A survey of approaches to the job shop scheduling problem. *IEEE Explore*, 395-400.

Shimoyahsiro, S., Isoda, K., & Awane, H. (1984). Input scheduling and load balance control for a job shop. *International Journal of Production Research*, 22, 597-605.

Silva, C., Roque, L., and Almeida, A. (2006). MAPP—A web-based decision support system for the mould industry. *Decision Support Systems*, 42 (2), 999–1014.

Spearman, M.L., Woodruff, D.L., & Hopp, W.J. (1992). A comparison of order release strategies in production control systems. *International Journal of Production Research*, 30(3), 611-626.

Spearman, M. L.; Woodruff, D. L.; Hopp, W. J. (1990). CONWIP: a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, 28 (5), 879-894.

Stevenson, M. (2006). Refining a workload control (WLC) concept: a case study. *International Journal of Production Research*, 44(4), 767-790.

Stevenson, M. and Silva, C. (2008). Theoretical development of a workload control methodology: Evidence from two case studies. *International Journal of Production Research*, 46 (11), 3107–3131.

Stevenson, M. and Silva, C. (2008). Theoretical development of a workload control methodology: Evidence from two case studies. *International Journal of Production Research*, 46 (11), 3107–3131.

Stevenson, M., & Hendry, L.C. (2006). Aggregate load-oriented workload control: A review and re-classification of a key approach. *International Journal of production research*, 104, 676-693.

Stevenson, M., Hendry, L.C., & Kingsman, B.G. (2005). A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make to order industry. *International Journal of Production Economics*, 43(5), 869- 898.

Suri, R. Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times. Productivity Press, Portland, OR, 1998.

Tatsiopoulou, I.P. (1988). Some aspects of the input/output methods for managing work-in-process inventories. *Engineering Costs and Production Economics*, 15, 235-239.

Tatsiopoulou, I.P. (1997). An orders release reference model as a link between production management and shop floor control software. *Computers in Industry*, 33, 335-344.

Thurer, M., Silva, C., Stevenson, M. (2009). Workload control release mechanisms: from practice back to theory. *International Journal of Production Research*, In Press.

Tsai, C.H., Chang, G.T., & Li, R.K. (1997). Integrating order release control with due-date assignment rules. *International journal of Production Research*, 35(12), 3379 – 3392.

Vollmann. T.E., Berry. W.L. and Whybark. D.C. *Mamif. Plan, and Cont. Sys.*. 4th edition, 1997 (Irwin: Boston).

Watson, E.F., Medeiros, D.J., & Sadowski, R.P. (1995). Order-release planning using variable lead times based on a backward simulation model. *International Journal of Production Research*, 33(10), 2867 – 2888.

Wein, L. M., and Chevalier, P. B. (1992). A broader view of the job-shop scheduling problem. *Management Science*, 38(7), 1018-1033.

Wein, L.M. (1988). Scheduling semiconductor wafer fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1, 115 – 130.

Wiendahl, H. P. (1990). Fundamentals and experiences with load-oriented manufacturing control. *1990 Conference Proceedings of the American Production and Inventory Control Society*, 487-491.

Wiendahl, H.P. *Load-Oriented Manufacturing Control*, Springer, London, 1995.

Wiendahl, H.-P., and Nyhuis, P. (1996). Logistic operating curves - a comprehensive method of rating logistic potentials. *Production Engineering. Annals of the German Academic Society for Production Engineering*.

Wiendahl, H.P., Glassner, J., & Petermann, D. (1992). Application of load oriented manufacturing control in industry. *Production Planning and Control*, 3(2), 118-129.

Wight, O.W. (1970). Input/output control: a real handle on lead times. *Production and Inventory Management*, 11(3), 9 – 30.

Wisner, J.D. (1995). A review of the order release policy research. *International Journal of Operations and Production Management*, 15(6), 25 – 40.

Wortman, D.B. (1992). Managing capacity: getting the most from your firm's assets. *Industrial Engineering*, 24, 47-49.

Zapfel, G., & Missbauer, H. (1993). Production planning and control (PPC) systems including load-oriented order release: problems and research perspectives. *International Journal of Production Economics*, 30-31, 107- 122.